



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evaluación de la eficiencia de un
tratamiento terciario con un consorcio
microalgal para la generación de agua
para uso directo**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Arturo Constantino Hernández Flores

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Blanca Elena Jiménez Cisneros



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado EVALUACION DE LA EFICIENCIA DE UN TRATAMIENTO TERCIARIO CON UN CONSORCIO MICROALGAL PARA LA GENERACION DE AGUA PARA USO DIRECTO que presenté para obtener el título de INGENIERO CIVIL es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

ARTURO CONSTANTINO HERNANDEZ FLORES

Número de cuenta: 317317309

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud hacia todas las personas que me han ayudado a lo largo de mi vida, dentro y fuera del ámbito académico.

A mis padres, por haberme dado lo mucho o poco que tuvieran para que yo me desarrollara académicamente y como persona, por brindarme su apoyo durante estos 24 años de mi vida, por permitirme las facilidades para estudiar sin más preocupaciones, gracias por darme su amor y sus consejos en cada etapa de mi vida, gracias por todo.

Al amor de mi vida, Shendaly, por permitirme el conocerte y el conocerme como lo has hecho todos estos años en donde desde el primer instante me demostraste el querer ser mi amiga y el querer conocerme. Gracias por entenderme, apoyarme y nunca juzgarme. Gracias por ser mi compañera de vida en todo momento, por estar presente en los momentos más trascendentales y en los más cotidianos también, gracias por amarme y alentarme siempre a ser mejor persona y dar lo mejor de mi en cada aspecto de la vida.

A mi segunda familia, Stephany, Anny, Ceci. Por siempre darme ánimos y su apoyo en todo momento desde que me abrieron las puertas de su casa.

A mi hermano Alexander por ser mi compañía en los momentos fuera de la escuela, al llegar a casa y olvidarme un poco de los pendientes para evitar el estrés, gracias por ser mi mejor amigo, al jugar, cocinar o cualquier cosa que hiciéramos en los ratos libres.

A la UNAM y la Facultad de Ingeniería, por darme la educación superior que soñé cuando era pequeño, gracias por abrirme sus puertas para desarrollarme académica y socialmente dentro de sus instalaciones, gracias por la educación pública que me brindaron que probablemente, de no ser así, me hubiera costado mucho más el tenerla. Gracias por brindarme todo el conocimiento que ahora poseo y que me servirá para aspirar a una vida mejor a la que hubiera podido aspirar de no tenerlo.

A la Maestra Catalina Maya Rendón y a la Dra. Blanca Elena Jiménez, por tenerme bajo su tutela y por abrirme las puertas del Instituto de Ingeniería y así permitirme el ampliar mis conocimientos y capacidades dentro de sus instalaciones, el estar en todo momento presentes y al pendiente de mi proceso no sólo de titulación sino que también desde el cumplimiento de mi Servicio Social y la culminación de mis materias del plan de estudios. Gracias por el todo el apoyo brindado, los consejos y las atenciones que me ayudaron a ser el egresado que hoy soy.

Al Instituto de Ingeniería, por abrirme las puertas y por permitirme formar parte de su comunidad, gracias por el apoyo económico, académico y social que se me brinda. Cada conferencia, cada foro, cada curso en el que estuve presente y a los que pude acceder con su apoyo, muchas gracias.

A los reales Alexis, Fernando, Daniel, Alex, Brandon, Ivann, Uriel y Many. Gracias por siempre estar a lo largo de toda la carrera, compartiendo o no clase siempre conté con ustedes. Esto no hubiera sido posible sin su ayuda, sin los trabajos en equipo, sin las series resueltas en equipo y las dudas aclaradas entre nosotros. El agradecimiento no sólo es cosa de las aulas, gracias por su amistad, gracias por el acompañamiento en estos 5 años de la universidad, por los días en que las tardes eran de hacer series o las

mañanas eran de jugar frontón o fútbol, gracias por el compartir cada uno de los momentos que siempre recordaré. Gracias por la ayuda en cada momento de la carrera, por sus consejos y sus pláticas, por las risas y las discusiones, pero sobre todo gracias por su amistad.

A mis amigos Fátima e Isaac, por hacer el primer semestre menos pesado, que por una u otra razón no compartimos tantas clases, pero, aun así, fueron mis primeros amigos que me hicieron sentir incluido en la FI.

A mis amigos de la ENP 2, Rubí, Carlos, Mariana, Johan y más. Gracias por su amistad, por su apoyo y su compañía durante los 3 años en la preparatoria, nunca olvidare los días dónde todo era estrés por exámenes o entregas finales, pero también los días dónde nos relajábamos comiendo un club sándwich o una hamburguesa con queso oaxaca y papás en la cafetería.

Gracias a mis sinodales por aceptar formar parte de este momento tan importante para mí, por ser docentes que con su enseñanza y sus conocimientos me transmitieron el deseo por aprender y mejorar constantemente en la ingeniería.

Gracias a todos los profesores que me dieron clase a lo largo de mi vida académica, desde el preescolar hasta la universidad, cada uno de ustedes me dio las herramientas para seguir avanzando y tener la ambición de adquirir más y más conocimiento.

Gracias la sociedad en general que me permitió desenvolverme de esta manera para lograr esto que hoy estoy logrando. A los mil y un conductores de los camiones, combis, microbuses o taxis, a los operadores del metro, que tomé para trasladarme cada día a la preparatoria, a la universidad o al lugar que tuviera que ir para cumplir con una tarea o trabajo. A los vendedores de comida que compre los días que no lleve lunch como el kiosquito de química, los tacos de canasta de enfrente de medicina, las hamburguesas “paprka” o los burritos de metro universidad.

Gracias a todas esas personas que sin saberlo contribuyen a que los estudiantes como yo consigan cumplir sus objetivos y metas día con día.

¡Muchas gracias!

***“En el agua, encontramos el reflejo de nuestra propia
naturaleza”***

– Henry David Thoreau.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	1
Contenido de tablas	3
Contenido de figuras	4
Contenido de anexos	4
Resumen	6
1 Introducción	10
2 Antecedentes	15
2.1 Historia de los sistemas de estanques de algas de alta tasa (HRAP)	15
2.1.1 Ventajas de un HRAP	15
2.1.2 Desventajas de un HRAP	15
2.2 Uso de las microalgas en el tratamiento del agua residual	16
2.2.1 Grupos de Microalgas	17
3 PLANTEAMIENTO	21
3.1 Objetivo general	21
3.2 Objetivos particulares	21
3.3 Alcances	21
3.4 Hipótesis	22
4 Metodología	24
4.1 Sitio de muestreo	24
4.2 Calidad del influente	25
4.3 Tratamiento en la Planta (primario y secundario)	26
4.4 Descripción de un sistema HRAP	27
4.5 Evaluación de la eficiencia del proceso de tratamiento terciario aplicando un sistema HRAP	29
4.6 Muestreo para cada uno de los parámetros	30
4.7 Parámetros y métodos para su determinación	33
4.7.1 Coliformes fecales	33
4.7.2 Huevos de helmintos	36
4.7.3 Sólidos Suspendidos Totales	37
4.7.4 Demanda Bioquímica de Oxígeno Disuelto (DBO ₅)	39
4.7.5 Grasas y Aceites	40
4.7.6 Nutrientes (N-Nitritos NO ₃ ⁻ , N-Nitratos NO ₃ ⁻ , Nitrógeno Amoniacal NH ₄ ⁺⁻)	41

5	Resultados y análisis de resultados	49
5.1	Lote 1	49
5.2	Lote 2	53
5.3	Lote 3	57
5.4	Lote 4	62
5.5	Lote 5	67
5.6	Coliformes fecales	73
5.7	Huevos de helmintos	74
5.8	Sólidos suspendidos totales	75
5.9	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	76
5.10	Grasas y aceites	77
5.11	Nutrientes (N-Nitritos NO ₂ ⁻ , N-Nitratos NO ₃ ⁻ , Nitrógeno Amoniacal NH ₄ ⁺⁻)	78
5.12	Porcentajes de remoción	82
5.13	Presencia de Protozoo de género <i>Brachonius</i> sp	84
6	Conclusiones	90
7	Recomendaciones	94
8	Referencias bibliográficas	97
9	Bibliografía	107
10	GLOSARIO	109

Contenido de tablas

<i>Tabla 1</i>	<i>Parámetros microbiológicos y fisicoquímicos indicados en la NOM-003-SEMARNAT-1997</i>	29
<i>Tabla 2</i>	<i>Parámetros y técnicas empleadas, NOM-003-SEMARNAT-1997</i>	29
<i>Tabla 3</i>	<i>Parámetros y técnicas empleadas para Nutrientes, APHA, Métodos Estándar ed. 23</i>	30
<i>Tabla 4</i>	<i>Fechas y periodos de muestreo por Lotes</i>	30
<i>Tabla 5</i>	<i>Normas usadas para realizar muestreos</i>	33
<i>Tabla 6</i>	<i>Resultados microbiológicos, Lote 1</i>	50
<i>Tabla 7</i>	<i>Resultados microbiológicos, Lote 1 (continuación)</i>	51
<i>Tabla 8</i>	<i>Resultados microbiológicos, Lote 1 (continuación)</i>	52
<i>Tabla 9</i>	<i>Resultados microbiológicos, Lote 1 (finaliza)</i>	53
<i>Tabla 10</i>	<i>Resultados microbiológicos, Lote 2</i>	54
<i>Tabla 11</i>	<i>Resultados microbiológicos, Lote 2 (continuación)</i>	55
<i>Tabla 12</i>	<i>Resultados microbiológicos, Lote 2 (continuación)</i>	56
<i>Tabla 13</i>	<i>Resultados microbiológicos, Lote 2 (finaliza)</i>	57
<i>Tabla 14</i>	<i>Resultados microbiológicos, Lote 3</i>	59
<i>Tabla 15</i>	<i>Resultados microbiológicos, Lote 3 (continuación)</i>	60
<i>Tabla 16</i>	<i>Resultados microbiológicos, Lote 3 (continuación)</i>	61
<i>Tabla 17</i>	<i>Resultados microbiológicos, Lote 3 (finaliza)</i>	62
<i>Tabla 18</i>	<i>Resultados microbiológicos, Lote 4</i>	64
<i>Tabla 19</i>	<i>Resultados microbiológicos, Lote 4 (continuación)</i>	65
<i>Tabla 20</i>	<i>Resultados microbiológicos, Lote 4 (continuación)</i>	66
<i>Tabla 21</i>	<i>Resultados microbiológicos, Lote 4 (finaliza)</i>	67
<i>Tabla 22</i>	<i>Resultados microbiológicos, Lote 5</i>	69
<i>Tabla 23</i>	<i>Resultados microbiológicos, Lote 5 (continuación)</i>	70
<i>Tabla 24</i>	<i>Resultados microbiológicos, Lote 5 (continuación)</i>	71
<i>Tabla 25</i>	<i>Resultado microbiológicos, Lote 5 (finaliza)</i>	72
<i>Tabla 26</i>	<i>Valores obtenidos en la determinación de Nutrientes: Lote 1, durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético con microalgas</i>	79
<i>Tabla 27</i>	<i>Valores obtenidos en la determinación de Nutrientes: Lote 2, durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético modelo con microalgas</i>	80
<i>Tabla 28</i>	<i>Valores obtenidos en la determinación de Nutrientes: Lote 3, durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético modelo con microalgas</i>	80
<i>Tabla 29</i>	<i>Valores obtenidos en la determinación de Nutrientes: Lote 4, durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético modelo con microalgas</i>	81
<i>Tabla 30</i>	<i>Valores obtenidos en la determinación de Nutrientes: Lote 5, durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético modelo con microalgas</i>	81
<i>Tabla 31</i>	<i>Eficiencia de remoción por parámetro y lote</i>	83

Contenido de figuras

Figura 1. Agua renovable por habitante de cada entidad federativa (INEGI, 2019).	12
Figura 2. Ubicación de la PTAR-FCPyS y alrededores. (Adaptado de Google Maps, 2024)	24
Figura 3. Extensión del predio que comprende la PTAR-FCPyS: 379.84 m ² . (Adaptado de Google Maps, 2024)	25
Figura 4. Cárcamo de igualación.	26
Figura 5. Arreglo del Sistema HRAP.	28
Figura 6. Sistema de mezcla tipo propela y Tanque HRAP.	28
Figura 7. Muestreo en la PTAR-FCPyS	31
Figura 8. Recipientes y bolsas para realizar muestreos.	31
Figura 9. Frascos con muestras preservadas	32
Figura 10. Muestra preservada para determinación de Grasas y Aceites.	33
Figura 11. Filtrado de muestra (efluente).	39
Figura 12 Equipo de extracción.	41
Figura 13. Determinación del grupo de bacterias Coliformes fecales aplicando la técnica de filtro de membrana vs Número Más Probable (NMP) durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético con microalgas y NOM-003-SEMARNAT-1997 Servicio al Público con Contacto Indirecto u Ocasional (CI); NOM-003-SEMARNAT-1997 Servicio al Público con Contacto Directo (CD).	74
Figura 14. Determinación de la evolución del parámetro de SST durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético con microalgas. NOM-003-SEMARNAT-1997 Servicio al Público con Contacto Indirecto u Ocasional (CI); NOM-003-SEMARNAT-1997 Servicio al Público con Contacto Directo (CD).	76
Figura 15. Determinación de la evolución del parámetro de DBO5 durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético con microalgas. NOM-003-SEMARNAT-1997 Servicio al Público con Contacto Directo (CD)	77
Figura 16. Determinación de Grasas y Aceites, durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético con microalgas, límites de NOM-003-SEMARNAT-1997 Servicios al público con contacto directo.	78
Figura 17. Remoción de coliformes fecales por Lote, en ULog.	83
Figura 18. Porcentajes de remoción por Lote y parámetro.	84
Figura 19. Formas adultas (hembra y macho) y huevos característicos del género <i>Brachionus plicatilis</i> . (Adaptado de Carmona Navarro, 1992).	87

Contenido de anexos

ANEXO A. NÚMERO MÁS PROBABLE por 100 mL, USANDO TRES TUBOS (APHA et al., 1992).....	114
ANEXO B. Diagramas de Huevos de Helminthos de Importancia Médica (Ayres, 1989).	116

Resumen

Resumen

El agua es un recurso natural indispensable para la continuidad y el desarrollo de la vida en nuestro planeta, además de ser un elemento fundamental para las funciones biológicas de los seres vivos es crucial para la realización de cualquier actividad humana, como la agricultura, la industria, el consumo doméstico, la conservación y el equilibrio de los ecosistemas. Su creciente demanda, el uso irresponsable y el mal manejo han generado una grave crisis hídrica que ha afectado tanto al ambiente como a la sociedad a nivel global. Situación a la cual México no es ajeno, el país enfrenta una escasez creciente de agua en diversas regiones lo cual compromete el bienestar general de su población y agrava la condición en la que se encuentran inmersas comunidades vulnerables.

Ante este escenario, el tratamiento y reúso del agua residual ha adquirido una relevancia crucial, ya que se trata de una herramienta que puede contribuir a mitigar la crisis hídrica al transformar el agua contaminada, considerada, anteriormente, como un desecho, en un recurso apto para su reutilización. Esto no sólo alivia la presión ejercida hacia las fuentes naturales de agua, sino que, también, favorece la sostenibilidad a largo plazo. Es en este contexto, el presente trabajo se enfoca como una alternativa ecológica e innovadora para el tratamiento de aguas residuales a través del uso de microalgas, organismos cuyo empleo permitirá eliminar contaminantes y mejorar la calidad del agua, ofreciendo con ello, un enfoque amigable con el ambiente.

A lo largo de este trabajo se exploran las dinámicas actuales de la gestión del agua, poniendo en evidencia la necesidad urgente de contar con tratamientos eficientes que, permitan limpiarla de manera sostenible y respetuosa con el ambiente. En este sentido, se analiza la evolución de los sistemas de tratamiento, particularmente los sistemas de estanques de algas de alta tasa (High-Rate Algal Pond, HRAP, por sus siglas en inglés), lo cuales en los últimos años por sus beneficios han cobrado notoriedad. Este tipo de

tratamiento ha ganado atención por su capacidad para remover nutrientes y otros contaminantes presentes en el agua residual, utilizando para ello la acción biológica de las microalgas.

En este contexto, se hace una revisión exhaustiva de las principales especies de microalgas empleadas en este proceso, así como de las condiciones ambientales que favorecen su crecimiento y optimizan su eficacia en la depuración del agua. Sin embargo, también se identifican obstáculos, como la proliferación de protozoos del género *Brachonious* sp., que durante este estudio causaron un impacto negativo al inhibir el crecimiento de las microalgas, lo que puso de manifiesto la necesidad de controlar este obstáculo para la eficiencia del proceso.

La aplicación del sistema de tratamiento con microalgas se ejecutó en la Planta de Tratamiento de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, UNAM (PTAR-FCPyS), en un Estanque de Alta Tasa de 300 litros de capacidad. Para la evaluación de los parámetros microbiológicos y fisicoquímicos considerados en el presente estudio, antes y después del tratamiento, se emplearon las técnicas descritas en métodos estándares reconocidos a nivel internacional; así como, de las normativas mexicanas aplicables para las aguas residuales tratadas. Al mismo tiempo, se realizó la medición de nutrientes en sus diferentes formas (nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal), parámetros que son indicadores clave para evaluar la eficiencia del proceso de tratamiento.

Los resultados obtenidos fueron concluyentes y muestran que el sistema de los estanques HRAP son una solución eficiente para mejorar la calidad del agua residual para uso en servicios públicos con contacto indirecto e inclusive contacto directo. A lo largo del estudio se observó una reducción significativa en las concentraciones de los contaminantes evaluados, lo que refuerza la viabilidad del presente tratamiento como una alternativa a los procesos convencionales. Lo anterior se debe a que, no sólo cumple con los estándares de

calidad establecidos en la normativa mexicana, como la NOM-003-SEMARNAT-1997, sino que constituye un potencial real para ser implementado en contextos más amplios, tanto a nivel local como global, por sus ventajas económicas y ecológicas.

En conclusión, el uso del consorcio microalgal para el tratamiento del agua residual se plantea como una solución viable y sostenible que, puede jugar un papel clave en la gestión del agua en el futuro. Se trata de un tratamiento eficiente desde el punto de vista técnico, representa un enfoque innovador alineado con los principios de la sostenibilidad, al aprovechar procesos biológicos naturales para tratar el agua residual. La adopción de este tipo de soluciones podría representar un avance significativo en el tratamiento de aguas residuales en regiones con alta demanda hídrica, contribuyendo así a la gestión eficiente de los recursos hídricos y a la protección del medio ambiente en el contexto de los desafíos globales actuales.

No obstante, es fundamental prestar atención a los factores que pueden influir en su eficacia, como la presencia de organismos competidores que inhiben el crecimiento algal. El proceso, en su etapa final, requiere la adaptación de un sistema de sedimentación o filtración que garantice la remoción de la biomasa microalgal presente en el efluente terciario, ya que su presencia disminuye la calidad y ocasiona interferencias en las determinaciones de algunos de los parámetros evaluados y con ello, obstaculiza el cumplimiento de la normativa. Por último, se proponen recomendaciones para mejorar la implementación de sistemas de estanques de algas de alta tasa, considerando tanto las limitaciones detectadas durante el estudio como las oportunidades de mejora en términos de infraestructura, control de variables ambientales y escalabilidad del sistema.

INTRODUCCIÓN

1 Introducción

El agua es uno de los recursos naturales de mayor importancia para el ser humano. En 2001 de acuerdo con Jiménez-Cisneros se calculaba que en el planeta Tierra existían aproximadamente 1,385,000,000 km³ de agua, donde el 97.3% correspondía a agua salada, el 2.08% al agua congelada en los polos y sólo el 0.62% era agua dulce y disponible para nuestras necesidades (Jiménez-Cisneros, 2001).

Aunado a lo anterior, Jiménez-Cisneros expresó que a nivel mundial, la abundancia y distribución del agua dulce depende de diversos factores, siendo uno de los de mayor importancia la condición climática donde la renovación natural del agua ocurre a través del ciclo hidrológico e implica que, durante la precipitación, el 72% del agua cae al mar y el 28% en la tierra, de este 28% aproximadamente el 7% se percola a los acuíferos, el 8% termina por escurrir con destino al mar y el 13% restante retorna hacia la atmósfera por evaporación y evapotranspiración.

Es de destacar que la distribución de este 7% del agua dulce que termina por escurrir a los diversos cuerpos de agua dulce como son los lagos, las lagunas y los ríos presenta un escenario desigual, debido a la variación de la condición climática, a las diferencias en la geología y orografía de los lugares, tipo de suelo y vegetación que imponen las variaciones a lo largo de la extensión territorial y al pasar del tiempo.

El índice de escasez hídrico, calculado para México, empleando la metodología de Falkenmark en 1989 y expuesto por Jiménez-Cisneros en 2001, ya colocaba para ese entonces al país como una región con disponibilidad de agua comprometida por su variación temporal y su contaminación (Jiménez-Cisneros, 2001). Considerando estas cuestiones, ya desde hace dos décadas era de urgencia el atender esta necesidad estableciendo una administración estricta con el fin de supervisar manejo responsable, almacenamiento y protección a conciencia, y evitar con ello, en la medida de la posible su escasez.

En México, como ocurre en el resto del mundo en diferentes latitudes, el agua dulce disponible para uso y consumo tiene una distribución irregular. En México la mayor parte de este recurso se concentra al sur, en datos del Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO):

De los principales ríos, siete representan 71% del agua superficial del país, distribuidos en la zona centro y sur del país, mientras que sólo 29% del agua superficial se ubica en la zona norte (IMCO, 2023).

En la zona norte y centro del país que es donde se concentra más de dos tercios de la población nacional además de contar con la mayor parte de regiones destinadas a producción agrícola y de industria registra un porcentaje pequeño de escurrimiento en promedio anual.

En lo que respecta al acceso del agua por parte de la población, las cifras son también desiguales, información proporcionada por INEGI en el año 2019 señala que en el Valle de México se encuentra la disponibilidad anual más baja de agua (apenas 144 m³/hab); en caso contrario se encuentra la frontera sur (más de 18 mil m³/hab.) (INEGI, 2019).

Además, con información del mismo INEGI se puede observar que debido al crecimiento de la población:

La disponibilidad de agua ha disminuido de manera considerable en los últimos años: en 1910 era de 31 mil m³ por habitante al año; para 1950 había disminuido hasta un poco más de 18 mil m³; en 1970 se ubicó por debajo de los 10 mil m³, en 2005 era de 4,573 m³ y para 2019 disminuyó a 3,586 m³ anuales por cada mexicano (INEGI, 2019).

En la Figura 1 Se visualiza la variación de disponibilidad de agua por cada habitante alrededor del país.



Figura 1. Agua renovable por habitante de cada entidad federativa (INEGI, 2019).

El creciente deterioro del ambiente y la necesidad de recursos hídricos en calidad y cantidad adecuadas, hace necesario explorar la viabilidad del reúso del agua residual (AR) para ser empleada como una fuente de agua potable no convencional y que ayude a satisfacer su creciente demanda. Resulta trascendental que, para eliminar cualquier riesgo a la salud, la reutilización de un agua residual tratada sea segura.

La reutilización del agua residual tratada es una estrategia esencial para enfrentar el estrés hídrico en áreas con alta demanda y recursos limitados a nivel global, el reúso permite aprovechar aguas residuales no sólo favoreciendo la conservación de los recursos hídricos, sino también mitigar el impacto ambiental asociado a la descarga de aguas residuales en cuerpos receptores (Asano *et al.*, 2007).

En la actualidad, existen diversos métodos para el procesamiento del, AR que comprenden varias etapas de tratamiento: a) Tratamiento primario: Es la primera etapa del tratamiento de aguas residuales. Su objetivo es eliminar sólidos grandes y materiales suspendidos en el agua mediante procesos físicos como la sedimentación, tamizado y flotación. El tratamiento primario reduce la carga de contaminantes, pero no elimina contaminantes

disueltos ni microorganismos; b) Tratamiento secundario: Se centra en la eliminación de materia orgánica biodegradable disuelta en el agua mediante procesos biológicos. Aquí se utilizan microorganismos que descomponen la materia orgánica. Algunos métodos comunes incluyen lodos activados, filtros percoladores y lagunas de estabilización. Esta etapa reduce significativamente la DBO (demanda biológica de oxígeno) y otros contaminantes orgánicos; c) Tratamiento terciario: Es una etapa avanzada diseñada para eliminar contaminantes residuales que no se eliminaron en las fases anteriores. Incluye la eliminación de nutrientes (como nitrógeno y fósforo), metales pesados, patógenos y compuestos químicos específicos. Los procesos empleados pueden incluir filtración avanzada, desinfección (cloración, ozono, radiación ultravioleta), ósmosis inversa o intercambio iónico. Este tratamiento produce agua de alta calidad que puede ser reutilizada o descargada sin afectar el medio ambiente (Metcalf & Eddy, 2003).

En este contexto, el biotratamiento con microalgas constituye una alternativa atractiva, ya que mientras las algas crecen en el agua residual y producen biomasa valiosa, eliminan el carbono orgánico y nutrientes inorgánicos presentes, por lo que pueden desempeñar un papel importante en la fitorremediación, particularmente durante la fase final de tratamiento terciario de las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) (Oswald *et al.*, 1957; Oswald y Gotaas, 1957; Goldman, 1979; De la Noüe y De Pauw, 1988; Oswald, 1995; González *et al.*, 1997; Mallick, 2002).

ANTECEDENTES

2 Antecedentes

2.1 Historia de los sistemas de estanques de algas de alta tasa (HRAP)

A finales de la década de los 50's estudios diversos condujeron al desarrollo de estanques de algas de alta tasa (HRAP). Estanques de estabilización que, con la actividad, incremento y recuperación de la masa algal, se combina la función del tratamiento del agua residual con la recuperación de recursos benéficos (Oswald *et al.*, 1957; Oswald y Golueke 1960; Shelef *et al.*, 1973; Goldman, 1979; Robinson, 1980).

2.1.1 Ventajas de un HRAP

El tratamiento primario y secundario tradicional proporcionan las condiciones óptimas para la proliferación microbiana en la degradación de desechos orgánicos a nutrientes inorgánicos, mediante una amplia mezcla y entrada de oxígeno; sin embargo, tienen poca o nula capacidad para la eliminación de nutrientes mediante procesos físicos y químicos terciarios cuya eficiencia es variable (Oswald, 1988; Metcalf y Eddy, 2003). Por su parte, un tratamiento terciario requiere tiempos de residencia prolongados en reactores y el empleo de aditivos químicos de alto costo, además de la presencia de residuos en el efluente que representan un riesgo a la salud (Waldichuk, 1985; Oswald, 1988; Metcalf y Eddy, 2003).

De esta forma, un HRAP conserva las ventajas de los estanques convencionales (simplicidad y economía), pero supera los inconvenientes de la calidad del efluente deficiente y variable, y tiene el beneficio adicional de recuperar los nutrientes del agua residual como biomasa de algas/bacterias cosechables para su uso benéfico como, fertilizante y biocombustible, que podría constituir una valiosa fuente de energía para las comunidades locales. Mientras que, su costo operativo y de capital, en comparación con los sistemas mecánicos de eliminación de nutrientes, es menor (Downing *et al.*, 2002).

2.1.2 Desventajas de un HRAP

Una desventaja importante de los sistemas HRAP, en comparación con los sistemas de tratamiento electromecánico (por ejemplo, lodos activados) y la superficie de tierra similar

a los de estanques de oxidación, es la necesidad de contar con un área relativamente grande; además, cuando se combina el pretratamiento de sedimentación por gravedad (por ejemplo, clarificador primario) del agua residual sin tratar (para eliminar los sólidos orgánicos), con el tratamiento posterior del efluente HRAP (para eliminar la biomasa de algas/bacterias), se debe considerar un pulido adicional final del efluente.

2.2 Uso de las microalgas en el tratamiento del agua residual

Desde los años 40's, las microalgas constituyen un papel importante en la acuicultura, pero fue en la década de los 50's que se lanzó la idea de utilizarlas para el tratamiento del agua residual doméstica y décadas después la atención mundial se centró en su empleo para la producción de combustibles y fertilizantes hasta incluso llegar en nuestros días ser tomada en cuenta como alimento para el ser humano.

En palabras de Pulz y Gross (2004, como se citó en Sánchez et al, 2022):

En las últimas décadas, se ha incrementado el interés por el cultivo y el aprovechamiento biotecnológico de microalgas. Son diversas las aplicaciones en fitorremediación, en la obtención de compuestos bioactivos, biomasa para reemplazar aceites y proteínas extraídos de fuentes convencionales de consumo, además de adicionar valor nutricional a favor de la salud humana; sin embargo, se requiere continuar investigando para lograr procesos de producción de biomasa microalgal que sean más eficientes, así como el aprovechamiento integral para obtener bioproductos que sean aplicables en diferentes áreas. A este proceso integral se le conoce como biorrefinería microalgal (Pulz y Gross, 2004) p 2-3.

El interés por el uso de microalgas en sistemas de tratamiento proviene de los trabajos realizados por Oswald y colaboradores de la Universidad de California, quienes demostraron las ventajas potenciales de promover la simbiosis entre algas y microorganismos aeróbicos presentes en el agua residual (Gotaas *et al.*, 1954). Para 1960,

Oswald y Golueke propusieron la utilización de microalgas como materia prima para la producción de biocombustibles, al emplear estanques HRAP con profundidades en el rango de 0.2 a 0.5 m y ruedas de paletas motorizadas para un movimiento constante del agua residual, y tiempos de retención hidráulica (HRT) de 3 a 10 días (Oswald, 1988; Park y Craggs, 2010; Craggs *et al.*, 2012; 2014). De esta forma, la liberación posterior del dióxido de carbono y nutrientes promovían una mayor producción autótrofa, lo que a su vez ayudaba a la restauración de la concentración del oxígeno disuelto (OD), generando la descomposición aerobia de compuestos orgánicos por bacterias heterótrofas. Así, a medida que los protozoos ingieren a las bacterias y las microalgas, que constituyen alimento para los invertebrados pequeños, los nutrientes se mueven a través de la red alimentaria (Hynes, 1971).

2.2.1 Grupos de Microalgas

Desde un punto de vista sistemático, el grupo de las microalgas incluye un gran número de especies pertenecientes a dos grandes grupos: los procariotas, que incluyen a las algas verdeazuladas (cianobacterias) y los eucariotas, que incluyen a las algas verdes (*Chlorophyta*), las algas rojas (*Rhodophyta*) y las diatomeas (*Bacillariophyta*). De éstas, sólo entre 30 a 40 especies han sido consideradas para el cultivo masivo y sólo unas pocas son, actualmente, de importancia comercial (Borowitzka, 1988a; Richmond, 1986a). A ellos pertenecen representantes de los géneros *Chlorella*, *Scenedesmus* (algas verdes), *Spirulina* (alga verde azulada) y varias especies de fitoflagelados y diatomeas que se utilizan como alimento vivo en la maricultura larvaria (De Pauw y Persoone, 1988; Pearson, 2005).

2.2.1.1 Factores determinantes del crecimiento algal

La producción de las microalgas implica el cultivo, recolección y su procesamiento (Soeder, 1980; Becker y Venkataraman, 1982). Los principales factores de importancia en el proceso

de cultivo de algas son la luz, el pH, la temperatura, la agitación, los nutrientes y otros (Becker y Venkataraman, 1982; Borowitzka and Worowitzka 1988).

- a) Luz: Aunque las tasas máximas de crecimiento se alcanzan en condiciones de saturación de luz, ya que la producción es proporcional a la eficiencia de conversión de energía solar, no necesariamente la máxima saturación de luz genera efectos positivos, en todo caso, la limitación de la luz se establece en función de la irradiación adaptando la densidad del área del cultivo y, por tanto, la concentración de las algas.
- b) Temperatura: A pesar de que, bajo condiciones limitantes de la luz, el efecto de la temperatura disminuye con respecto a la tasa de crecimiento, las temperaturas demasiado bajas pueden llegar a ser desfavorables, especialmente durante el día o en invierno (Toerien y Grobbelaar, 1980; Vonshak *et al.*, 1982; Bedell, 1985). Por esta razón, el calentamiento de los cultivos puede ser benéfico, principalmente en áreas con radiación incidente, siendo las temperaturas óptimas entre 15 y 30 °C.
- c) Agitación: La agitación es otro factor importante para el cultivo de microalgas, no solo para evitar la sedimentación, la fotoinhibición, la limitación de nutrientes y la estratificación térmica, sino también para aumentar la eficiencia de conversión de la luz (Persoone *et al.*, 1980; Richmond, 1986b).
- d) Nutrientes: Para un crecimiento óptimo, el cultivo debe recibir nutrientes en cantidades adecuadas (Borowitzka, 1988b). Estos incluyen varios macronutrientes como carbono, nitrógeno y fósforo, azufre, potasio y una serie de oligoelementos como los minerales cobalto (Co), molibdeno (Mo), y manganeso (Mn) y varias vitaminas (por ejemplo, B12 y tiamina). Además de las cantidades, las proporciones correctas entre los nutrientes (por ejemplo, N: P; N: Si), son importantes (Persoone *et al.*, 1980; Richmond, 1986b).

e) Otros factores: Incluso si las condiciones anteriores se cumplen de manera óptima, puede surgir una serie de problemas biológicos en el cultivo masivo de microalgas, que incluyen contaminación, enfermedades, el colapso prematuro por la falta de control de especies o la presencia de depredadores del zooplancton (Shelef y Soeder, 1980; Becker y Venkataraman, 1982; De Pauw *et al.*, 1984; Richmond, 1986b). Las medidas de control para evitar la contaminación por bacterias y otras especies de organismos son la esterilización, la filtración o cambiando las condiciones de cultivo adecuado (De Pauw *et al.*, 1983; Lincoln *et al.*, 1983; Schlütter y Groenweg, 1981; Ukeles, 1976).

Con base en lo antes mencionado, el presente estudio integra la evaluación de la eficiencia de un proceso de tratamiento terciario a través de un consorcio microalgal, empleando un estanque de algas de alta tasa (HRAP), a través de los parámetros establecidos por la NOM-003-SEMARNAT-1997 de SEMARNAT y considerando la remoción de nutrientes y así determinar si el efluente es para uso directo.

PLANTEAMIENTO

3 PLANTEAMIENTO

3.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de un tratamiento terciario del efluente de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales (PTAR-FCPyS) en Ciudad Universitaria, empleando un HRAP y generar así un agua para reúso en servicios al público con contacto directo.

3.2 Objetivos particulares

- Evaluar la eficiencia de remoción de parámetros microbiológicos y fisicoquímicos del efluente tratado con base en la NOM-003-SEMARNAT-1997.
- Evaluar la remoción de nutrientes en sus formas de Nitrógeno presentes en el efluente.
- Determinar si el tratamiento de aguas residuales empleando un HRAP cumple con los parámetros de la NOM-003-SEMARNAT-1997 para su reúso en servicios al público con contacto directo.
- Identificar las condiciones climáticas que favorecen o afectan la eficiencia del tratamiento con microalgas.
- Explorar la posible existencia de microorganismos que pudieran significar una amenaza para el tratamiento con microalgas, de ser así, controlar su presencia.

3.3 Alcances

- Se determinó la eficiencia de un sistema HRAP como un tratamiento terciario para el cumplimiento del límite máximo permitido de los cinco parámetros establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997: Coliformes fecales (bacterias), huevos de helmintos (parásitos), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y Grasas y Aceites (GyA).

- Se realizó la evaluación de la eficiencia en la remoción de los nutrientes como; N-nitritos, N-nitratos y Nitrógeno amoniacal aplicando un sistema HRAP.
- Se llevó a cabo el control del protozoo del género *Brachonius* sp., para evitar un riesgo en el crecimiento de las microalgas.

3.4 Hipótesis

Con la aplicación de un tratamiento terciario basado en el empleo de un consorcio de microalgas en un HRAP, la eficiencia de la remoción de parámetros microbiológicos y fisicoquímicos es suficiente para cumplir con los límites permitidos por normativa para la consideración de agua para uso con contacto directo para que con base en la NOM-003-SEMARNAT-1997.

METODOLOGÍA

4 Metodología

4.1 Sitio de muestreo

El sitio de muestreo para el estudio fue la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales (PTAR-FCPyS), ubicada en el Circuito Mario de la Cueva dentro del Campus Central de la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, con georreferencia en las coordenadas 19°19'14.6" N 99°10'36.0" W (Figura 2).

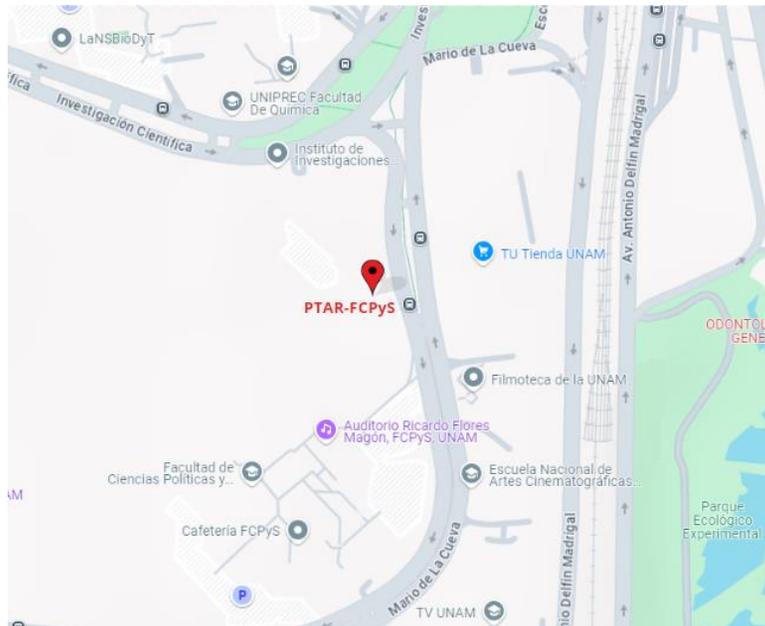


Figura 2. Ubicación de la PTAR-FCPyS y alrededores. (Adaptado de Google Maps, 2024)

La PTAR-FCPyS cuenta con una extensión de 379.84 m² dentro de los cuales existen los siguientes equipo e infraestructura:

- Rejillas de cribado
- Cárcamo de captación
- Roto filtro
- Cárcamo de igualación

- Tanque anaerobio
- Dos reactores Sequencing Batch Reactor (SBR, en sus siglas en inglés)
- Clarificador
- Filtro de arena

Estando en función la mayoría de ellos a excepción de tres: el tanque anaerobio, uno de los reactores SBR y el filtro de arena.

La planta recibe un influente de 6.5 a 7.0 litros por segundo en condiciones promedio, provenientes de la FCPyS, Tienda UNAM y los edificios que comprenden la Zona Cultural de Ciudad Universitaria (Universum, Pabellón de la Biodiversidad, Centro Cultural Universitario), entre otros (Figura 3).

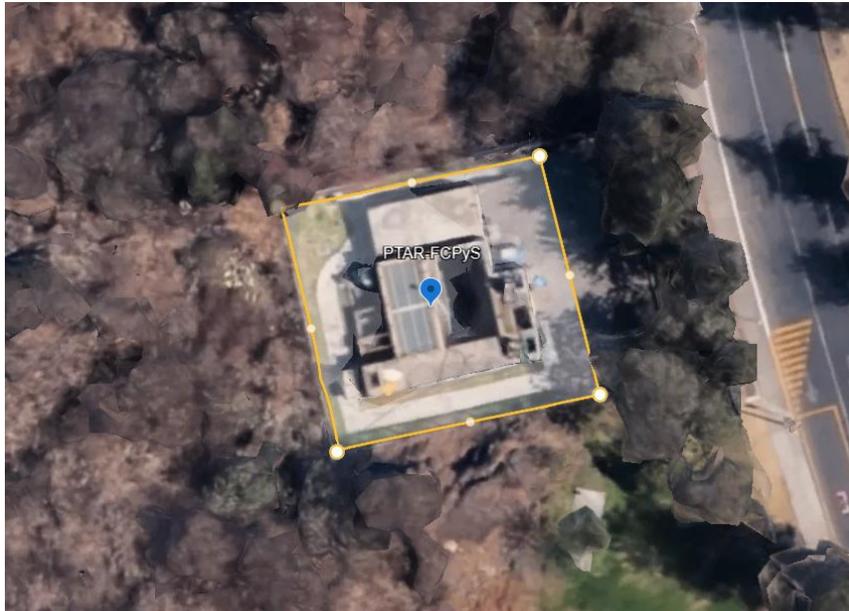


Figura 3. Extensión del predio que comprende la PTAR-FCPyS: 379.84 m². (Adaptado de Google Maps, 2024)

4.2 Calidad del influente

En palabras del encargado de la operación de la planta, Víctor Vázquez, el agua que llega a la PTAR-FCPyS tiene una calidad típica de agua residual municipal, si bien no se cuenta con un laboratorio para el monitoreo del caudal que se recibe en el cárcamo de captación,

los valores de los parámetros presentes en el influente están dentro de los intervalos usuales para este tipo de agua, con presencia de coliformes fecales, turbiedad apreciable a simple vista, presencia de grasas y aceites y cantidad de nutrientes y sólidos suspendidos totales considerable. En la Figura 4 se puede observar el efluente recibido en el cárcamo de igualación.



Figura 4. Cárcamo de igualación.

4.3 Tratamiento en la Planta (primario y secundario)

En la PTAR-FCPyS se aplica un tratamiento al agua residual que constituye de los siguientes procesos y operaciones unitarias:

- Cribado: El cribado primario se realiza con rejillas que retienen objetos y partículas de gran tamaño que, pudieran significar un riesgo para las instalaciones de la planta.
- Captación primaria: El agua residual proveniente de los edificios de la zona cultural de Ciudad Universitaria y de la FCPyS es recibida en un tanque de captación primaria para su posterior tratamiento.

- Roto filtrado: Se realiza una roto filtración para disminuir el tamaño de partículas y objetos grandes que pudieran significar un riesgo para el equipo en la planta. En este punto se realiza la medición del caudal que se está tratando en el momento.
- Igualación: La etapa de igualación se realiza para homogeneizar las características fisicoquímicas del agua y aumentar la eficiencia del tratamiento en la planta; además, de evitar variaciones considerables en el caudal tratado y de picos altos a la entrada.
- Reactor SBR: En la planta se cuenta con dos reactores SBR, pero sólo uno está en funcionamiento, el tratamiento con lodos activados cuenta con ciclos de aireación que van de 5 a 7 horas de duración con tiempos de operación con una duración de una hora cada uno y descansos de 15 min entre cada tiempo. De forma posterior, se realiza el vaciado dejando solamente la capa de lodos activados al fondo, esta capa tiene una altura aproximada de 20 cm.
- Clarificador: El clarificado se realiza inmediatamente al finalizar el tiempo de retención en el tanque SBR del caudal en tratamiento. Por gravedad, las partículas más pesadas se eliminan.
- El filtro de arena: Fuera de funcionamiento.
- No hay otro tratamiento y el efluente se dispone a una zona de filtrado natural justo detrás del lote que comprende la PTAR.

4.4 Descripción de un sistema HRAP

El tanque HRAP empleado durante el presente estudio se situó a un costado de la PTAR-FCPyS, para su construcción se empleó malla de acero y geomembrana para su revestimiento, tiene forma rectangular, extremos semiesféricos y un deflector central con una longitud igual a la sección rectangular, con una profundidad de 0.3 m de altura, lo que

le permite el paso de la luz solar y con ello el proceso de fotosíntesis), 6 m de largo y capacidad de 300 litros. (Figura 5).



Figura 5. Arreglo del Sistema HRAP.

Para el mezclado del cultivo de microalgas y reducir la formación de gradientes se empleó un sistema tipo propela que tiene un consumo energético de 50 W/h, así como tiempos de retención hidráulica (HRT) de 1 a 14 días. En su inicio, el HRAP contó con una línea de alimentación de agua del efluente proveniente de la PTAR-FCPyS y con una línea de salida para el vaciado del reactor una vez cumplido el tiempo de retención establecido (Figura 6).

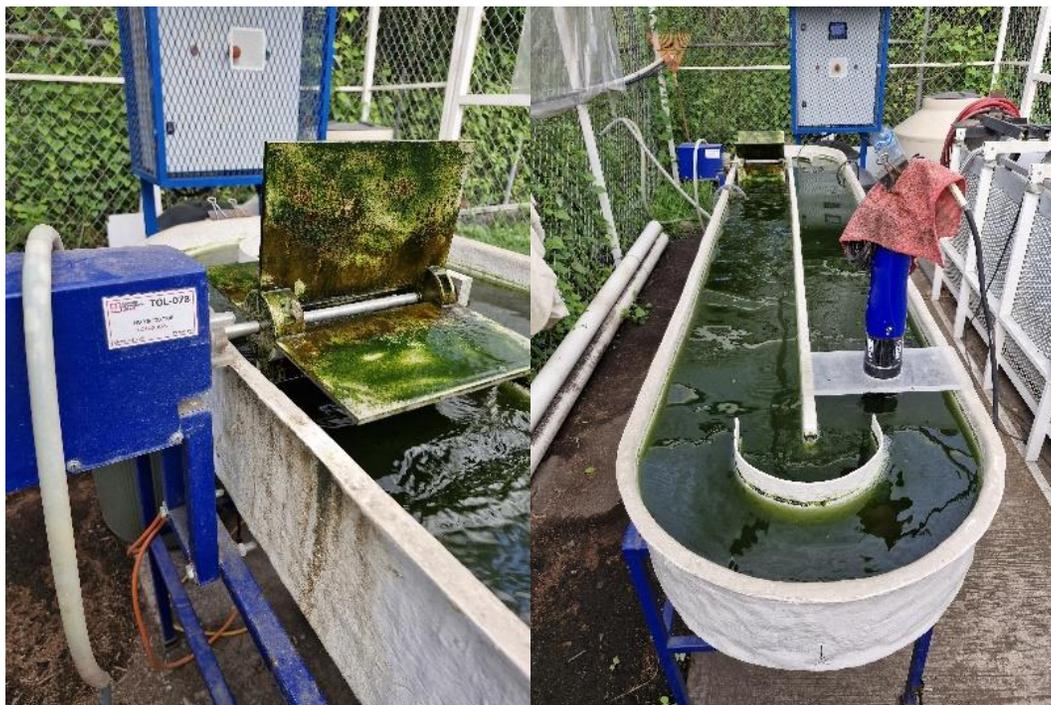


Figura 6. Sistema de mezcla tipo propela y Tanque HRAP.

4.5 Evaluación de la eficiencia del proceso de tratamiento terciario aplicando un sistema HRAP

Para la evaluación de la eficiencia del sistema HRAP se realizó la determinación de los parámetros microbiológicos y fisicoquímicos establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997 y con ello determinar el tipo de reúso que se le puede aplicar (Tabla 1).

Tabla 1 Parámetros microbiológicos y fisicoquímicos indicados en la NOM-003-SEMARNAT-1997

Tipo de Reúso	Promedio Mensual				
	Coliformes Fecales (NMP/100 mL)	Huevos de Helmintos (HH/L)	Grasas y Aceites (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	SST (mg/L)
Servicios al público con contacto directo (CD)	240	≤ 1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional (CI)	1,000	≤ 5	15	30	30

En la Tabla 2 y Tabla 3 se muestran las técnicas empleadas para cada una de las determinaciones, mientras que en la Tabla 4 se observan las fechas y períodos de muestreo para cada uno de los 5 Lotes de muestreo realizados para la evaluación de la eficiencia del sistema HRAP.

Tabla 2 Parámetros y técnicas empleadas, NOM-003-SEMARNAT-1997

Parámetro	Técnica empleada
Bacterias, (NMP/ 100 mL; UFC/100 mL)	Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA <i>et al.</i> , 2009; NMX-AA-42-SCFI-2015
	Filtro de membrana (UFC/ 100 mL) 9222C, D, E APHA <i>et al.</i> , 2009; NMX-AA-102-SCFI-2006
Helmintos (HH/L)	NMX-AA-113-SCFI-2012
Grasas y Aceites (mg/L)	NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012*
Sólidos Suspendedos Totales (mg/L)	NMX-AA-034-SCFI-2015
DBO ₅ (mg/L)	NMX-AA-028-SCOFI-2001
* Método de Ensayo SM-5520-D-2012, Límite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1	

Tabla 3 Parámetros y técnicas empleadas para Nutrientes, APHA, Métodos Estándar ed. 23.

Parámetro	Técnica empleada
N-nitritos NO ₂ ⁻ (mg/L)	SM-4500-NO ₂ I; NMX-AA-099-SCFI-2021-Metódo de ensayo
N-nitratos NO ₃ ⁻ (mg/L)	SM-4500-NO ₃ ⁻ I; NMX-AA-079-SCFI-2001-Metódo de ensayo
Nitrógeno Amoniacal NH ₃ -N (mg/L)	SM-4500-NH ₃ -N; EPA-350.1-1993

Tabla 4 Fechas y periodos de muestreo por Lotes

Muestreo	Tipo de muestra / Período			
	Influyente/ Día 0	Efluente Microalgal/ Día 7	Efluente Microalgal/ Día 14	Sedimentación (cosecha)/ Día 15
Lote 1	12 - jun - 23	19 - jun - 23	26 - jun - 23	27 - jun - 23
Lote 2	01 - ago - 23	08 - ago - 23	*11 - ago - 23	**14 - ago - 23
Lote 3	04 - sep - 23	11 - sep - 23	18 - sep - 23	***20 - sep - 23
Lote 4	02 - oct - 23	09 - oct - 23	16 - oct - 23	***18 - oct - 23
Lote 5	06 - nov - 23	13 - nov - 23	20 - nov - 23	***22 - nov - 23

*Día 10; **Día 13, se acortan las fechas de muestreo por decremento de la biomasa microalgal
 ***Día 16, del tercer al quinto muestreo la etapa de cosecha se efectuó a las 48 h

Al aplicar este enfoque, se asegura que los resultados del tratamiento no sólo sean válidos desde un punto de vista técnico, sino también cumplan con las regulaciones vigentes y las mejores prácticas globales para la determinación de los parámetros ya mencionados.

4.6 Muestreo para cada uno de los parámetros

Un adecuado muestreo, es una actividad crítica en la evaluación de cualquier proceso de tratamiento y para todo análisis de agua, ya que de éste depende la correcta representatividad y precisión de los resultados obtenidos. La ejecución del muestreo realizada correctamente nos da la seguridad de que las muestras que se evaluarán reflejan de manera precisa las condiciones reales que presenta el agua antes y después de la aplicación del tratamiento, al evaluar así la eficiencia del proceso y obteniendo resultados fiables. En la Figura 7 se observa la toma de muestras realizada en la PTAR-FCPyS.



Figura 7. Muestreo en la PTAR-FCPyS

Para garantizar una evaluación precisa de cada uno de los parámetros considerados en el presente estudio, se tomaron muestras separadas ya que, cada uno de los métodos de determinación a aplicar requiere diferentes condiciones de preservación, manejo y análisis. Los parámetros microbiológicos y fisicoquímicos considerados poseen características y tiempos de estabilidad distintos, por lo que el uso de un solo tipo de muestra podría comprometer la integridad de los resultados. En la Figura 8 se muestra el tipo de recipientes y bolsas utilizados para realizar los muestreos.



Figura 8. Recipientes y bolsas para realizar muestreos.

La preservación adecuada de las muestras es esencial para evitar su degradación o alteración, mediante el uso de condiciones específicas de almacenamiento, como temperaturas controladas y el uso de agentes preservantes cuando sea necesario.

Asimismo, los recipientes utilizados deben ser los adecuados para cada tipo de parámetro, asegurando que no interactúen con los componentes del agua y mantengan la muestra en óptimas condiciones hasta el momento del análisis. En las NMX mencionadas en la Tabla 5 se detallan con precisión las características específicas que deberán tener cada uno de los contenedores con los que se realice el muestreo, en ellas también se indican los preservadores recomendados para cada muestra y las condiciones (luz, frío) en las que se deben mantener antes de la determinación de cada uno de los parámetros considerados si es que el ensayo no sea realizado inmediatamente después de la toma de la muestra. En la Figura 9 y la Figura 10 se observan algunos de los frascos con muestras para distintos parámetros después de añadir los reactivos para su preservación.



Figura 9. Frascos con muestras preservadas

Tabla 5 Normas usadas para realizar muestreos.

Parámetro	Norma usada para realizar el muestreo
Coliformes fecales	NMX-AA-042-SCFI-2015, apartado 5: Recolección, almacenamiento y preservación de muestras.
Huevos de helmintos	NMX-AA-113-SCFI-2012 apartado 7 Recolección, preservación y almacenamiento de muestras.
Sólidos suspendidos totales	NMX-AA-034-SCFI-2015, apartado 7. Recolección, preservación y almacenamiento de muestras.
Demanda bioquímica de oxígeno	En la NMX-AA-028-SCFI-2001 apartado 7: Recolección, preservación y almacenamiento de muestras.
Grasas y aceites	NMX-005-SCFI-2013 apartado 8: Recolección, preservación y almacenamiento de muestras.
Nutrientes	NMX-AA-026-SCFI-2010, NMX-AA-079-SCFI-2001, NMX-AA-099-SCFI-2021 en sus apartados 6, 6 y 7 respectivamente.



Figura 10. Muestra preservada para determinación de Grasas y Aceites.

4.7 Parámetros y métodos para su determinación

4.7.1 Coliformes fecales

Los coliformes fecales o también denominados termotolerantes son miembros de la familia Enterobacteriaceae, ya que se encuentran normalmente en el intestino, constituyen el 10% de los microorganismos intestinales de los seres humanos y otros animales de sangre caliente y son descargadas en gran número en las heces. Debido a que estos

microorganismos forman parte de la flora intestinal normal, en general no causan enfermedad y contribuyen, incluso, a la función normal y a la nutrición. Las densidades de estas bacterias son, además, proporcionales al contenido de heces en el agua e indicando la posible existencia de bacterias patógenas al hombre. Por todo lo anterior, son buenos indicadores de la contaminación biológica del agua (Jiménez-Cisneros *et al.*, 2001; WHO, 2006).

4.7.1.1 Determinación y cuantificación de coliformes fecales

La evaluación microbiológica de la calidad del agua permite, por medio de la fermentación o degradación anaerobia de los hidratos de carbono por los microorganismos (en la que el oxígeno molecular como aceptor terminal de electrones ha sido sustituido por un sustrato orgánico), estimar la magnitud de la contaminación. Dicha evaluación se realiza por medio de una serie de pruebas sistemáticas de cuantificación de indicadores bacteriológicos, principalmente del grupo coliforme fecal, cuya sola presencia demuestra que ha ocurrido algún tipo de contaminación por material fecal reciente (Jiménez-Cisneros *et al.*, 2001; WHO, 2006).

4.7.1.2 Número Más Probable (NMP), Prueba directa (medio A-1), NMX-AA-042-SCFI-2015, 9221E2, APHA *et al.*, 2009.

La prueba directa realizada con el medio líquido A-1 es un método de un sólo paso que no requiere confirmación. Sin embargo, su uso representa un mayor costo ya que este medio no se encuentra en forma deshidratada y es necesario prepararlo a partir de sus ingredientes básicos (APHA *et al.*, 2017).

4.7.1.2.1 Principios

Los principios de este método son mencionados en la NMX-AA-042-SCFI-2015 y tienen su origen en Los métodos estándares para examinar agua y agua residual (APHA, AWWA, WEF) sección 9221 técnica de tubos múltiples edición 2009:

1. Las bacterias en una muestra se pueden separar mediante agitación, creando una suspensión uniforme de células.
2. Mediante diluciones sucesivas, se obtienen inóculos que permiten el crecimiento en el medio de cultivo, resultando en al menos un tubo positivo.
3. La combinación de resultados positivos y negativos facilita la estimación de la densidad bacteriana a través de cálculos de probabilidad.
4. La técnica elegida permite analizar un volumen de muestra adecuado para obtener resultados significativos, teniendo en cuenta la posible alta turbidez debido a la acumulación de material, ya que el uso de técnicas como el filtro de membrana podría subestimar la cantidad de coliformes fecales.

(APHA, AWWA, WEF, 2009).

Los materiales, equipo, reactivos, procedimiento, cálculo y forma de expresar resultados están descritos de manera clara y específica en la NMX-AA-042-SCFI-2015, en los Anexos se facilita la tabla empleada para interpretar y obtener el valor de NMP siguiendo los pasos descritos en la NMX mencionada.

4.7.1.3 Filtro de membrana, NMX-AA-102-SCFI-2006.

El método de filtro de membrana, al igual que el de NMP, permite cuantificar los coliformes fecales presentes en el agua y se describe en la NMX-AA-102-SCFI-2006.

4.7.1.3.1 Principios

El método está basado en lo siguiente

- Una bacteria da lugar a una colonia (Unidad Formadora de Colonia UFC), permitiendo estimar la densidad bacteriana en un volumen de muestra determinado.

4.7.1.3.2 Prueba

El método se divide en dos grandes pasos para la ejecución de las pruebas: preparar las diluciones de muestra y la filtración de estas.

Los materiales, equipo, reactivos, procedimiento, cálculo y forma de expresar resultados están descritos de manera clara y específica en la NMX-AA-102-SCFI-2006.

4.7.2 Huevos de helmintos

Los helmintos son un amplio grupo de gusanos parásitos pluricelulares que infectan a humanos, animales y vegetales. Existen de vida libre y los hay con formas y tamaños muy variados. Cuentan con la existencia de órganos diferenciados y sus ciclos de vida comprenden la producción de huevos y/o larvas, los cuales comprenden la etapa infecciosa, así como la alternancia compleja de generaciones que puede incluir hasta la portación en tres huéspedes diferentes.

Los helmintos dañan tejidos, causan efectos tóxicos y provocan la pérdida de sangre. La contaminación por huevos de este tipo de parásitos de cultivos puede llevarse a cabo a través de la deposición directa de heces de humanos o animales, o bien, por medio del empleo de agua residual cruda o deficiente tratada para la agricultura.

La infección por este tipo de patógeno intestinal ocurre cuando se ingieren los huevos en su etapa infectiva, por lo que dichas estructuras son el principal riesgo para la salud por:

- (a) su alta persistencia en el ambiente,
- (b) la dosis infectiva mínima (de un huevo) y
- (c) la falta de inmunidad en los humanos.

En particular los huevos de helmintos (HH) tienen una resistencia alta, ya que son capaces de sobrevivir por largos periodos, incluso 10 años o más, mucho más tiempo incluso que virus, bacterias, y hongos. Además, son resistentes a los tratamientos de desinfección convencionales, razón por la cual son empleados como indicadores para el monitoreo de la eficiencia de diversos procesos de tratamiento. A nivel internacional, los porcentajes reportados para los diferentes grupos de helmintos son los siguientes: nemátodos 90 a 93

% y cestodos 7 a 10 %, siendo *Ascaris* sp. el género de mayor frecuencia (Jiménez *et al.*, 2001).

4.7.2.1 Técnica para determinación de HH

La técnica empleada para la cuantificación de HH se describe en la NMX-AA-113-SCFI-2012.

4.7.2.1.1 Principios

Este método, descrito en la NMX-AA-113-SCFI-2012 se basa en la diferencia de densidades entre los huevos de helmintos y otros sólidos presentes en las aguas residuales. Comprende tres procesos fundamentales de separación que son: la sedimentación, la flotación y la decantación; también, de una etapa de extracción denominada bifásica, finalizando con una etapa final de identificación y conteo que se lleva a cabo utilizando una cámara de conteo Sedgewick-Rafter al microscopio óptico (Maya *et al.*, 2006).

4.7.2.1.2 Reporte de Prueba.

El reporte corresponde al número de huevos de helmintos por litro de muestra HH/L. Se deberá anexar cualquier observación que sea necesaria para cualquier aclaración del resultado, como, por ejemplo: detritus en la muestra que no fue retirado durante el procesamiento, dificultades en la lectura al microscopio y número de diluciones requeridas para la lectura de la muestra.

Los materiales, equipo, reactivos, procedimiento y condiciones de seguridad están descritos de manera clara y específica en la NMX-AA-113-SCFI-2012.

4.7.3 Sólidos Suspendidos Totales

Los sólidos suspendidos totales (SST), se definen como el material constituido por los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos y coloidales contenidos en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, que son retenidos en un filtro de fibra de vidrio con poro de 1.5 μm a una temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Las aguas en general pueden contener sustancias disueltas en cantidad variable, según su origen. De acuerdo con su naturaleza, éstos pueden ser sólidos disueltos y sólidos suspendidos, entre otros. Dentro de un proceso de tratamiento, la evaluación de la presencia de sólidos sirve para medir su efectividad.

4.7.3.1 Técnica para determinación de SST

La técnica realizada para la cuantificación de los SST en las muestras problema fue la técnica descrita en la NMX-AA-034-SCFI-2015.

4.7.3.1.1 Principio

La NMX-AA-034-SCFI-2015, en su apartado 2 Principio del método indica:

El principio de este método se basa en la medición cuantitativa de los sólidos y sólidos disueltos; así como, la cantidad de materia orgánica contenidos en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, mediante la evaporación y calcinación de la muestra filtrada o no, en su caso a temperaturas específicas, en donde los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo del contenido de estos (SE, 2015a, p. 2).

En la *Figura 11* se puede observar la etapa de filtración de la muestra, para el efluente microalgal antes de la cosecha de biomasa.

En la NMX-AA-034-SCFI-2015 se describen y mencionan los materiales, equipo, reactivos, procedimiento y condiciones de seguridad, así como la manera de realizar cálculos y presentación de resultados.



Figura 11. Filtrado de muestra (efluente).

4.7.4 Demanda Bioquímica de Oxígeno Disuelto (DBO_5)

La DBO_5 es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días (SE, 2001a, p. 1).

4.7.4.1 Técnica empleada para cuantificar la DBO_5

La técnica presente en la NMX-AA-028-SCFI-2001 se llevó a cabo para cuantificar la demanda bioquímica de oxígeno.

4.7.4.1.1 Principios

El método descrito en la NMX-AA-028-SCFI-2001 tiene como bases:

Medir la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para efectuar la oxidación de la materia orgánica presente en aguas naturales y residuales y se determina por la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto al cabo de cinco días de incubación a $20^{\circ}C$. El método se basa en medir el oxígeno consumido por una población microbiana en condiciones en las que se ha inhibido

los procesos fotosintéticos de producción de oxígeno en condiciones que favorecen el desarrollo de los microorganismos (SE, 2001a, p. 2).

En la NMX-AA-028-SCFI-2001 se describen y mencionan los materiales, equipo, preparación de reactivos, pretratamiento de la muestra, procedimiento y condiciones de seguridad, posibles interferencias, así como la manera de realizar cálculos y la manera de presentar resultados.

4.7.5 Grasas y Aceites

En la determinación de grasas y aceites (GyA) no se mide una cantidad absoluta de una grasa o aceite en específico (NMX-AA-005-SCFI-2013). Lo que se determinan son grupos de compuestos no saturados con características físicas similares y que se disuelven en el solvente empleado (por ejemplo, n-hexano). Así, el término “grasas y aceites” comprende cualquier material recuperado como sustancia soluble en el solvente.

Esto incluye otro tipo de materiales extraídos como son los compuestos azufrados, algunos colorantes orgánicos y la clorofila, todos compuestos que no se volatilizan durante el ensayo.

4.7.5.1 Técnica empleada para la cuantificación de GyA

Para la cuantificación de GyA presentes en las muestras problema se realizó la técnica descrita en la NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012.

4.7.5.1.1 Principios

En la NMX-AA-005-SCFI-2013, en su apartado 2 se explica que el método para la determinación de GyA:

Se basa en la adsorción de grasas y aceites en tierra de diatomeas, los cuales son extraídos en un equipo de extracción por recirculación empleando hexano como disolvente. Una vez terminada la extracción se evapora el hexano y se pesa el residuo que ha quedado en el recipiente; siendo este valor el contenido de grasas y aceites (SE, 2013, p. 2).



Figura 12 Equipo de extracción.

La NMX-AA-005-SCFI-2013 describe los materiales, equipo, preparación de reactivos, procedimiento y condiciones de seguridad, posibles interferencias, así como la manera de realizar cálculos y la presentación de resultados para su interpretación.

4.7.6 Nutrientes (N-Nitritos NO_3^- , N-Nitratos NO_3^- , Nitrógeno Amoniacal NH_4^{+-})

Los nutrientes son esenciales para el desarrollo y la reproducción de la vida terrestre y también la acuática. Los dos nutrientes más importantes en el agua son el nitrógeno y el fósforo. La disponibilidad de estos puede promover o restringir el crecimiento de las plantas acuáticas, lo que los convierte en elementos cruciales para acelerar la eutrofización natural; sin embargo, generalmente es el fósforo el que actúa como el factor limitante. Por lo general, estos compuestos no se eliminan de manera efectiva durante los procesos biológicos de tratamiento de aguas (Jiménez-Cisneros, 2001).

4.7.6.1 N-Nitritos

El nitrito, reconocido como una fase intermedia en el ciclo del nitrógeno, puede encontrarse en el agua debido a la descomposición biológica de materiales proteicos. En aguas

superficiales no tratadas, la presencia de nitritos es un claro indicativo de contaminación. Estos compuestos ingresan a menudo a los efluentes como consecuencia de su utilización como inhibidores de corrosión en procesos industriales o por la oxidación parcial del amoníaco. Por otro lado, los nitratos (NO_3^-) son empleados como fertilizantes en forma de nitrato de amonio o pueden ser utilizados como explosivos cuando se combinan con derivados del petróleo.

4.7.6.1.1 Determinación de nitritos (NMX-AA-099-SCFI-2021; SM-4500- NO_2)

Para la determinación de nitritos se debe considerar la técnica descrita en la NMX-AA-099-SCFI-2021 que tiene como principio lo siguiente:

El principio del método consiste en que los nitritos presentes reaccionan en medio ácido ($\text{pH} = 1.9$ a 2.5), para formar ácido nitroso que reacciona con la sulfanilamida por una reacción de diazoción para formar una sal de diazonio, la cual por copulación con el diclorhidrato de N-(1-Naftil) etilendiamina forma un colorante azóico de color púrpura rojizo que se mide espectrofotométricamente a 543 nm (SE, 2021, p. 7).

Esta técnica para la determinación de nitritos en agua es descrita en el apartado SM-4500- NO_2^- y es comúnmente conocida como el método colorimétrico:

El método colorimétrico (4500- NO_2^- -B) es adecuado para concentraciones de 5 a 1000 g de NO_2^- -N/L. Los valores de nitrito se pueden obtener mediante el método automatizado indicado en la Sección 4500- NO_3^- E (APHA *et al.*, 2017). con él se omite el paso de reducción de Cu-Cd.

Además, el nitrógeno nitrito puede determinarse mediante cromatografía iónica y mediante análisis de inyección de flujo (APHA *et al.*, 2017).

4.7.6.2 N-Nitratos

Los nitratos son prácticamente inexistentes o se encuentran en cantidades muy reducidas en las aguas residuales; sin embargo, en efluentes tratados mediante procesos de nitrificación, pueden alcanzar concentraciones de hasta 30 mg N/L.

Estos compuestos son fundamentales para los organismos autótrofos fotosintéticos y a menudo se consideran un nutriente limitante para su crecimiento (SE, 2001b).

Los compuestos nitrogenados oxidados, como los nitritos y nitratos, de acuerdo con Jiménez-Cisneros generan diversos problemas, tales como:

1. La contaminación de cuerpos de agua debido al fomento de un crecimiento excesivo de vegetación acuática, fenómeno conocido como eutroficación acelerada, donde los nitratos son las formas de nitrógeno directamente implicadas.
2. El uso de agua o leche materna con altas concentraciones de nitratos (>10 mg N/L) en la alimentación de infantes menores de seis meses puede causar metahemoglobinemia (asfixia).
3. La utilización de agua que contenga nitritos para la preparación de alimentos puede dar lugar a la formación de sustancias carcinogénicas denominadas nitrosaminas.

(Jiménez, 2001)

4.7.6.2.2 Determinación de Nitratos (NMX-AA-079-SCFI-2001; SM-4500-NO₃)

Para la determinación de los Nitratos presentes en las muestras problemas se realizaron los métodos descritos en la NMX-AA-079-SCFI-2001.

- a) Método de reducción con cadmio cuperizado

Principio:

El nitrato (NO_3^-) siempre se reduce cuantitativamente a nitrito (NO_2^-) en presencia de cadmio (Cd). Este método emplea gránulos de cadmio, disponible comercialmente, tratado con sulfato de cobre (CuSO_4) y empacado en columna de vidrio.

El nitrito producido se determina entonces por diazotización de la Sulfanilamida acoplada con dihidrocloruro de N-(1-naftil) etilendiamina para formar un azo-compuesto altamente colorido que se mide espectrofotométricamente o colorimétricamente. Para determinar la presencia de nitritos en la muestra y realizar las correcciones necesarias se puede hacer un análisis sin el paso de reducción.

Este método es aplicable en el intervalo de concentraciones entre 0,01 mg de N- NO_3^-/L a 1,0 mg de N- NO_3^-/L . El método se recomienda especialmente para niveles de nitrato por debajo de 0,1 mg N/L, donde otros métodos carecen de la sensibilidad adecuada (SE, 2001b, p. 2).

b) Método de sulfato de brucina

Principio:

La brucina es un complejo que reacciona con los nitratos bajo condiciones ácidas y temperatura elevada para producir un complejo de color amarillo. Generalmente las muestras deben ser diluidas para obtener una concentración de nitrógeno de nitratos en el intervalo de concentraciones de 0,1 mg/L a 1,0 mg/L. La intensidad del color desarrollado es función del tiempo y la temperatura; ambos factores deben ser cuidadosamente controlados (SE, 2001b, p. 2).

La determinación de nitratos puede resultar difícil debido a la alta probabilidad de que haya componentes que interfieran en varias matrices. Para seleccionar el método que se aplicará a la determinación de nitritos se debe considerar lo

siguiente: la matriz de muestra, el rango de concentración que se espera obtener y las necesidades de datos para la aplicación particular (APHA *et al.*, 2017).

La técnica de luz ultravioleta (UV), que mide la absorbencia de NO a 220 nm, es adecuada para la detección en agua no contaminada (baja en materia orgánica).

El nitrato se puede determinar mediante cromatografía iónica, electroforesis iónica capilar o los métodos que se mencionan a continuación. Los métodos y sus rangos aplicables, definidos en los métodos estándares APHA (2017) son:

- Método espectrofotométrico ultravioleta: 0.2 - 11.0 mg NO₃⁻N /L.
- Método de detección ultravioleta derivado segundo: 0.5 - 2.5 mg (NO₃⁻N) /L.
- Método del electrodo de nitrato: 1.0 - 50.0 mg (NO₃⁻N) /L.
- Método de reducción de cadmio: 0.5 - 1.0 mg nitrato + nitrito - nitrógeno (NO₃⁻ +NO₂-N) /L.
- Método de reducción automatizada de cadmio: 0.5 - 10.0 mg nitrato + nitrito - nitrógeno (NO₃⁻+NO₂-N) /L.
- Método de reducción automatizada de hidracina: 0.05 - 1.0 mg de nitrato + nitrógeno nitrito (NO₃⁻+NO₂-N) /L.
- Método de inyección de flujo de reducción de cadmio: 0.05 – 5.0 mg de nitrato + nitrito (NO₃⁻+NO₂-N) /L.

(APHA *et al.*, 2017)

4.7.6.3 Nitrógeno Amoniacal

El amoníaco, en su forma de ion amonio, es el contaminante nitrogenado más comúnmente encontrado en el agua, ya que, además de ser un producto natural, también resulta del uso industrial.

El nitrógeno amoniacal se presenta de manera natural tanto en aguas superficiales como en aguas residuales. En los acuíferos, su concentración es muy baja debido a su adsorción en las arcillas y a que no se lixivia fácilmente desde los suelos.

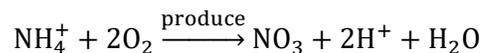
El NH_4^+ se genera a través de la desaminación de compuestos orgánicos nitrogenados y por la hidrólisis de la urea. En algunas plantas potabilizadoras, se añade amoníaco para formar cloraminas, lo que permite que el poder desinfectante del cloro tenga una duración prolongada. En aguas residuales, es imposible obtener cloro libre sin oxidar previamente el nitrógeno amoniacal.

De acuerdo con Jiménez-Cisneros (2001, citada por Sánchez Arias en 2016):

La concentración de nitrógeno amoniacal en las aguas varía desde 10 $\mu\text{g/L}$ hasta 30 mg/L en aguas residuales domésticas.

Los principales problemas asociados al amoníaco son:

1. Toxicidad para la fauna acuática cuando se presenta como amoníaco en concentraciones de solo unas pocas partes por millón.
2. Reducción de la efectividad del proceso de cloración.
3. Consumo de oxígeno (4.57 $\text{mg O}_2/\text{mg N}$) según:



El control del nitrógeno implica el control de todos sus compuestos, ya que son formas fácilmente intercambiables (Jiménez-Cisneros, 2001).

Por ello se debe tener conocimiento de las concentraciones de las distintas formas del nitrógeno presentes en el agua.

4.7.6.3.2 Determinación de nitrógeno amoniacal (EPA-350.1-1993)

Para el caso de la determinación de nitrógeno amoniacal se realizó el método descrito en EPA-350.1-1993: Determinación de nitrógeno amoniacal por medio semiautomatizado de colorimetría.

Este método cubre la determinación de nitrógeno amoniacal en aguas potables, subterráneas, superficiales y salinas además de aguas residuales domésticas e industriales. El rango de aplicación es de 0.01 – 2.0 mg/L NH₄ como N. Se pueden determinar concentraciones más altas mediante la dilución de la muestra problema y se pueden analizar aproximadamente 60 muestras por hora.

Descripción corta del método:

Delgado Noboa (2022), da una descripción corta, pero concisa del método establecido por EPA (1971):

La muestra se tampona a un pH de 9.5 mediante la utilización de un tampón a base de borato, con el fin de reducir la hidrólisis de cianatos y compuestos orgánicos nitrogenados, y se destila en una solución de ácido bórico. El fenol alcalino y el hipoclorito reaccionan con el amoniacal para generar azul de indofenol, cuya intensidad es proporcional a la concentración de amoniacal presente. El color azul resultante se intensifica mediante la adición de nitroprusiato de sodio y se mide utilizando técnicas colorimétricas (Delgado Noboa, 2022).

Las versiones del método para volumen reducido del método que utilizan los mismos reactivos y proporciones molares son aceptables siempre que cumplan con los requisitos de control de calidad y rendimientos establecidos en el método (EPA, *et al.*, 1993).

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5 Resultados y análisis de resultados

A continuación, se muestran los resultados generales, obtenidos para cada uno de los 5 Lotes muestreados durante los meses de junio a noviembre de 2023.

5.1 Lote 1

Para evaluar la eficiencia del proceso de tratamiento con un consorcio microalgal utilizando un sistema HRAP, se efectuó el primero de 5 muestreos en el mes de junio del año 2023. Los resultados obtenidos, para la etapa de cosecha en la sedimentación, mostraron una mejoría en calidad, comparados a los obtenidos en la etapa del efluente secundario proveniente de la PTAR-FCPyS, tanto, para los parámetros microbiológicos, como para los fisicoquímicos, con base a los que la NOM-003-SEMARNAT-1997 establece, con excepción del parámetro de grasas y aceites (Tabla 6 a la Tabla 9).

Para el caso del contenido de huevos de helmintos, es importante destacar que desde el efluente secundario de la PTAR-FCPyS su contenido cumple con los requerimientos para un servicio al público con contacto indirecto u ocasional al ser <5 HH/L. Para el caso de la etapa de la cosecha, el efluente cumple con los requerimientos para un servicio al público con contacto directo.

Observaciones: Las lecturas en microscopio se dificultaron debido a una pastilla saturada de microalgas: para la lectura del efluente a 0 días se realizó una lectura de 25 alícuotas.

Tabla 6 Resultados microbiológicos, Lote 1.

Muestreo	Réplicas	ªColiformes fecales (UFC/100 mL)		ªColiformes fecales		ªSST		ªGrasas y Aceites		ªHuevos de Helmintos				ªDBO5	
		Influyente	Efluente	Influyente	Efluente	Influyente	Efluente	Influyente	Efluente	(HH/ L)		(mg/L)			
Día 0	12/06/2023	Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Totales	Especies identificadas	Totales	Especies Identificadas	Influyente Día 0	Efluente Microalgal Día 0
		A	3.9x10 ⁴	3.6x10 ⁴	2.9x10 ⁴	4.3x10 ⁴	7	216	35.3	21.2	2	<i>Ascaris</i> spp.	1	<i>Ascaris</i> spp.	11
	B	3.3x10 ⁴	3.8x10 ⁴	3.4x10 ⁴	3.6x10 ⁴	8	216	NR	NR	1	<i>Ascaris</i> spp.	ND	ND	NR	NR
	C	2.6x10 ⁴	3.1x10 ⁴	3.4x10 ⁴	3.9x10 ⁴	7	210	NR	NR	ND	ND	1	<i>Ascaris</i> spp.	NR	NR
	ULog	A	4.5911	4.5563	4.4624	4.6335									
		B	4.5185	4.5798	4.5315	4.5563									
		C	4.415	4.4914	4.5798	4.5911									
	Promedio	4.51	4.54	4.52	4.59	7.3	214	-	-	1	NA	0.67	NA	11	12
	DE (±)	0.09	0.05	0.06	0.04	0.58	3.46	-	-	1	NA	0.58	NA	NR	NR

ªTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ¢Técnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ¢Técnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ¢Técnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Límite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ¢NMX-AA-113-SCFI-2006; ¢NMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica

Tabla 7 Resultados microbiológicos, Lote 1 (continuación).

Muestreo	Réplicas	^a Coliformes fecales (UFC/100 mL)	^b Coliformes fecales	^c SST	^d Grasas y Aceites	^e Huevos de Helmintos		^f DBO5
			(NMP/ 100 mL)	(mg/ L)	(mg/L)	(HH/ L)		(mg/L)
Día 7		Efluente Día 7	Efluente Día 7	Efluente Día 7	Efluente Día 7	Efluente Microalga Día 7		Efluente Microalgal Día 7
19/06/2023						Totales	Especies Identificadas	
	A	1.6X10 ³	1.1.X10 ³	432	22.8	1	<i>Ascaris</i> spp.	6
	B	9.3X10 ²	9.3X10 ²	434	NR	1	<i>Hymenolepis diminuta</i>	NR
	C	9.1X10 ²	9.1X10 ²	432	NR	ND	NA	NR
	ULog	A	3.2041	3.0414				
		B	2.9685	2.9685				
		C	2.9586	2.959				
	Promedio	3.0473	2.9896	433	-	1	NA	6
	DE (±)	0.14	0.05	1.15	-	0	NA	NR

^aTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ^bTécnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ^cTécnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ^dTécnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Límite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ^eNMX-AA-113-SCFI-2006; ^fNMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica

Tabla 8 Resultados microbiológicos, Lote 1 (continuación)

Muestreo	Réplicas	^a Coliformes fecales (UFC/100 mL)	^b Coliformes fecales (NMP/ 100 mL)	^c SST (mg/ L)	^d Grasas y Aceites (mg/L)	^e Huevos de Helmintos (HH/ L)		^f DBO5 (mg/L)
		Efluente Día 14	Efluente Día 14	Efluente Día 14	Efluente Día 14	Efluente Microalga Día 14		Efluente Microalgal Día 14
Día 14	26/06/2023					Totales	Especies Identificadas	
		A	33	43	464	32.8	ND	ND
	B	35	36	464	NR	ND	ND	NR
	C	30	39	464	NR	ND	ND	NR
	ULog	A	1.5	1.6				
		B	1.5	1.6				
		C	1.5	1.6				
	Promedio	1.5	1.6	464	-	ND	NA	8
	DE (±)	0	0	0	-	ND	NA	NR

^aTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ^bTécnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ^cTécnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ^dTécnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Límite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ^eNMX-AA-113-SCFI-2006; ^fNMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica

Tabla 9 Resultados microbiológicos, Lote 1 (finaliza).

Muestreo	Réplicas	^a Coliformes fecales (UFC/100 mL)	^b Coliformes fecales	^c SST	^d Grasas y Aceites	^e Huevos de Helmintos		^f DBO5
			(NMP/ 100 mL)	(mg/ L)	(mg/L)	(HH/ L)		(mg/L)
Día 15	27/06/2023	Cosecha	Cosecha	Cosecha	Cosecha	Cosecha		Cosecha
						Totales	Especies identificadas	
	A	3	9.1	18	30.3	ND	ND	5
	B	3	9.1	18	NR	ND	ND	NR
	C	3	9.3	18	NR	ND	ND	NR
	ULog	A	0.48	0.96				
		B	0.48	0.96				
		C	0.48	0.97				
	Promedio	0.48	0.96	18	-	ND	NA	5
	DE (±)	0	0.006	0	-	NA	NA	NR

^aTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ^bTécnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ^cTécnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ^dTécnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Limite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ^eNMX-AA-113-SCFI-2006; ^fNMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica

5.2 Lote 2

La evaluación del Lote 2 se realizó de finales de julio y durante agosto. Nuevamente, se observó que el proceso de tratamiento cumple con las eficiencias requeridas para los cuatro parámetros evaluados establecidos en la NOM-003. Los límites máximos permisibles se cumplen en el agua tratada generada en la etapa de cosecha, así como posterior a la sedimentación. EL agua puede ser empleada en un servicio al público con contacto directo.

Es de importancia señalar que se detectó, en todos los días de estudio del tratamiento, la presencia del rotífero del género *Brachionus* sp. en manera de huevos y adultos. que, a causa de la depredación, motivo la reducción del tiempo del proceso de tratamiento para

evitar una mayor disminución de la biomasa. Para continuar con la evaluación del proceso, fue importante controlar la presencia del rotífero, mediante filtración de la biomasa en un tamiz de 50 µm de poro, y establecer medidas de prevención (Tabla 10 a la Tabla 13).

Tabla 10 Resultados microbiológicos, Lote 2.

Muestreo	Réplicas	^a Coliformes fecales (UFC/100 mL)		^b Coliformes fecales (NMP/ 100 mL)		^c SST (mg/ L)		^d Grasas y Aceites (mg/L)		^e Huevos de Helmintos (HH/ L)				^f DBO5 (mg/L)		
		Influyente	Efluyente	Influyente	Efluyente	Influyente	Efluyente	Influyente	Efluyente	Influyente	Efluyente	Influyente Día 0		Efluyente Microalga Día 0		
Día 0		Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Totales	Especies identificadas	Totales	Especies Identificadas	Influyente Día 0	Efluyente Microalgal Día 0	
01/08/2023	A	2.2x10 ⁴	2.4x10 ⁴	2.2x10 ⁴	2.4x10 ⁴	8	148	16.7	19.9	1	<i>Ascaris</i> spp.	1	<i>Ascaris</i> spp.	7	17	
	B	2.3x10 ⁴	2.3x10 ⁴	2.3x10 ⁴	2.4x10 ⁴	8	148	NR	NR	2	<i>Trichuris Trichiura</i> , <i>Ascaris</i> spp.	ND	NA	NR	NR	
	C	2.3x10 ⁴	2.4x10 ⁴	2.3x10 ⁴	2.4x10 ⁴	8	148	NR	NR	1	<i>Ascaris</i> spp.	ND	NA	NR	NR	
	ULog	A	4.3424	4.3802	4.3424	4.3802										
		B	4.3917	4.3617	4.3617	4.3802										
		C	4.3917	4.3802	4.3617	4.3802										
	Promedio	4.3617	4.374	4.3553	4.3802	8	148	-	-	1.3	NA	1	NA	7	17	
DE (±)	0.03	0.01	0.01	0	0	0	-	-	0.58	NA	0	NA	NA	NA		

^aTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ^bTécnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ^cTécnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ^dTécnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Límite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ^eNMX-AA-113-SCFI-2006; ^fNMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica

Tabla 11 Resultados microbiológicos, Lote 2 (continuación).

Muestreo	Réplicas	^a Coliformes fecales (UFC/100 mL)	^b Coliformes fecales (NMP/ 100 mL)	^c SST (mg/ L)	^d Grasas y Aceites (mg/L)	^e Huevos de Helmintos (HH/ L)		^f DBO5 (mg/L)
		Efluente Día 7	Efluente Día 7	Efluente Día 7	Efluente Día 7	Efluente Microalga Día 7		Efluente Microalgal Día 7
Día 7						Totales	Especies Identificadas	
08/08/2023								
	A	2.4X10 ²	2.6X10 ²	212	26	1	Ascaris spp.	13
	B	2.3X10 ²	2.8X10 ²	213	NR	1	<i>Hymenolepis diminuta</i>	NR
	C	2.4X10 ²	3.0X10 ²	212	NR	ND	NA	NR
	ULog	A	2.3802	2.415				
		B	2.3617	2.3617				
		C	2.3802	2.3802				
	Promedio	2.374	2.3856	212.33	-	0.67	NA	13
	DE (±)	0.01	0.03		-	0.58	NA	NA

^aTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ^bTécnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ^cTécnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ^dTécnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Límite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ^eNMX-AA-113-SCFI-2006; ^fNMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica

Tabla 12 Resultados microbiológicos, Lote 2 (continuación).

Muestreo	Réplicas	^a Coliformes fecales (UFC/100 mL)	^b Coliformes fecales	^c SST	^d Grasas y Aceites	^e Huevos de Helmintos		^f DBO5
		(NMP/ 100 mL)	(mg/ L)	(mg/ L)	(mg/L)	(HH/ L)		(mg/L)
Día 10	11/08/2023	Efluente Día 14	Efluente Día 14	Efluente Día 14	Efluente Día 14	Efluente Microalga Día 14		Efluente Microalgal Día 14
		Totales	Especies Identificadas					
	A	3	9.1	200	22.6	ND	ND	NR
	B	3	9.1	200	NR	ND	ND	NR
	C	3	9.1	200	NR	ND	ND	NR
	ULog	A	0.48	0.96				
		B	0.48	0.96				
		C	0.48	0.96				
	Promedio	0.48	0.96	200	-	ND	NA	NR
	DE (±)	0	0	0	-	NA	NA	NR

^aTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ^bTécnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ^cTécnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ^dTécnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Límite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ^eNMX-AA-113-SCFI-2006; ^fNMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica

Tabla 13 Resultados microbiológicos, Lote 2 (finaliza)

Muestreo	Réplicas	^a Coliformes fecales (UFC/100 mL)	^b Coliformes fecales (NMP/ 100 mL)	^c SST (mg/ L)	^d Grasas y Aceites (mg/L)	^e Huevos de Helmintos (HH/ L)		^f DBO5 (mg/L)
		Cosecha	Cosecha	Cosecha	Cosecha	Totales	Especies identificadas	Cosecha
Día 13	14/08/2023							
	A	9.1	15	2	17.5	ND	ND	NR
	B	9.1	15	2	NR	ND	ND	NR
	C	9.1	15	2	NR	ND	ND	NR
	ULog	A	0.96	1.18				
		B	0.96	1.18				
		C	0.96	1.18				
	Promedio	0.96	1.18	2	17.5	ND	NA	NR
	DE (±)	0	0	0	-	NA	NA	NR

^aTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ^bTécnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ^cTécnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ^dTécnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Límite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ^eNMX-AA-113-SCFI-2006; ^fNMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica

5.3 Lote 3

Esta es quizá la etapa (mes de septiembre) de mayor eficiencia, ya que todos los parámetros evaluados cumplieron con los límites máximos permisibles para cumplir con un uso de agua para servicio al público con contacto directo (CD). De la Tabla 14 a la Tabla 17 se muestran los resultados observados para cada parámetro durante los muestreos semanales del lote 3. Como observaciones se tuvo lo siguiente:

- El influente presentó huevos de Rotíferos; el calor, al estar bajo el microscopio, ocasionó que iniciaran movilidad, a pesar de esto no representaron un riesgo para la biomasa.
- El efluente de Microalgas presentó una pastilla saturada que incrementó el tiempo de lectura al microscopio.
- En los días 7 y 14 de tratamiento no se observó la presencia de huevos y/o estados adultos del género *Brachionus* spp.
- En el día 16 de tratamiento, el sedimentado (clarificado) presenta saturación de Rotíferos del género *Brachionus* sp. en diferentes estadios (adultos, huevos).
- Para el clarificado se realizaron pruebas de reactivación de CF a 24, 48 y 72 horas, en todos los casos los resultados son ND.

Tabla 14 Resultados microbiológicos, Lote 3

Muestreo	Réplicas	^a Coliformes fecales (UFC/100 mL)		^b Coliformes fecales (NMP/ 100 mL)		^c SST (mg/ L)		^d Grasas y Aceites (mg/L)		^e Huevos de Helmintos (HH/ L)				^f DBO5 (mg/L)		
		Influyente Día 0	Efluente Día 0	Influyente Día 0	Efluente Día 0	Influyente Día 0	Efluente Día 0	Influyente Día 0	Efluente Día 0	Influyente Día 0		Efluente Microalga Día 0		Influyente Día 0	Efluente Microalgal Día 0	
										Totales	Especies identificadas	Totales	Especies Identificadas			
04/09/2023	A	1.4x10 ⁶	2.3x10 ⁶	1.1x10 ⁶	2.4x10 ⁶	38	124	27.4	38.3	1	<i>Ascaris</i> spp.	1	<i>Ascaris</i> spp.	25	25	
	B	1.1x10 ⁶	2.4x10 ⁶	9.3x10 ⁵	2.4x10 ⁶	38	124	NR	NR	1	ND	ND	NA	NR	NR	
	C	9.5x10 ⁵	2.3x10 ⁶	9.1x10 ⁵	2.3x10 ⁶	38	124	NR	NR	1	ND	1	<i>Ascaris</i> spp.	NR	NR	
	ULog	A	6.1461	6.3617	6.0414	6.3802										
		B	6.0414	6.3802	5.9685	6.3802										
		C	5.9777	6.3617	5.959	6.3617										
	Promedio	6.0551	6.3679	5.9896	6.374	38	124	27.4	38.3	1	NA	0.67	NA	25	25	
	DE (±)	0.09	0.01	0.05	0.01	0	0	-	-	0	NA	0.58	NA	NA	NA	

^aTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ^bTécnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ^cTécnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ^dTécnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Límite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ^eNMX-AA-113-SCFI-2006; ^fNMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica

Tabla 15 Resultados microbiológicos, Lote 3 (continuación).

Muestreo	Réplicas		^a Coliformes fecales (UFC/100 mL)	^b Coliformes fecales (NMP/ 100 mL)	^c SST (mg/ L)	^d Grasas y Aceites (mg/L)	^e Huevos de Helmintos (HH/ L)		^f DBO5 (mg/L)
			Efluente Día 7	Efluente Día 7	Efluente Día 7	Efluente Día 7	Efluente Microalga Día 7		Efluente Microalgal Día 7
Totales	Especies Identificadas								
Día 7									
11/09/2023									
	A		1.4X10 ²	2.1X10 ²	472	33.7	ND	NA	4
	B		1.6X10 ²	2.1X10 ²	472	NR	ND	NA	NR
	C		1.4X10 ²	2.1X10 ²	472	NR	ND	NA	NR
	ULog	A	2.1461	2.3222					
		B	2.2041	2.3222					
		C	2.1461	2.3222					
	Promedio		2.1654	2.3222	472	33.7	NA	NA	4
	DE (±)		0.03	0	0	-	NA	NA	NA

^aTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ^bTécnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ^cTécnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ^dTécnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Limite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ^eNMX-AA-113-SCFI-2006; ^fNMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica

Tabla 16 Resultados microbiológicos, Lote 3 (continuación).

Muestreo	Réplicas		^a Coliformes fecales (UFC/100 mL)	^b Coliformes fecales (NMP/ 100 mL)	^c SST (mg/ L)	^d Grasas y Aceites (mg/L)	^e Huevos de Helmintos (HH/ L)		^f DBO5 (mg/L)	
Día 14 18/09/2023	Efluente Día 14		Efluente Día 14	Efluente Día 14	Efluente Día 14	Efluente Día 14	Efluente Microalga Día 14		Efluente Microalgal Día 14	
							Totales	Especies Identificadas		
	A		ND	ND	744	41.2	ND	ND	3	
	B		ND	ND	744	NR	ND	ND	NR	
	C		ND	ND	738	NR	ND	ND	NR	
	ULog	A	ND	ND						
		B	ND	ND						
		C	ND	ND						
	Promedio		NA	NA	742	41.2	NA	NA	3	
	DE (±)		NA	NA	3.5	-	NA	NA	NA	

^aTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ^bTécnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ^cTécnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ^dTécnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Límite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ^eNMX-AA-113-SCFI-2006; ^fNMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica

Tabla 17 Resultados microbiológicos, Lote 3 (finaliza).

Muestreo	Réplicas	^a Coliformes fecales (UFC/100 mL)	^b Coliformes fecales	^c SST	^d Grasas y Aceites	^e Huevos de Helmintos		^f DBO5
		(NMP/ 100 mL)	(mg/ L)	(mg/ L)	(mg/L)	(HH/ L)		(mg/L)
Día 16	Cosecha	Cosecha	Cosecha	Cosecha	Cosecha	Cosecha		Cosecha
20/09/2023						Totales	Especies identificadas	
Cosecha								
	A	ND	ND	20	28.4	ND	ND	3
	B	ND	ND	20	NR	ND	ND	NR
	C	ND	ND	20	NR	ND	ND	NR
	ULog	A	ND	ND				
		B	ND	ND				
		C	ND	ND				
	Promedio	NA	NA	20	-	NA	NA	3
	DE (±)	NA	NA	0	-	NA	NA	NR

^aTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ^bTécnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ^cTécnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ^dTécnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Límite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ^eNMX-AA-113-SCFI-2006; ^fNMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica.
Se corren pruebas de recrecimiento para CF por NMP de 24, 48 y 72 h; en todos los casos el resultado es ND.

5.4 Lote 4

Durante el presente muestreo, efectuado en el mes de octubre, debido a la combinación de condiciones ambientales (disminución de temperatura, atenuación de luz solar), así como problemas inherentes al funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, UNAM, no fue posible cumplir con los límites para un servicio al público con contacto

indirecto para ninguno de los parámetros. De la Tabla 18 a la Tabla 21 se muestran los resultados observados para cada parámetro durante los muestreos semanales del Lote 4.

Para este lote se observó lo siguiente:

- El influente presentó diversos huevos de Rotíferos, el calor, al estar bajo el microscopio, ocasionó que se activasen, no representó un riesgo para la biomasa. No se observaron estructuras del género *Brachionus* sp.
- El efluente de Microalgas presentó una pastilla saturada que incrementó el tiempo de lectura al microscopio.

Tabla 18 Resultados microbiológicos, Lote 4.

Muestreo	Réplicas	^a Coliformes fecales (UFC/100 mL)		^b Coliformes fecales (NMP/ 100 mL)		^c SST (mg/ L)		^d Grasas y Aceites (mg/L)		^e Huevos de Helmintos (HH/ L)				^f DBO ₅ (mg/L)		
		Influyente	Efluyente	Influyente	Efluyente	Influyente	Efluyente	Influyente	Efluyente	Influyente Día 0		Efluyente Microalga Día 0		Influyente Día 0	Efluyente Microalgal Día 0	
Día 0		Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Totales	Especies identificadas	Totales	Especies Identificadas			
02/10/2023	A	4.1x10 ⁵	5.1x10 ⁵	4.6x10 ⁵	4.6x10 ⁵	36	160	26.6	35	2	<i>Ascaris</i> spp. <i>Trichuris</i> sp.	1	<i>Ascaris</i> spp.	44	NR	
	B	4.5x10 ⁵	4.3x10 ⁵	4.4x10 ⁵	5.4x10 ⁵	36	160	NR	NR	1	<i>Ascaris</i> spp.	1	<i>Ascaris</i> spp.	NR	NR	
	C	5.1x10 ⁵	4.3x10 ⁵	5.1x10 ⁵	5.3x10 ⁵	36	160	NR	NR	1	<i>Ascaris</i> spp.	1	<i>Ascaris</i> spp.	NR	NR	
	ULog	A	5.6128	5.7076	5.6628											
		B	5.6532	5.6335	5.6435											5.7324
		C	5.7076	5.6335	5.7076											5.7243
	Promedio	5.6579	5.6582	5.6713	5.7065	36	160	-	-	1.33	NA	1	NA	44	NR	
	DE (±)	0.05	0.04	0.03	0.04	0	0	-	-	0.58	NA	0	NA	NA		

^aTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ^bTécnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ^cTécnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ^dTécnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Límite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ^eNMX-AA-113-SCFI-2006; ^fNMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica

Tabla 19 Resultados microbiológicos, Lote 4 (continuación).

Muestreo	Réplicas	^a Coliformes fecales (UFC/100 mL)	^b Coliformes fecales (NMP/ 100 mL)	^c SST (mg/ L)	^d Grasas y Aceites (mg/L)	^e Huevos de Helmintos (HH/ L)		^f DBO5 (mg/L)
		Efluente Día 7	Efluente Día 7	Efluente Día 7	Efluente Día 7	Efluente Microalga Día 7		Efluente Microalgal Día 7
Día 7						Totales	Especies Identificadas	
09/10/2023								
	A	3.1X10 ⁴	2.3X10 ⁴	352	39.2	ND	NA	6
	B	3.0X10 ⁴	9.1X10 ³	352	NR	ND	NA	NR
	C	2.6X10 ⁴	2.1X10 ⁴	352	NR	ND	NA	NR
	ULog	A	4.4914	4.3617				
		B	4.4771	3.959				
		C	4.4612	4.3222				
	Promedio	4.4612	4.2143	352	39.2	ND	NA	6
	DE (±)	0.04	0.22	0	-	NA	NA	NR

^aTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ^bTécnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ^cTécnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ^dTécnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Límite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ^eNMX-AA-113-SCFI-2006; ^fNMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica

Tabla 20 Resultados microbiológicos, Lote 4 (continuación).

Muestreo	Réplicas	^a Coliformes fecales (UFC/100 mL)	^b Coliformes fecales (NMP/ 100 mL)	^c SST (mg/ L)	^d Grasas y Aceites (mg/L)	^e Huevos de Helmintos (HH/ L)		^f DBO5 (mg/L)
		Efluente Día 14	Efluente Día 14	Efluente Día 14	Efluente Día 14	Efluente Microalga Día 14		Efluente Microalgal Día 14
Día 14	16/10/2023					Totales	Especies Identificadas	
		A	7.1X10 ³	7.3X10 ³	404	42	ND	ND
	B	6.3X10 ³	7.1X10 ³	404	NR	ND	ND	NR
	C	5.6X10 ³	6.8X10 ³	400	NR	ND	ND	NR
	ULog	A	3.8513	3.8633				
		B	3.7993	3.8513				
		C	3.7482	3.8325				
	Promedio	3.7996	3.849	401	42	ND	NA	3
	DE (±)	0.05	0.02	2.3	-	NA	NA	NR

^aTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ^bTécnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ^cTécnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ^dTécnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Límite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ^eNMX-AA-113-SCFI-2006; ^fNMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica

Tabla 21 Resultados microbiológicos, Lote 4 (finaliza).

Muestreo	Réplicas	^a Coliformes fecales (UFC/100 mL)	^b Coliformes fecales (NMP/ 100 mL)	^c SST (mg/ L)	^d Grasas y Aceites (mg/L)	^e Huevos de Helmintos (HH/ L)		^f DBO5 (mg/L)
						Cosecha		
Día 16	18/10/2023	Cosecha	Cosecha	Cosecha	Cosecha	Cosecha		Cosecha
18/10/2023						Totales	Especies identificadas	
Cosecha								
	A	2.3X10 ³	2.1X10 ³	32	26.3	1	<i>Ascaris</i> sp.	7
	B	2.6X10 ³	2.3X10 ³	32	NR	NR	NR	NR
	C	2.2X10 ³	2.3X10 ³	34	NR	NR	NR	NR
	ULog	A	3.3617	3.3222				
		B	3.415	3.3617				
		C	3.3424	3.3617				
	Promedio	3.373	3.3485	33	26.3	NA	NA	7
	DE (±)	0.04	0.02	1.2	-	NA	NA	NA

^aTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ^bTécnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ^cTécnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ^dTécnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Limite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ^eNMX-AA-113-SCFI-2006; ^fNMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica

5.5 Lote 5

En el mes de noviembre se efectuó el último muestreo del año. Debido a que la PTAR de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales aún se encontraba con fallas, y antes de dar inicio al proceso de tratamiento del Lote cinco, se decidió realizar una dilución de 1 a 4 del agua residual, para ajustar la cantidad de nutrientes (nitrógeno y fósforo), así como otras adecuaciones simulando así un efluente secundario. Y aunque desde un inicio se evidenció la presencia de estructuras adultas y huevos del género *Brachionus* sp., esto no

ocasionó afectaciones en el desarrollo de la biomasa de microalgas, siendo posible evidenciar que el sedimentado a los 16 días cumplió con los límites máximos permisibles para un servicio al público con contacto directo (CD).

En la Tabla 22 y hasta la Tabla 25 a la se muestran los resultados observados para cada parámetro durante los muestreos semanales del L5.

Tabla 22 Resultados microbiológicos, Lote 5.

Muestreo	Réplicas	ªColiformes fecales (UFC/100 mL)		ªColiformes fecales (NMP/ 100 mL)		ªSST (mg/ L)		ªGrasas y Aceites (mg/L)		ªHuevos de Helmintos (HH/ L)				ªDBO5 (mg/L)		
		Influyente	Efluente	Influyente	Efluente	Influyente	Efluente	Influyente	Efluente	Influyente	Efluente	Influyente Día 0		Efluente Microalga Día 0		Influyente Día 0
Día 0		Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Día 0	Totales	Especies identificadas	Totales	Especies Identificadas			
06/11/2023	A	4.3x10 ⁶	5.6x10 ⁶	4.3x10 ⁶	9.3x10 ⁶	26	128	25.8	34.6	1	<i>Ascaris</i> spp.	1	<i>Ascaris</i> spp.	44	NR	
	B	4.1x10 ⁶	6.2x10 ⁶	4.6x10 ⁶	1.1x10 ⁷	26	126	NR	NR	2	<i>Ascaris</i> spp.	1	<i>Ascaris</i> spp.	NR	NR	
	C	4.3x10 ⁶	5.8x10 ⁶	3.6x10 ⁶	9.1x10 ⁶	26	124	NR	NR	1	<i>Hymenolepis diminuta</i>	1	<i>Ascaris</i> spp.	NR	NR	
	ULog	A	6.6335	6.7482	6.6335	6.9685										
		B	6.6128	6.7924	6.6628	7.0414										
		C	6.6335	6.7634	6.5563	6.959										
	Promedio		6.6266	6.768	6.6175	6.9896	26	126	25.8	34.6	1.33	NA	1	NA	44	NA
DE (±)		0.01	0.02	0.06	0.05	0	2	-	-	0.58	NA	0	NA	NA	NA	

ªTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ¢Técnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ¤Técnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ¤Técnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Límite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ¤NMX-AA-113-SCFI-2006; ¤NMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica

Tabla 23 Resultados microbiológicos, Lote 5 (continuación).

Muestreo	Réplicas	^a Coliformes fecales (UFC/100 mL)	^b Coliformes fecales	^c SST	^d Grasas y Aceites	^e Huevos de Helmintos		^f DBO5
		(NMP/ 100 mL)	(mg/ L)	(mg/L)	(HH/ L)		(mg/L)	
Día 7	13/11/2023	Efluente Día 7	Efluente Día 7	Efluente Día 7	Efluente Día 7	Efluente Microalga Día 7		Efluente Microalgal Día 7
						Totales	Especies Identificadas	
	A	3.3x10 ²	4.6x10 ²	368	38.9	ND	NA	2
	B	3.0x10 ²	4.3x10 ²	368	NR	ND	NA	NR
	C	3.0x10 ²	4.3x10 ²	368	NR	ND	NA	NR
	ULog	A	2.5185	2.6628				
		B	2.4771	2.6335				
		C	2.5185	2.6335				
	Promedio	2.5047	2.6433	368	38.9	ND	NA	2
	DE (±)	0.02	0.02	0	-	NA	NA	NA

^aTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ^bTécnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ^cTécnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ^dTécnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Límite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ^eNMX-AA-113-SCFI-2006; ^fNMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica

Tabla 24 Resultados microbiológicos, Lote 5 (continuación).

Muestreo	Réplicas	^a Coliformes fecales (UFC/100 mL)	^b Coliformes fecales (NMP/ 100 mL)	^c SST (mg/ L)	^d Grasas y Aceites (mg/L)	^e Huevos de Helmintos (HH/ L)		^f DBO5 (mg/L)	
Día 14 20/11/2023		Efluente Día 14	Efluente Día 14	Efluente Día 14	Efluente Día 14	Efluente Microalga Día 14		Efluente Microalgal Día 14	
						Totales	Especies Identificadas		
	A	21	23	604	41.8	ND	ND	NR	
	B	23	23	604	NR	ND	ND	NR	
	C	24	23	604	NR	ND	ND	NR	
	ULog	A	1.3222	1.3617					
		B	1.3617	1.3617					
		C	1.3802	1.3617					
	Promedio	1.3547	1.3617	604	41.8	ND	NA	NA	
	DE (±)	0.03	0	0	-	NA	NA	NA	

^aTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ^bTécnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ^cTécnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ^dTécnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Limite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ^eNMX-AA-113-SCFI-2006; ^fNMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica

Tabla 25 Resultado microbiológicos, Lote 5 (finaliza).

Muestreo	Réplicas	^a Coliformes fecales (UFC/100 mL)	^b Coliformes fecales	^c SST	^d Grasas y Aceites	^e Huevos de Helmintos		^f DBO5
		(NMP/ 100 mL)	(mg/ L)	(mg/L)	(HH/ L)		(mg/L)	
Día 16	22/11/2023	Cosecha	Cosecha	Cosecha	Cosecha	Cosecha		Cosecha
Cosecha						Totales	Especies identificadas	
						A	ND	
	B	ND	ND	28	NR	NR	NR	NR
	C	ND	ND	28	NR	NR	NR	NR
	ULog	A	0	0				
		B	0	0				
		C	0	0				
	Promedio	0	0	28	27	NA	NA	NR
	DE (±)	0	0	0	-	NA	NA	NR

^aTécnica Filtro de membrana (UFC/100 mL) 9222C, D, E APHA *et al.*, 2009; NMX-AA-102-SEMARNAT-2006; ^bTécnica Tubos Múltiples o Número Más Probable (NMP/100 mL), Prueba Directa A1 9221E2, APHA *et al.*, 2009, NMX-AA-042-SCFI-2015; ^cTécnica NMX-AA-034-SCFI-2015; ^dTécnica NMX-AA-005-SCFI-2013; Método de Ensayo SM-5520-D-2012 (Límite de Cuantificación (LM) o Cantidad Mínima Cuantificable (CMC): 5.1; ^eNMX-AA-113-SCFI-2006; ^fNMX-AA-028-SCFI-2001 ; ND: No Detectado, NR: No Realizado; NA: No Aplica

Se corren pruebas de recrecimiento para CF por NMP a 24, 48 y 72 h; en todos los casos el resultado es ND

5.6 Coliformes fecales

Para el caso de las bacterias coliformes fecales o termo tolerantes, las técnicas aplicadas presentaron resultados comparables; por lo que, ambas pruebas pueden ser aplicadas para este tipo de muestras. No obstante, y debido a la baja cantidad de coliformes fecales y a la alta carga de material presente a partir en las etapas del proceso para el efluente microalgal del Día 14 y Cosecha, se recomienda correr la técnica de NMP - Prueba directa (medio A-1), NMX-AA2-42-SEMARNAT-2006, 9221E2, APHA *et al.*, 2009, para evitar interferencias que generen resultados confusos.

Durante el proceso de tratamiento haciendo uso del sistema HRAP, se pudo observar que, a excepción del Lote 4, la reducción promedio de $6.0 \text{ U Log} \pm 0.09$ a 0.00 (2.4×10^6 a No Detectado -ND), tanto por la técnica de filtro de membrana (UFC/ 100mL) y Número Más Probable (NMP/ 100mL).

Con base en tales resultados y de acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997, el efluente cumple con el criterio para Servicios al Público con Contacto Directo.

En el caso del Lote 4, el cual no cumplió con un servicio al público con Contacto Indirecto u Ocasional, como resultado de la combinación de diversos factores que complicaron la eficiencia del desarrollo del proceso de tratamiento, tales como: a) las condiciones ambientales, donde y en concordancia con Chambonniere *et al.* (2021), la disminución de la temperatura e incidencia luminosa y b) un efluente secundario no adecuadamente tratado, por fallas en la planta de tratamiento de agua de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, ocasionando la no adecuada inactivación de las bacterias indicadoras termo tolerantes.

Para solventar dicha situación y previo al Lote 5, debido a que la planta de tratamiento de la Facultad de Ciencias Políticas de la UNAM, continuaba con fallas, se corrieron pruebas de dilución del influente para poder contar con un efluente secundario y equilibrar los niveles de nutrientes, lo que permitió que la biomasa se desarrollara de forma adecuada y, por otro lado, de

alguna forma presencia de rotíferos, en el particular el del género *Brachionus* sp., no afectará el desarrollo del proceso de tratamiento y cumpliendo de manera sobrada con un efluente de Servicio al Público con Contacto Directo (CD). En la Figura 13 se observa el comportamiento del grupo de bacterias coliformes fecales aplicando la técnica de filtro de membrana vs Número Más Probable (NMP) durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético con microalgas, comprándola con la NOM-003 Servicio al Público con Contacto Indirecto u Ocasional (CI); NOM-003-SEMARNAT-1997 Servicio al Público con Contacto Directo (CD).

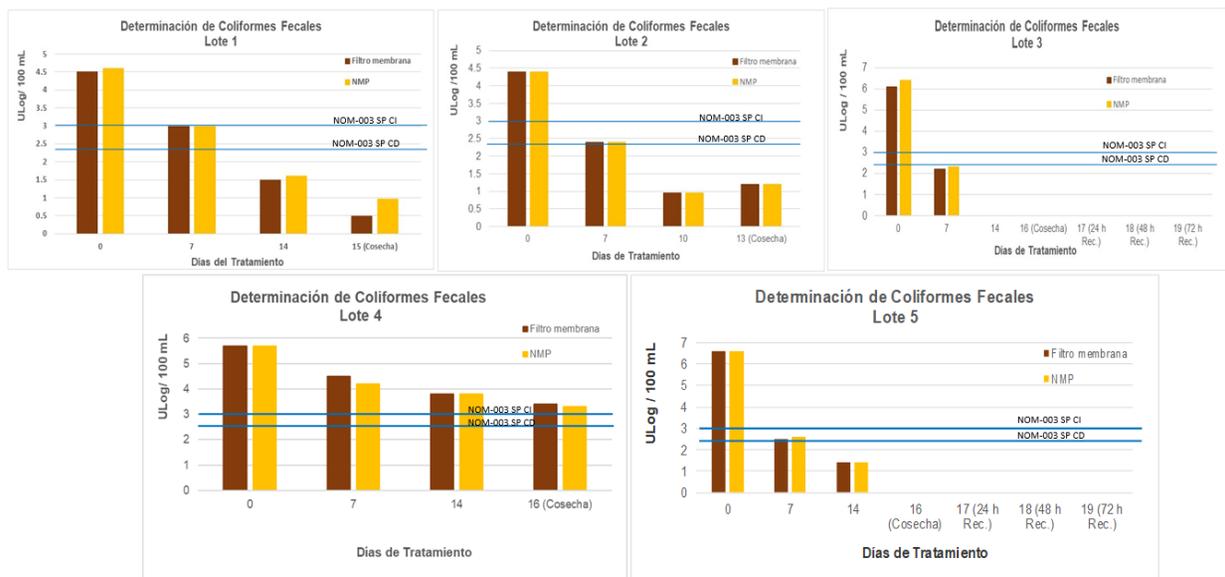


Figura 13. Determinación del grupo de bacterias Coliformes fecales aplicando la técnica de filtro de membrana vs Número Más Probable (NMP) durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético con microalgas y NOM-003-SEMARNAT-1997 Servicio al Público con Contacto Indirecto u Ocasional (CI); NOM-003-SEMARNAT-1997 Servicio al Público con Contacto Directo (CD).

5.7 Huevos de helmintos

La determinación de huevos de helmintos realizada mediante la técnica descrita se concretó satisfactoriamente, conociendo el rango de tamaño de los HH se pudo identificar y realizar los conteos por medio de barridos con microscopio de manera eficiente, obteniendo resultados favorables incluso para el influente secundario proveniente del tratamiento dado en la PTAR-FCPyS, teniendo como resultados cantidades menores a 5 HH/1 L de agua.

5.8 Sólidos suspendidos totales

La determinación de SST, en el transcurso del proceso de tratamiento, muestra un incremento de las partículas suspendidas, a partir de la siembra de la biomasa de las microalgas y hasta el día 14. Una vez que la cosecha se efectúa, una sedimentación de al menos 48 h, permite cumplir con el criterio de uso en Servicio a Público con Contacto directo. En la Figura 14 se observa la evolución del parámetro de SST durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético modelo con microalgas y comprándola con la NOM-003-SEMARNAT-1997 Servicio al Público con Contacto Indirecto u Ocasional (CI); NOM-003-SEMARNAT-1997 Servicio al Público con Contacto Directo (CD).

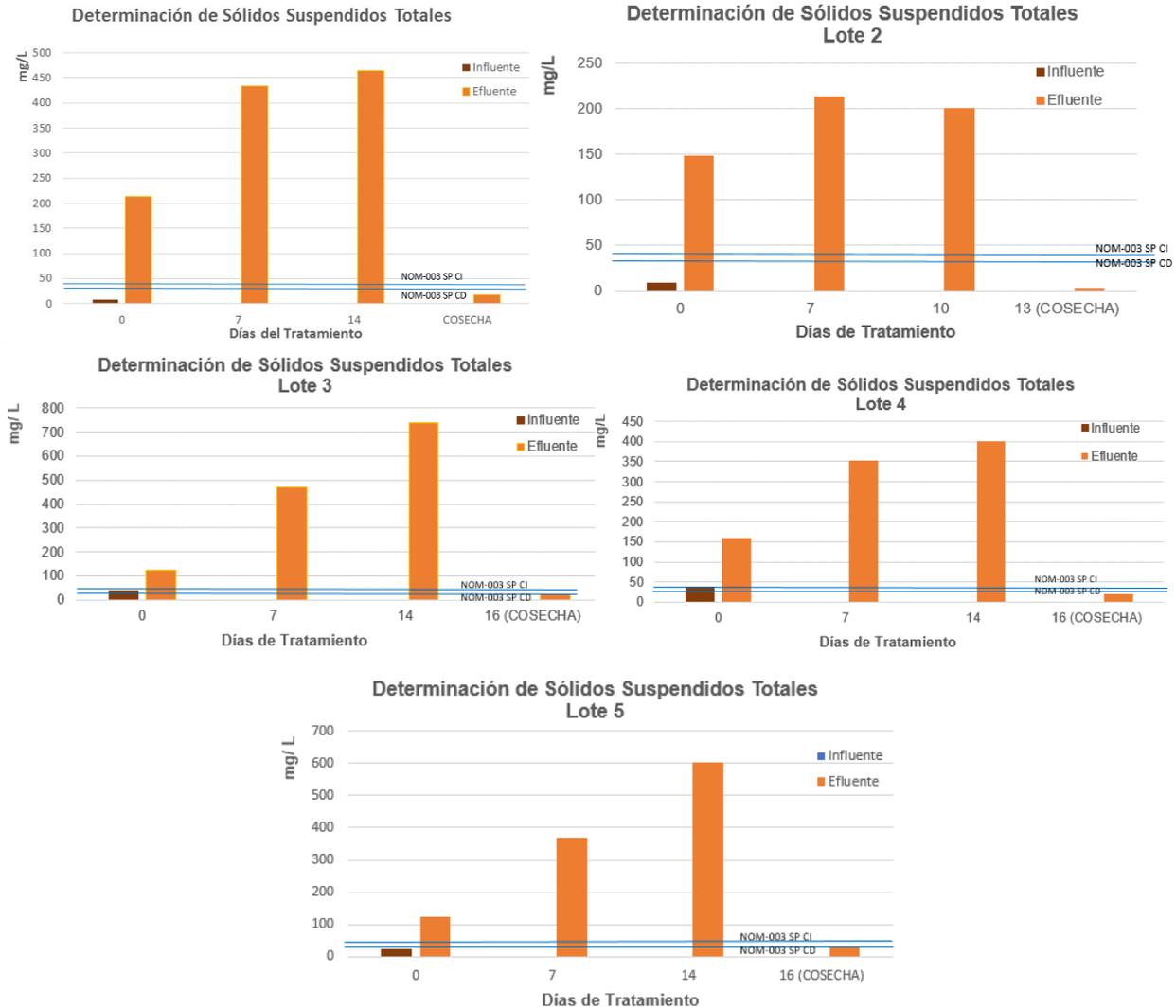


Figura 14. Determinación de la evolución del parámetro de SST durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético con microalgas. NOM-003-SEMARNAT-1997 Servicio al Público con Contacto Indirecto u Ocasional (CI); NOM-003-SEMARNAT-1997 Servicio al Público con Contacto Directo (CD).

5.9 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

En el caso de la DBO₅, para cumplir de manera satisfactoria con los límites para Servicio al Público con Contacto Indirecto u Ocasional y con Servicio al Público con Contacto Directo de acuerdo con la NOM-003-SEMARNAT-1997, los valores del efluente deben ser menores a 20 mg/L. Esto pone en evidencia la necesidad de un mayor tiempo de sedimentación para garantizar la remoción de las microalgas y que, el proceso en si no genere una interferencia en la determinación de este parámetro. Las microalgas consumen oxígeno necesario para su supervivencia por lo que su presencia aumenta el valor de DBO₅ determinado. Estos resultados podrían generar confusión al

usuario final pues la DBO_5 se relaciona de manera directa y proporcional a la presencia de bacterias y microorganismos presentes en el agua. En la Figura 15. se observa la evolución del parámetro de DBO_5 durante el proceso de tratamiento con microalgas y comparándola con la NOM-003 Servicio al público con contacto directo (CD).

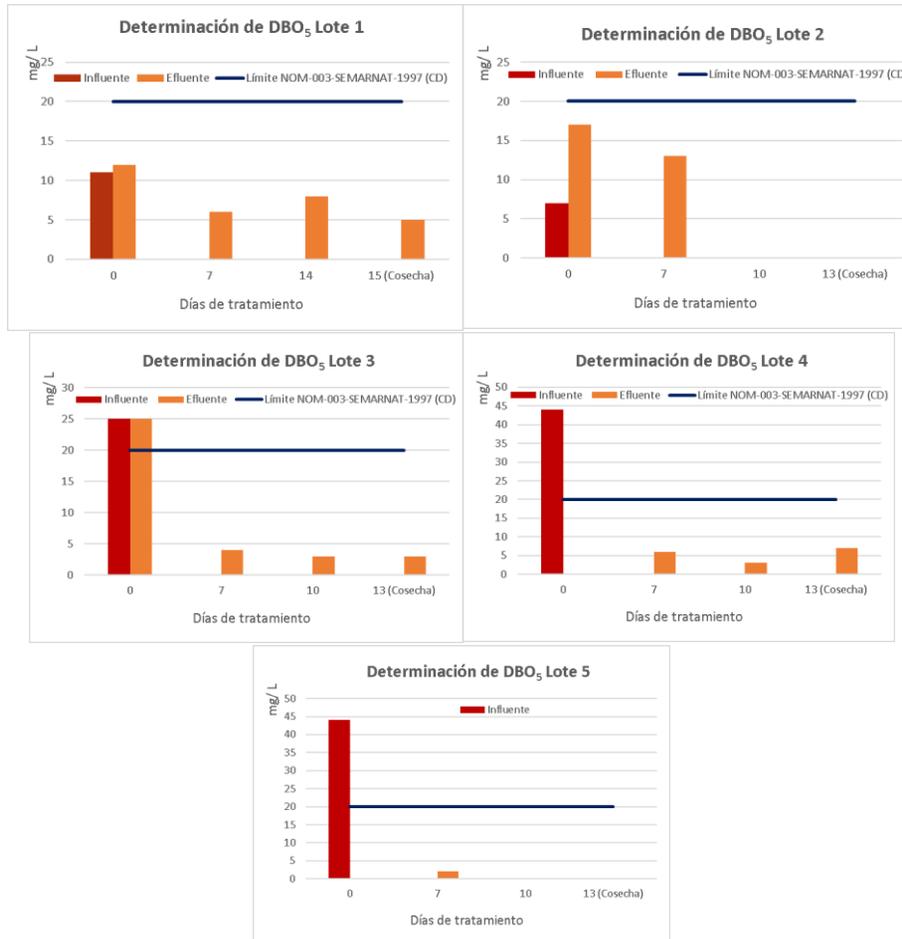


Figura 15. Determinación de la evolución del parámetro de DBO_5 durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético con microalgas. NOM-003-SEMARNAT-1997 Servicio al Público con Contacto Directo (CD)

5.10 Grasas y aceites

Para cumplir con el valor límite promedio mensual establecido en la NOM-003-SEMARNAT-1997 y cumplir con cualquier tipo de reúso público (15 mg/L), se evidenció que resulta fundamental que el tiempo de sedimentación y cosecha sea, al menos, de 48 h. En la Figura 16. se observa el comportamiento del parámetro Grasas y Aceites, durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético con microalgas, comprándola con la NOM-003-SEMARNAT-1997

Servicio al Público con Contacto Indirecto u Ocasional (CI); NOM-003-SEMARNAT-1997 Servicio al Público con Contacto Directo (CD).

Por otro lado, es importante resaltar que, la técnica de análisis, al emplear hexano como solvente, el cual disuelve no solamente las grasas y aceites minerales, sino otro tipo de sustancias como la clorofila, al emplearse organismos fotosintéticos como es el caso de las microalgas, principal componente de la eficiencia del tratamiento, ya constituye en sí una interferencia.

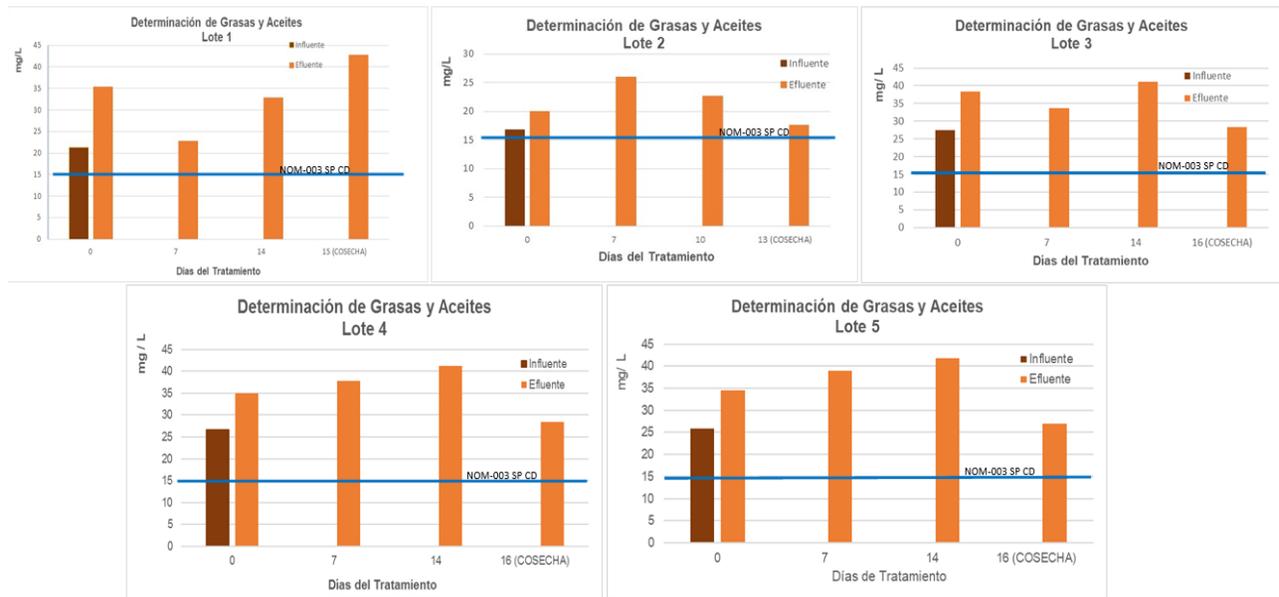


Figura 16. Determinación de Grasas y Aceites, durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético con microalgas, límites de NOM-003-SEMARNAT-1997 Servicios al público con contacto directo.

5.11 Nutrientes (N-Nitritos NO_2^- , N-Nitratos NO_3^- , Nitrógeno Amoniacal $\text{NH}_4^{+/-}$)

Se realizó la determinación de los compuestos nitrogenados en forma de nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal antes y después del tratamiento en el HRAP Concentración de. Los valores muestran una clara mejoría en cuanto concentración se refiere, mostrando que el tratamiento tiene alta eficiencia para mejorar la calidad del agua en este parámetro. Las microalgas presentan una gran capacidad para metabolizar los nitritos, además, reduciendo formas oxidativas del nitrógeno como lo son los nitratos mejora la calidad del agua, finalmente, para el caso del nitrógeno amoniacal el tratamiento reduce su concentración en el efluente.

Se observa que para el Lote 1 se obtuvieron los resultados más favorables en cuanto a la remoción de estos nutrientes, para el caso del Lote 2 es donde se nota una clara baja en la eficiencia de la remoción, incluso para el caso de los Nitratos es alarmante tener una alta concentración que incluso aumentó con el paso de los días.

Para el Lote 3 la eficacia del tratamiento aumento, siendo el segundo mejor lote en la remoción, después, en el Lote 4, la remoción de nitritos y nitratos fue nula, aunque en el caso de nitrógeno amoniacal si presentó remoción, finalmente, en el Lote 5 la efectividad del tratamiento se vio recuperada, eliminando gran cantidad de concentración, especialmente el nitrógeno amoniacal cuya remoción fue total.

De la Tabla 26 a la Tabla 30 se puede observar los valores determinados para el influente y efluente después del tratamiento con microalgas.

Tabla 26 Valores obtenidos en la determinación de Nutrientes: Lote 1, durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético con microalgas.

Tipo de muestra	^A N-Nitritos NO ₂ (mg/L)	^B N-Nitratos NO ₃ (mg/L)	^C Nitrógeno Amoniacal NH ₄ ⁺ (mg/L)
Influente día 0	29.30	93.00	40.13
Efluente microalgal día 15	8.56	0.288	0.543
^D Límite máximo permisible NOM-001-SEMARNAT-2021; Nitrógeno total. Descargas en ríos.	VI: 35; PD: 30; PM: 25.		
^A NMX-AA-099-SCFI-2006-Método de ensayo; ^B NMX-AA-079-SCFI-2001- Método de ensayo; ^C Método de ensayo SM-4500-NH ₄ ; ^D Valor límite para nitrógeno total Vigente; PM = Promedio mensual; PD = Promedio diario; VI = Valor instantáneo.			

Tabla 27 Valores obtenidos en la determinación de Nutrientes: Lote 2, durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético modelo con microalgas.

Día	^A N-Nitritos NO ₂ (mg/L)	^B N-Nitratos NO ₃ (mg/L)	^C Nitrógeno Amoniacal NH ₄ ⁺ (mg/L)
Influyente día 0	0.197	0.450	20.943
Efluente microalgal día 15	0.241	4.88	6.301
^E Límite máximo permisible NOM-001-SEMARNAT-2021; Nitrógeno total. Descargas en ríos.	VI: 35; PD: 30; PM: 25.		
^A NMX-AA-099-SCFI-2006-Método de ensayo; ^B NMX-AA-079-SCFI-2001- Método de ensayo; ^C Método de ensayo SM-4500-NH ₄ ; ^D Valor límite para nitrógeno total Vigente; PM = Promedio mensual; PD = Promedio diario; VI = Valor instantáneo.			

Tabla 28 Valores obtenidos en la determinación de Nutrientes: Lote 3, durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético modelo con microalgas.

Día	^A N-Nitritos NO ₂ (mg/L)	^B N-Nitratos NO ₃ (mg/L)	^C Nitrógeno Amoniacal NH ₄ ⁺ (mg/L)
Influyente día 0	1.1	6.30	15.90
Efluente microalgal día 15	0.1	3.5	0
^E Límite máximo permisible NOM-001-SEMARNAT-2021; Nitrógeno total. Descargas en ríos.	VI: 35; PD: 30; PM: 25.		
^A NMX-AA-099-SCFI-2006-Método de ensayo; ^B NMX-AA-079-SCFI-2001- Método de ensayo; ^C Método de ensayo SM-4500-NH ₄ ; ^D Valor límite para nitrógeno total Vigente; PM = Promedio mensual; PD = Promedio diario; VI = Valor instantáneo.			

Tabla 29 Valores obtenidos en la determinación de Nutrientes: Lote 4, durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético modelo con microalgas.

Día	^A N-Nitritos NO ₂ (mg/L)	^B N-Nitratos NO ₃ (mg/L)	^C Nitrógeno Amoniacal NH ₄ ⁺ (mg/L)
Influente día 0	0.70	9.0	89.60
Efluente microalgal día 15	8.0	390.50	25.20
^E Límite máximo permisible NOM-001-SEMARNAT-2021; Nitrógeno total. Descargas en ríos.	VI: 35; PD: 30; PM: 25.		
^A NMX-AA-099-SCFI-2006-Método de ensayo; ^B NMX-AA-079-SCFI-2001- Método de ensayo; ^C Método de ensayo SM-4500-NH ₄ ; ^D Valor límite para nitrógeno total Vigente; PM = Promedio mensual; PD = Promedio diario; VI = Valor instantáneo.			

Tabla 30 Valores obtenidos en la determinación de Nutrientes: Lote 5, durante el proceso de tratamiento aplicando un modelo cinético modelo con microalgas.

Día	^A N-Nitritos NO ₂ (mg/L)	^B N-Nitratos NO ₃ (mg/L)	^C Nitrógeno Amoniacal NH ₄ ⁺ (mg/L)
Influente día 0	0.5	15.0	98.0
Efluente microalgal día 15	0.2	1.5	0
^E Límite máximo permisible NOM-001-SEMARNAT-2021; Nitrógeno total. Descargas en ríos.	VI: 35; PD: 30; PM: 25.		
^A NMX-AA-099-SCFI-2006-Método de ensayo; ^B NMX-AA-079-SCFI-2001- Método de ensayo; ^C Método de ensayo SM-4500-NH ₄ ; ^D Valor límite para nitrógeno total Vigente; PM = Promedio mensual; PD = Promedio diario; VI = Valor instantáneo.			

Para conocer la eficiencia de la remoción de los N-nitritos, N-nitratos y Nitrógeno amoniacal se comparó con lo especificado el NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación, esto debido a que en la NOM-003-SEMARNAT- 1997, que especifica límites de los parámetros para uso de aguas residuales tratadas, no se hace mención de nutrientes en forma de nitritos, nitratos y/o nitrógeno amoniacal . De la Tabla 26 a la Tabla 30 se observa que el límite para disposición en ríos, arroyos, canales y drenes (entendiéndose que el agua proveniente de estas fuentes es para uso agrícola, uso público urbano e incluso protección

de vida acuática) es de 25 mg/L de nitrógeno total en promedio mensual, mientras que, para disposición en suelos no aplica la normativa. Bajo estos límites el efluente después del tratamiento con microalgas funciona y cumple con los límites a excepción del Lote 4 en el que se supera considerablemente el límite permisible por normativa.

5.12 Porcentajes de remoción

Para visualizar de manera más clara la eficiencia del proceso de tratamiento con microalgas se realizará la exposición de los porcentajes de remoción de los distintos parámetros determinados, el cálculo se hará de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Eficiencia de remoción} = \left(\frac{\text{Concentración 1} - \text{Concentración 2}}{\text{Concentración 1}} \right) * 100$$

Donde:

Concentración 1: concentración del influente proveniente de la PTAR-FCPyS.

Concentración 2: concentración del efluente microalgal (último día de tratamiento o cosecha).

Con esto se obtuvieron los porcentajes de remoción para cada parámetro en los diferentes lotes analizados. En la Tabla 31 se muestran los porcentajes de remoción calculados, los valores de 0% representan aquellos días en los cuales la eficiencia del proceso fue nula, la remoción de los parámetros señalados no se logró, esto debido a que la biomasa microalgal se vio disminuida por diversos factores. Los lotes con mejores resultados fueron el Lote 1 y el Lote 3, teniendo porcentajes de remoción altos en la mayoría de los parámetros evaluados, el Lote 2 por su parte mostró resultados equilibrados en gran medida, el Lote 5 consiguió alcanzar buen porcentaje de remoción en prácticamente todos los parámetros sin embargo, no hubo remoción en SST ni GyA, este último siendo el parámetro que menos se logró remover en buena parte por el principio del método de remoción el cual puede dar resultados particulares por la interferencia de sustancias como la clorofila, el Lote 4 fue el que menor desempeño mostró, la cantidad de coliformes fecales se removió sólo en 2 ULog y en nutrientes, los nitritos y nitratos no disminuyeron su concentración.

Tabla 31 Eficiencia de remoción por parámetro y lote.

Lote	Coliformes fecales* Técnica filtro de membrana (ULog)	Coliformes fecales* Técnica de NMP (ULog)	SST (mg/ L)	Grasas y Aceites (mg/L)	Huevos de Helmintos (HH/ L)	DBO ₅ (mg/L)	Nitritos (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Nitrógeno amoniacal (mg/L)
Lote 1	4.0300	3.5600	0 %	14 %	100 %	54 %	59 %	99 %	98 %
Lote 2	3.4017	3.1753	75 %	0 %	100 %	0 %**	59 %	0 %	69 %
Lote 3	6.0551	5.9896	47 %	0 %	100 %	88 %	90 %	44 %	100 %
Lote 4	2.2849	2.3228	8 %	1 %	100 %	84 %	0 %	0 %	71 %
Lote 5	6.6266	6.6175	0 %	0 %	100 %	95 %**	60 %	90 %	69 %

* Se expresan las ULog removidas después del tratamiento.
 ** Se realizó la comparación entre los valores del influente y efluente del día 7

La variación de los porcentajes de remoción para cada parámetro a lo largo de los distintos muestreos por lotes se puede observar de manera gráfica en la Figura 17 y la Figura 18 .

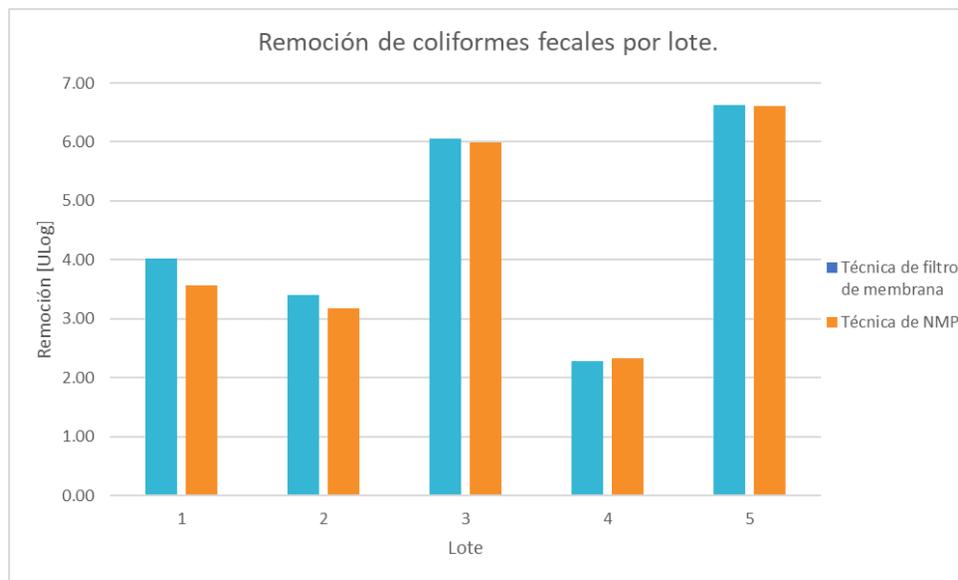


Figura 17. Remoción de coliformes fecales por Lote, en ULog.

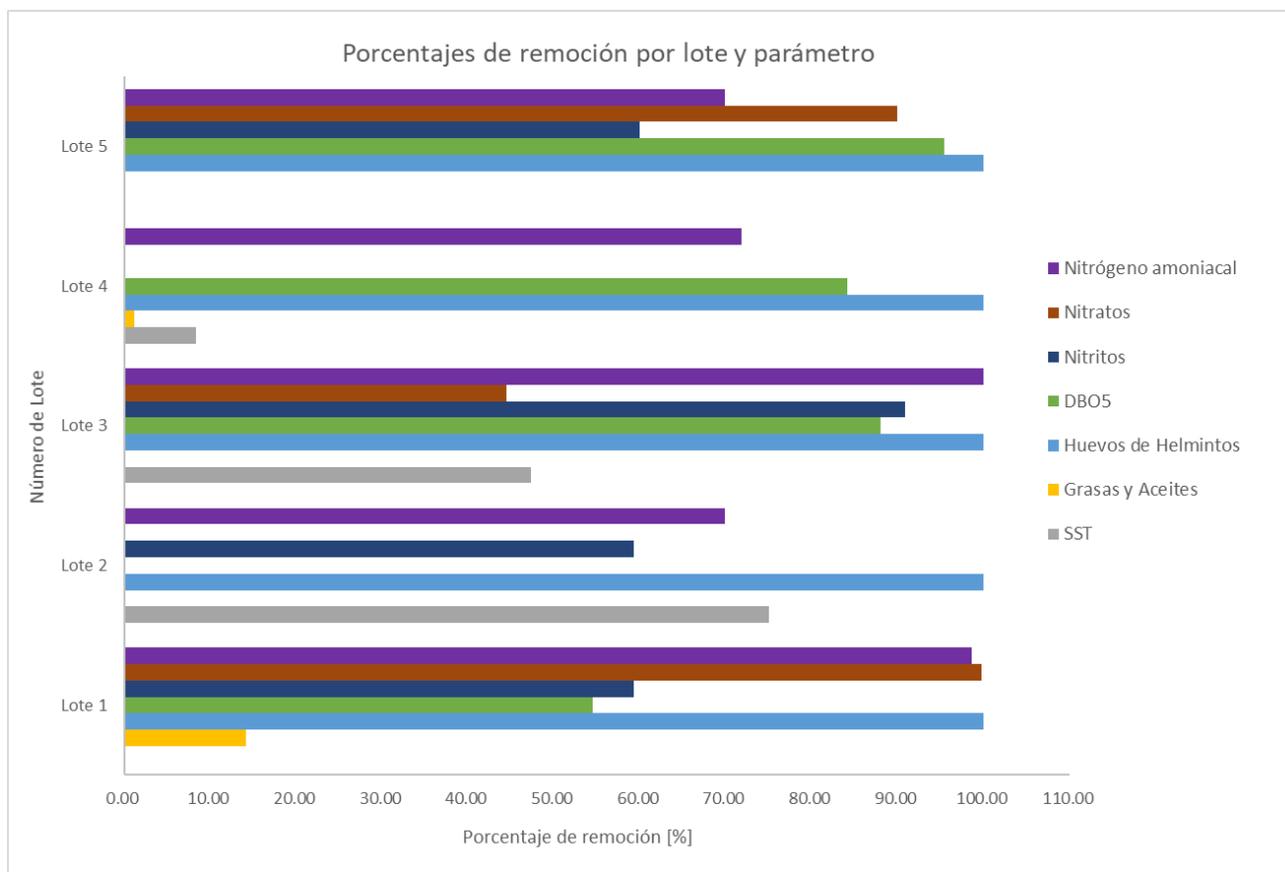


Figura 18. Porcentajes de remoción por Lote y parámetro.

5.13 Presencia de Protozoo de género *Brachionus* sp

Como se mencionó, en el Lote 2, a partir del día 14, se observó una disminución en la cosecha de biomasa algal, posteriormente durante la determinación de huevos de helmintos se observó en la lectura al microscopio una saturación de huevos y adultos de protozoos que se pudieron identificar como pertenecientes al género *Brachionus plicatilis*, lo que motivó adelantar la fecha de término del tratamiento y; por ende, la cosecha. Debido a que estos rotíferos consumen las microalgas, se procedió entonces a implementar acciones para su eliminación y salvaguardar la biomasa. Dicha situación explica, para la etapa de la cosecha, la menor concentración observada de SST y Grasas y Aceites, pero mayor de coliformes fecales, en relación con el muestreo previo. Sin embargo, y a pesar de la menor calidad del efluente su uso sigue siendo aceptable para servicio público con contacto directo de acuerdo con la norma respectiva.

- Rotíferos

El *Phylum Rotífera* agrupa invertebrados microscópicos, planctónicos, no segmentados y de simetría bilateral que viven en ambientes acuáticos o semi-acuáticos. Presentan tres características anatómicas particulares: una corona ciliada en la región anterior, y que sirve para la locomoción, el mástax o faringe muscular que posee un juego complejo de mandíbulas duras, y la lórica, que es la pared del cuerpo o integumento.

De acuerdo con Margalef (1955), Pejler (1974, 1977) y Bérzins (1960), como se citó en Carmona Navarro (1992):” La especie *Brachionus plicatilis* es un rotífero que, aunque habita preferentemente en ambientes atalasoalinos de elevada alcalinidad. Se ha encontrado en todas las regiones biogeográficas, excepto la Antártida, y siendo más frecuente en aguas subtropicales. Su distribución cosmopolita sugiere un mecanismo eficiente de dispersión” p.12.

El cuerpo de *B. plicatilis* se compone de una breve región anterior o cabeza, un tronco largo, y un apéndice posterior llamado pie terminal. La cabeza lleva la corona u órgano rotatorio con función locomotora y de captura de alimento. Mediante la acción de un músculo retractor, la cabeza puede invaginarse en el tronco, el cual se encuentra protegido por un caparazón escleroproteínico o lórica, formado por dos placas, una dorsal y otra ventral que se encuentran soldadas lateralmente. Por su parte, el pie, que es anillado, se puede retraer telescópicamente en el interior del tronco. Su forma es alargada y termina en dos prolongaciones (dedos), en cada una de las cuales hay una glándula que secreta una sustancia cementante, para que el rotífero se fije temporalmente al sustrato (Carmona Navarro, 1992).

Rehberg-Haas *et al.* señalaron en el año 2015 que:

La especie, conformada principalmente por hembras, presenta una alternancia de períodos de reproducción asexual, en ausencia de machos, por medio de partenogénesis (reproducción amíctica), en la que las hembras producen clones (copias genéticamente

idénticas a sí mismas), y una reproducción sexual (reproducción míctica), donde un huevo míctico, si no es fecundado se desarrolla partenogenéticamente en macho, pero al ser fecundado, secreta un cascarón grueso y resistente, formando un huevo latente o “quiste”, capaz de soportar la deshidratación y otras condiciones adversas. El huevo no eclosiona durante varios meses o incluso años (Rehberg-Haas *et al.*, 2015).

Por su función trófica, *B. plicatilis*, es un organismo filtrador que se alimenta de partículas cuyo tamaño oscila entre 2 y 28 μm ., y sirve de alimento de diversos organismos; como, por ejemplo, larvas de peces, crustáceos (Rehberg-Haas *et al.*, 2015). Su tamaño va de 125 a 300 μm , puede ser cultivado en densidades elevadas (hasta 2,000 individuos/mL), su tasa reproductiva y contenido nutricional son altos (Odo *et al.*, 2015). *B. plicatilis* se alimenta de microalgas. Su lapso de vida, así como su capacidad reproductiva, dependen de la temperatura. A 25 °C, el período de vida es de 3.4 a 4.4 días, llegando a su estado adulto entre los 0.5 a 1.5 días. Las hembras ponen huevos cada cuatro horas y pueden producir 10 generaciones de progenie antes de su muerte.

Como lo describía Koste (1980, como se citó por Carmona Navarro, 1992: “El dimorfismo sexual en *B. plicatilis* es notable. El macho es un organismo efímero, de dimensiones reducidas (su longitud va entre un tercio y un cuarto de la longitud de la hembra) y su organización es más simplificada. La Figura 19 muestra las formas adultas (hembra y macho) y huevos característicos del género *Brachionus plicatilis*” pp.18-19.

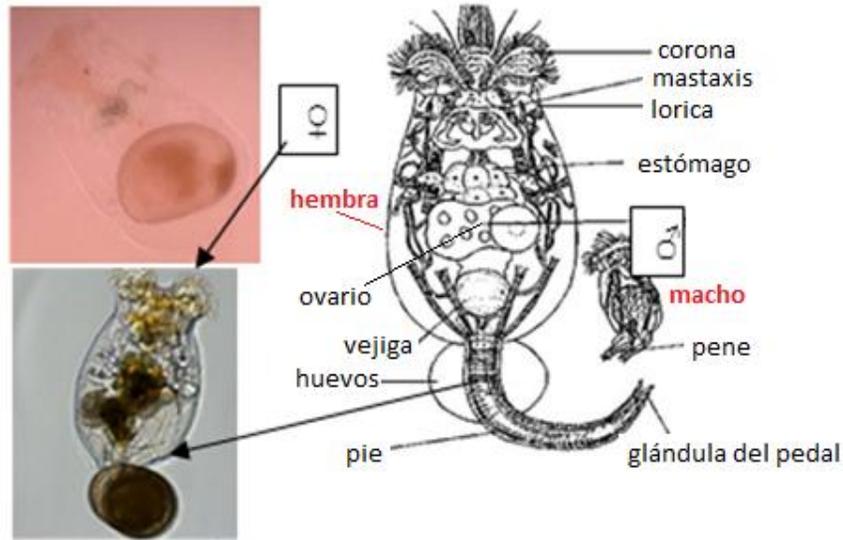


Figura 19. Formas adultas (hembra y macho) y huevos característicos del género *Brachionus plicatilis*. (Adaptado de Carmona Navarro, 1992).

Los resultados obtenidos indican que el tratamiento de aguas residuales empleando microalgas en un HRAP cumplen con los parámetros indicados en la NOM-003-SEMARNAT-1997 bajo ciertas condiciones de operación y ambientales, con una buena incidencia de luz sobre el HRAP y una temperatura cálida, que favorezcan el crecimiento microalgal. El tratamiento mostró una evidente remoción de los parámetros determinados. Los coliformes fecales se removieron hasta en más de 6 ULog (para los Lotes 3 y 5) además, en parámetros como Nitrógeno y Fósforo el tratamiento es muy eficiente cuando las condiciones son las adecuadas, obteniendo concentraciones por debajo de los límites permisibles por norma. En el caso de SST y Grasas y Aceites se tienen resultados que superan los límites de la NOM-003-SEMARNAT-1997 pero esto no significa que el tratamiento no cumpla para dichos parámetros. Las técnicas para determinar dichos parámetros presentaron interferencias propios del tratamiento con microalgas: los filtros para la determinación de SST se vieron colmados por biomasa microalgal, que significa un resultado confuso por tener un valor alto que supera el límite establecido en la norma; en términos de Grasas y Aceites la presencia de biomasa en el efluente a analizar se vuelve una interferencia

al ser estas materia orgánica no soluble, en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater se menciona: “Algunos compuestos orgánicos no grasos pueden ser extraídos por el solvente y contribuir al peso final, Se recomienda usar solventes específicos como hexano o éter de petróleo para minimizar el problema”.

Debido a que los solventes empleados son no polares, llegan a extraer cualquier compuesto hidrofóbico o poco polar de la muestra, además de las grasas y aceites el hexano puede llegar a extraer hidrocarburos alifáticos y aromáticos, residuos de plaguicidas, sustancias fúlvicas y húmicas provenientes de materia orgánica en descomposición, proteínas o carbohidratos.

La presencia de materia orgánica soluble o suspendida puede estabilizar emulsiones, dificultando la separación de fases durante la extracción con solvente y reduciendo la capacidad de los métodos analíticos para distinguir entre compuestos orgánicos no grasos y los verdaderos contaminantes, es decir, las grasas y los aceites reales (Thobanoglous *et al.*, 2013).

Con lo anterior se puede decir que el tratamiento con microalgas funciona y cumple con los límites permisibles de la NOM-003-SEMARNAT-1997 para agua residual tratada que sea reutilizada en servicios al público con contacto directo, siempre que las condiciones de operación sean las adecuadas, se mantenga un monitoreo de organismos competidores que signifiquen una amenaza al consorcio microalgal y se garantice la remoción de biomasa microalgal al finalizar el tratamiento para evitar así interferencias en las determinaciones de los parámetros analizados.

CONCLUSIONES

6 Conclusiones

El tratamiento de aguas residuales mediante el uso de un sistema HRAP es una opción eficiente y sostenible, capaz de cumplir con los límites establecidos por la NOM-003-SEMARNAT-1997, normativa fundamental para asegurar la calidad del agua residual tratada para uso en servicios al público, especialmente en este contexto se busca que la misma sea para usos con contacto directo con el público.

Se encontró que la eficiencia de este proceso depende de una implementación adecuada de varias condiciones clave:

- Un proceso previo de tratamiento primario y secundario eficiente:

Se observó que durante la operación del sistema de tratamiento con microalgas la eficiencia de remoción de los distintos parámetros evaluados fue variable a través del tiempo, para los lotes en donde el funcionamiento de la PTAR-FCPyS fue adecuado o al menos aceptable, los resultados del efluente final (después del tratamiento con microalgas) eran excepcionales, disminuyendo considerablemente la concentración de los parámetros evaluados, cumpliendo con los límites establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997. Además, para los lotes en los que el efluente secundario proveniente de la PTAR-FCPyS no poseía la calidad esperada para lo que debería considerarse un efluente secundario, el tratamiento con microalgas logro disminuir en gran medida la concentración de los parámetros a pesar de que se tuviera una mayor concentración a la esperada al ingresar al HRAP. Con esto se abre la posibilidad de que el tratamiento terciario con microalgas pueda incluso ser considerado como tratamiento único de aguas residuales en lugares dónde fuera posible implementar los tratamientos previos.

- Adecuada concentración de Nutrientes:

La adecuada concentración de nutrientes en el efluente secundario es crucial para fomentar el crecimiento óptimo de la biomasa microalgal. Nutrientes como nitrógeno en sus formas de N-

nitritos, N-nitratos y Nitrógeno Amoniacal deben estar presentes en cantidades que favorezcan a las microalgas, evitando la competencia con otros microorganismos que, podrían afectar su desarrollo, como es el caso de las bacterias. Esto implica un diseño cuidadoso del sistema de tratamiento que asegure una carga nutritiva balanceada a la entrada del sistema HRAP.

- Control de Microorganismos Competidores:

El control de organismos indeseables, como lo fue el rotífero *Brachionus* sp. es fundamental. La proliferación de estos microorganismos puede disminuir la biomasa de microalgas, afectando de gran manera la eficiencia del tratamiento. Por ello, es necesario implementar estrategias de manejo, como el control biológico o físico, para mantener el equilibrio en el ecosistema dentro del sistema de tratamiento HRAP.

- Tiempo de Sedimentación:

Un tiempo de sedimentación de al menos 48 horas es esencial para garantizar una cosecha eficiente de la biomasa microalgal. Este tiempo permite que las microalgas y otras estructuras se asienten adecuadamente en el fondo del sedimentador por gravedad, lo que resulta en una reducción de los sólidos suspendidos en el efluente tratado. La sedimentación, también, ayuda a demostrar el cumplimiento con parámetros críticos de la norma como son la concentración de SST y GYA que, debido a que una alta concentración de biomasa microalgal en el agua tratada es una interferencia para la medición de dichos parámetros, al significar una interferencia considerable en los resultados finales. Por un lado, para GyA, la clorofila presente en las microalgas reacciona con los reactivos y produce resultados confusos, y por otro lado, cuando las microalgas no son removidas en su totalidad del efluente final, se tiene un agua que sobrepasa el estándar de SST y difícilmente cumpliendo con los límites establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1997.

- Monitoreo de Condiciones Ambientales:

Las condiciones ambientales, como la temperatura y la intensidad luminosa, juegan un papel fundamental en el crecimiento de las microalgas. Mantener un monitoreo constante de estos parámetros permite realizar ajustes en tiempo real, asegurando un entorno óptimo para la biomasa microalgal. Esto puede incluir la regulación de la temperatura en sistemas cerrados o la gestión de la exposición a la luz en sistemas abiertos. Se pudo observar durante la época de julio a agosto cuando los picos de temperatura rondaron los 30 °C e incluso superiores, la evaporación de agua en el tanque HRAP fue de 2 L/día, lo que significó una disminución del efluente tratado en cantidad. Además, las variaciones de intensidad lumínica afectan de manera directa el crecimiento del consorcio microalgal, una baja exposición a la luz solar no es suficiente para el crecimiento de biomasa necesario para el cumplimiento del proceso de tratamiento.

RECOMENDACIONES

7 Recomendaciones

Para maximizar la eficiencia del proceso por medio del sistema HRAP se recomienda las siguientes acciones:

- Manejo de rotíferos, en particular el protozoo *Brachionus* sp.:

Para asegurar que la biomasa de microalgas no se vea afectada es crucial implementar estrategias efectivas para controlar la proliferación de rotíferos que son depredadores de microalgas. Esto podría incluir el uso de métodos biológicos, como la introducción de depredadores naturales que regulen la población de rotíferos. También se pueden emplear métodos físicos, como la filtración que sólo permita el paso de las microalgas y evite el paso de rotíferos. Además, crear un ambiente que favorezca el crecimiento de microalgas en lugar del de los rotíferos, ajustando parámetros como la temperatura y la composición del medio, puede ser beneficioso para mantener una alta producción de biomasa y con ello aumentar la eficiencia del tratamiento.

- Establecimiento de un tiempo de sedimentación de al menos 48 horas:

Para garantizar una sedimentación efectiva, es recomendable diseñar el sistema de tratamiento de tal manera que permita un tiempo suficiente para que las microalgas se depositen adecuadamente. Esto puede incluir la optimización de la forma y el tamaño del tanque de sedimentación, asegurando que el flujo del efluente no interrumpa el asentamiento de las algas. Además, se podría considerar la utilización de tecnologías avanzadas, como separadores centrífugos, para acelerar el proceso de cosecha y mejorar la eficiencia general. Pero ello, puede generar un costo adicional, mismo puede resultar rentable y favorable a largo plazo.

- Implementación de un proceso adicional de filtración:

Las microalgas al no ser retiradas en su totalidad generan interferencias en la determinación de parámetros como SST y GyA. La implementación del filtrado garantizaría un efluente de mayor calidad, al remover los restos de microalgas presentes en el agua. Con esto se obtendrían mejores resultados referentes a lo que en concentración de dichos parámetros, eliminando las interferencias generadas por el tratamiento propio. Además, el efluente al presentar una apariencia clarificada es mejor valorado por los usuarios.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

8 Referencias bibliográficas

- ❖ Abalde, J., Cid, A., Fidalgo Paredes, P., Torres, E., Herrero, C. (1995) *Microalgas: cultivo y aplicaciones*. A Coruña: Universidade, Servizo de Publicacións. ISBN: 978-84-97497-69-5 <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497695>
- ❖ Acien, F.G., Fernández-Sevilla J.M., Molina-Grima, E. (2017) *Microalgae: the basis of making sustainability*. In: *Case study of innovative projects – successful real cases*. <https://doi.org/10.5772/67930>.
- ❖ Adav S.S., Lee D.J., Show K.Y., Tay J.H. (2008) Aerobic granular sludge: recent advances. *Biotechnol Adv.*, **26**:411–23
- ❖ Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos. (2024). Contaminación por nutrientes. <https://espanol.epa.gov/espanol/contaminacion-por-nutrientes>
- ❖ Al-Gheethi A.A., Mohamed R.M., Jais N.M., Efaq A.N., Halid A.A., Wurochekke A.A., Amir-Hashim M.K. (2017) Influence of pathogenic bacterial activity on growth of *Scenedesmus* sp. and removal of nutrients from public market wastewater. *J Water Health.*, **15**:741–56.
- ❖ Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and drainage paper No. 56). FAO.
- ❖ APHA. (2009). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. America Public Health Association, APHA-AWWAWPCF (Eds.), Pennsylvania, Washington.
- ❖ Asano, T., Burton, F. L., Leverenz, H. L., Tsuchihashi, R., & Tchobanoglous, G. (2007) *Water reuse: Issues, technologies, and applications*. McGraw-Hill.
- ❖ Ayres, R., (1989) *Enumeration of Parasitic Helminthes in raw treated wastewater*. Leeds University Department of Civil Engineering. A contribution to the International Drinking Water Supply and Sanitation Decade 1981-1990.

- ❖ Becker, E.W. and Venkataraman, L.V. (1982) Biotechnology and exploitation of algae. The Indian approach, Deutsche Ges. techn. Zusammenarbeit (GTZ), GmbH Eschborn, Fedl. Republic Germany.
- ❖ Bedell, W. (1985) Stimulation of commercial algal biomass production by the use of geothermal water for temperature control, *Biotechnol. Bioeng.*, **27**, 1063-1066.
- ❖ Borowitzka M.A., Vitamins and fine chemicals from microalgae, in *Microalgal Biotechnology*, Borowitzka and Borowitzka (Eds), Cambridge Univ. Press, Cambridge, 153-196 (1988a).
- ❖ Borowitzka M.A., Algal media and sources of algal cultures, in *Microalgal Biotechnology*, Borowitzka and Borowitzka (Eds), Cambridge Univ. Press, Cambridge, 456-465 (1988b).
- ❖ Borowitzka M.A., Worowitzka L.J. (eds) (1988) *Micro-algal biotechnology*. Cambridge University Press, Cambridge, p 390
- ❖ Carmona Navarro, M.J. (1992). Inducción de la fase sexual y aspectos relacionados en el rotífero *Brachionus plicatilis*. Universitat de Valencia, Facultad de ciencias biológicas. España <https://core.ac.uk/download/pdf/71029781.pdf>
- ❖ Chambonniere P., Bronlund J. & Guieysse B. (2021) Pathogen removal in high-rate algae pond: state of the art and opportunities. *Journal of Applied Phycology*, **33**: 1501-1511. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02354-3>
- ❖ CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2019). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Libro 25 Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>
- ❖ Craggs R.J., Sutherland D., Campbell H. (2012) Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production. *J. Appl. Phycol.*, **24**, 329–337

- ❖ Craggs R., Park J., Heubeck S., Sutherland D. (2014) High rate algal pond systems for low-energy wastewater treatment, nutrient recovery and energy production. *N Z J Bot.* **52**:60–73
- ❖ Delgado Noboa, J. (2022). Producción de etanol anhidro a partir de la fermentación de residuos de cacao para uso como biocombustible. Universidad de Zaragoza, Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente, Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón. <https://zaguan.unizar.es/record/133204/files/TESIS-2024-092.pdf>
- ❖ De la Noüe, J., De Pauw, N. (1988) The potential of microalgal biotechnology: a review of production and uses of microalgae. *Biotech. Adv.* **6**, 725e770.
- ❖ De Pauw N. and Van Vaerenbergh E. (1983) Microalgal wastewater treatment systems: potentials and limits, in *Phytodepuration and the Employment of the Biomass Produced*, Ghetti (Ed), Centro Ric. Produz. Animali, Reggio Emilia, Italy, 211-287.
- ❖ De Pauw N., Morales J. and Persoone G. (1984) Mass culture of microalgae in aquaculture systems: progress and constraints, *Hydrobiologia*, **116/117**, 121-134.
- ❖ De Pauw N. and Persoone G. (1988) Microalgae for aquaculture, in *Microalgal Biotechnology*, Borowitzka and Borowitzka (Eds), Cambridge University Press, Cambridge, 197-221.
- ❖ De Silva, S. S., & Anderson, T. A. (1995). *Fish Nutrition in Aquaculture*. Springer. ISBN: 978-0-412-55030-0
- ❖ Dias, A. T. C., Cornelissen, J. H., & Berg, M. P. (2017). Litter for life: Assessing the multifunctional legacy of plant traits. *Journal of Ecology*, **105**(5), 1163–1168. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12763>

- ❖ Downing J.B., Bracco E., Green F.B., Ku A.Y., Lundquist T.J., Zubieta I.X., Oswald W.J. (2002) Low cost reclamation using the advanced integrated wastewater pond systems technology and reverse osmosis. *Water Sci Technol.*, **45**,117-125
- ❖ Google Maps (2024) Vista satelital: Circuito Escolar Facultad de Ciencias Politicas y Sociales UNAM.
https://www.google.com.mx/maps/place/Facultad+de+Ciencias+Pol%C3%ADticas+y+Sociales+UNAM/@19.3202422,-99.176927,17.75z/data=!4m6!3m5!1s0x85ce01312313939b:0x7a31b8a6c3201711!8m2!3d19.3186979!4d-99.1781249!16s%2Fm%2F06_v2mb?entry=ttu&q_ep=EgoyMDI1MDIyMy4xIKXMDSOJLDEwMjExNDU1SAFQAw%3D%3D
- ❖ Goldman J.C. (1979) Outdoor algal mass cultures I. Applications. *Water Res.* **13**, 1-19.
- ❖ González, L.E., Cañizares, R.O., Baena, S., (1997) Efficiency of ammonia and phosphorus removal from a Colombian agroindustrial wastewater by microalgae *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus dimorphus*. *Bioresour. Technol.* **60**, 259e262.
- ❖ Gotaas H. B., Oswald W. J. & Ludwig H. F. (1954) Photosynthetic reclamation of organic wastes. *Sci. Monthly*, **79**, 368-378.
- ❖ Hynes, H.B.N., (1971). *The Biology of Polluted Waters*. University of Toronto Press, Toronto.
- ❖ IMCO, Instituto Mexicano para la Competitividad, Situación del Agua en México (2023). <https://imco.org.mx/situacion-del-agua-en-mexico/>
- ❖ IMTA, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (s/f) Guía autodidáctica de medición de calidad del agua: Muestreo y preservación de parámetros fisicoquímicos. Recuperado de: http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1169/IMTA_074.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- ❖ INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Cuéntame (2019). Agua Potable y Drenaje. <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/dispon.aspx?tema=T>
- ❖ INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Geografía y Medio Ambiente, Agua. www.inegi.com.mx.
- ❖ Jiménez-Cisneros B.E., (2001) La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. México: Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C. Instituto de Ingeniería UNAM y FEMISCA. 67-69.
- ❖ Jiménez-Cisneros B.E., Maya-Rendón C. and Salgado-Velázquez G., (2001) The Elimination of Helminth Ova, Faecal Coliforms, *Salmonella* and Protozoan Cysts by Various Physicochemical Processes in Wastewater and Sludge. *Water Science and Technology*, **43**(12):179-182. ISSN: 0273-1223 (print), 1996-9732
- ❖ Koste W., (1980) Portrait of Rotifera: *Brachionus plicatilis*, a freshwater rotifer. *Mikrokosmos*, **69**:148-155.
- ❖ Lincoln E.P., Hall T.W. and Koopman B. (1983) Zooplankton control in mass algal cultures, *Aquaculture*, **32**, 331-337.
- ❖ Mallick, N., 2002. Biotechnological potential of immobilized algae for wastewater N, P and metal removal: a review. *BioMetals*, **15**, 377e390.
- ❖ Margalef, R. 1983 "Limnología". Omega. Barcelona, España, 1010 p. <https://doi.org/10.4319/lo.1984.29.6.1349b>
- ❖ Metcalf & Eddy, Inc. (2003). Wastewater engineering: Treatment and reuse (4th ed.). McGraw-Hill.
- ❖ Odo, G. E., Agwu, J. E., Iyaji, F. O., Madu, J. C., Ossai, N. I. and Allison, L. N. (2015). Mass production of rotifer (*Branchionus calyciflorus*) for aquaculture in south-eastern Nigeria. *International Journal of Fisheries and Aquaculture*, **7**(9), 151-159. <https://doi.org/10.5897/IJFA15.0497>

- ❖ Oswald W.J., Gotaas H.B. (1957) Photosynthesis in sewage treatment. *Trans Am Soc Civ Eng.*, **122**: 73–105.
- ❖ Oswald W. J., Gotaas H. B., Golueke C. G. & Kellen W. R. (1957) Algae in waste treatment. *Sewage ind. Wastes* **29**, 437-457
- ❖ Oswald W.J., Golueke C.G. (1960) Biological transformation of solar energy. *Adv Appl Microbiol.*, **2**, 223–262
- ❖ Oswald W.J. (1988) Micro-algae and wastewater treatment. In: Borowitzka MA, Borowitzka LJ, editors. *Micro-algal biotechnology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press; pp. 305–28
- ❖ Oswald, W.J., (1995). Ponds in the twenty first century. *Water Sci. Technol.*, **31**, 1-8.
- ❖ Park J.B.K., Craggs R.J. (2010) Wastewater treatment and algal production in high rate algal ponds with carbon dioxide addition. *Water Sci Technol.*; **61**:633–9
- ❖ Pearson H (2005) Chapter 2: Microbiology of waste stabilization ponds. Shilton, A (Ed). In *Pond Treat Technol.*, pp. 14 -43. ISBN: 1843390205.
- ❖ Persoone G., Morales J., Verlet H., and. De Pauw N. (1980) Air-lift pumps and the effect of mixing on algal growth, in *Algae Biomass*, Shelef and Soeder (Eds), Elsevier/North-Holland Biomedical Press, Amsterdam, pp. 505-522
- ❖ Rehberg-Haas, S., Meyer, S. Lippemeier, S. and Schulz, C. (2015) A comparison among different *Pavlova* sp. Products for cultivation of *Brachionus plicatilis*. *Aquaculture*, **435**: 424-30. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.10.029>
- ❖ Robinson R. E. (1980) Chemistry in the utilisation of the resources of Southern Africa. *Chem. S.A.*, **6**: 96-101.
- ❖ Richmond A. (1986a) Microalgae of economic potential, in *CRC Handbook of Microalgal Mass Culture*, Richmond (Ed), CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, pp.199-243.

- ❖ Richmond A. (1986b) Outdoor mass cultures of microalgae, in CRC Handbook of Microalgal Mass Culture, Richmond (Ed), CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, pp. 285-329
- ❖ Sánchez Angulo L., K. S. Trejo Berumen y B. O. Arredondo Vega. (2022) Importancia nutrimental de la diatomea *Odontella aurita* para su aprobación como suplemento generalmente reconocido como alimento seguro (GRAS) en México. Recursos Naturales y Sociedad, 2022. Vol. 8 (1): 15-38. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2022.08.08.01.0002>
- ❖ Sánchez Arias, G.D. (2016) Estudio de la incidencia de aceite en el análisis de nitrógeno amoniacal en el agua. Proyecto de grado. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. Facultad de ciencias. Bogotá D.C., Colombia. <https://repository.udca.edu.co/server/api/core/bitstreams/2a4c4609-97a8-49ec-a050-96044f192364/content>
- ❖ Schlütter M. and Groeneweg J. (1981) Mass production of freshwater rotifers on liquid wastes. I. The influence of some environmental factors on population growth of *Brachionus rubens*, *Aquaculture*, **25**, 17-24.
- ❖ Secretaría de Economía. (2013). NMX-AA-005-SCFI-2013. Análisis de agua- Medición de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba (cancela la NMX-AA-005-SCFI-2000). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166764/nmx-aa-005-scfi-2013.pdf>
- ❖ Secretaría de Economía (2010). NMX-AA-026-SCFI-2010. Análisis de agua - medición de nitrógeno total kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba - (cancela a la NMX-AA-026-SCFI-2001). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166772/NMX-AA-026-SCFI-2010.pdf>
- ❖ Secretaría de Economía. (2001a). NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales y

- residuales tratadas- Método de prueba (cancela la NMX-AA-028-SCFI-1981).
<http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2001/nmx-aa-028-scfi-2001.pdf>
- ❖ Secretaría de Economía. (2015a). NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua- Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba (cancela la NMX-AA-034-SCFI-2001).
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>
 - ❖ Secretaría de Economía. (2015b). NMX-AA-042-SCFI-2015. Análisis de agua- Enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli* – Método del número más probable en tubos múltiples (Cancela a la NMX-AA-42-1987).
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166147/nmx-aa-042-scfi-2015.pdf>
 - ❖ Secretaría de Economía. (2001b). NMX-AA-079-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas- Método de prueba (cancela la NMX-AA-079-1986).
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166794/NMX-AA-079-SCFI-2001.pdf>
 - ❖ Secretaría de Economía. (2021). NMX-AA-099-SCFI-2021. Análisis de agua- Medición de Nitrógeno de Nitritos en Aguas Naturales, Residuales, Residuales Tratadas y Marinas – Método de Prueba (Cancela a la NMX-AA-099-SCFI-2006).
<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD1/NMX-AA-099-SCFI-2021.pdf>
 - ❖ Secretaría de Economía. (2006). NMX-AA-102-SCFI-2006. Calidad del agua- Detección y enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* presuntiva– Método de filtración de membrana (Cancela a la NMX-AA-102-1987). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166804/NMX-AA-102-SCFI-2006.pdf>

- ❖ Secretaría de Economía. (2001). NMX-AA-115-SCFI-2001. Análisis de agua - Criterios generales para el control de la calidad de resultados analíticos. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD02/DO104.pdf>
- ❖ Secretaría de Economía. (2012). NMX-AA-113-SCFI-2012. Análisis de agua – Medición del número de huevos de helminto en aguas residuales y residuales tratadas por observación microscópica - método de prueba (cancela a la NMX-AA-113-SCFI-1999). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166809/NMX-AA-113-SCFI-2012.pdf>
- ❖ Secretaría de Economía. (2011). NMX-AA-154-SCFI-2011 Análisis de agua – Determinación de nitrógeno de nitritos en aguas naturales, residuales, residuales tratadas y marinas– método de prueba. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166831/NMX-AA-154-SCFI-2011.pdf>
- ❖ Secretaría de Gobernación (1998) Diario Oficial de la Federación. NORMA Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, Que establece los lí-mites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4893449&fecha=21/09/1998#gsc.tab=0
- ❖ Secretaría de Gobernación (2022) Diario Oficial de la Federación. NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
- ❖ Secretaría de Gobernación. Diario Oficial de la Federación. NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental. - Lodos y biosólidos. - Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003#gsc.tab=0

- ❖ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (1997). NOM-003-SEMARNAT-1997: Límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Diario Oficial de la Federación. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/311363/NOM_003_SEMARNAT.pdf
- ❖ Shelef G., Schwartz M. & Schechter H. (1973) Prediction of photosynthetic biomass production in accelerated algal-bacterial wastewater treatment systems. In *Advances in Water Pollution Research* (Edited by Jenkins S. H.), pp. 181-189. Pergamon Press, Oxford.
- ❖ Shelef G. and Soeder C.J. (1980) *Algae Biomass, Production and Use*, Elsevier/North-Holland Biomedical Press (Ed), Amsterdam. p. 852. ISBN: 0444802428
- ❖ Soeder C.J. (1980) Massive cultivation of microalgae: results and prospects, *Hydrobiologia*, **72**: 197-209.
- ❖ Toerien D.F. and Grobbelaar J.U. (1980) Algal mass cultivation experiments in South Africa, in *Algae Biomass*, Shelef and Soeder (Eds), Elsevier/North/Holland Biomedical Press (Ed), Amsterdam, pp. 73-80.
- ❖ Ukeles R., (1976) 4. Cultivation of plants, 4.1. Unicellular plants, in *Marine Ecology*, Kinne (Ed), John Wiley and Sons, London, New York, pp. 367-466.
- ❖ Vonshak A., Abeliovich A., Boussiba S., Arad S. and. Richmond A. (1982) Production of *Spirulina* biomass: effects of environmental factors and population density, *Biomass*, **2**, 175-185
- ❖ Waldichuk, M., (1985) Sewage for ocean disposal. To treat or not to treat'? *Mar. Poll. Bull.*, **16**: 41-43.
- ❖ World Health Organization (2006) *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater*. Volume 1: Policy and Regulatory Aspects 57.

9 Bibliografía

- ❖ Cho S., Luong T.T., Lee S., Oh Y., Lee T. (2011) Reuse of effluent water from a municipal wastewater plant in microalgae cultivation for biofuel production. *Biores Technol.*, **102**: 8639–8645
- ❖ Mezrioui N., Oudra B., Oufdou K., Hassani L., Loudiki M. and Darley J. (1994) Effect of micro-algae growing on wastewater batch culture on *Escherichia coli* and *Vibrio cholerae* survival. *Wat. Sci. Technol.* **30**(8): 295±302
- ❖ Graham, L. E., Graham, J. M., & Wilcox, L. W. (2009). *Algae* (2nd ed.) Benjamin Cummings
- ❖ Hernández D., Riaño B., Coca M., Solana M., Bertucco A., García-González M.C. (2016) Microalgae cultivation in high rate algal ponds using slaughterhouse wastewater for biofuel applications. *Chem Eng J.*, **285**:449–58.
- ❖ Loosanoff V.L., Hanks J.E., and Ganaros A.E. (1957) Control of certain forms of zooplankton in mass algal cultures, *Science*, **125**: 1092-1093.

GLOSARIO

10 GLOSARIO

- **Pulido:** Tratamiento físico adicional que requiere el efluente, en este caso es el filtrado, aunque podría ser un tratamiento distinto.
- **Cosecha:** Proceso de recolección de biomasa microbiana que se ha cultivado durante el proceso de tratamiento biológico. Esta biomasa puede incluir bacterias, algas o levaduras que se emplean en bioprocesos para eliminar contaminantes del agua. La cosecha puede implicar la sedimentación, el centrifugado o la filtración de la biomasa del agua trasera, para luego ser procesada o eliminada adecuadamente.
- **Evapotranspiración:** Es el proceso combinado de evaporación del agua desde la superficie del suelo y cuerpos de agua, y la transpiración de agua a través de las plantas hacia la atmósfera. Es un componente clave del ciclo hidrológico, ya que contribuye a la pérdida de agua del suelo y, en consecuencia, afecta la disponibilidad de agua para la agricultura y los recursos hídricos en general.
- **Fitoflagelados:** Son organismos unicelulares pertenecientes al grupo del fitoplancton, que combinan características tanto de plantas (fotosíntesis) como de protozoos (movilidad mediante flagelos). Son algas microscópicas con flagelos que les permite moverse en el agua y son capaces de realizar fotosíntesis, produciendo su propio alimento a partir de la luz solar. Forman una parte importante de las cadenas trófica acuáticas, sirviendo de base para la alimentación de otros organismos acuáticos y contribuyendo significativamente a la producción primaria en ecosistemas acuáticos.
- **Diatomeas:** Algas microscópicas cuyo caparazón silíceo da origen a la tierra de diatomeas cuando se precipita en el fondo del mar.
- **Maricultura larvaria:** Es una rama de la agricultura que se centra en el cultivo y la cría de organismos marinos durante sus etapas larvarias en condiciones controladas. Este tipo

de maricultura es esencial para el desarrollo sostenible de especies comerciales, como peces, moluscos y crustáceos, ya que las larvas requieren un manejo especializado debido a sus necesidades particulares de nutrientes, luz, temperatura y calidad del agua. Su éxito es clave para garantizar la producción de juveniles que luego serán cruzados hasta la madurez.

- **Consortio microalgal:** Es una comunidad o grupo de diferentes especies de microalgas que coexisten y colaboran en un entorno determinado, interactuando de manera simbiótica o competitiva. Estos consorcios pueden ser de interés en la biotecnología y el tratamiento de aguas debido a su capacidad para optimizar la producción de biomasa, eliminar contaminantes de agua mediante la bio remediación o mejorar la eficiencia en la producción de compuestos de interés comercial, como lípidos para biodiesel o proteínas. Los consorcios microalgales también se estudian en sistemas naturales para entender sus roles ecológicos.
- **Bacterias termotolerantes:** Son microorganismos que pueden crecer y reproducirse a temperaturas elevadas, aunque no necesariamente son termófilos (que prosperan en temperaturas extremas). Estas bacterias pueden sobrevivir a condiciones de calor moderado y suelen encontrarse en ambientes como aguas termales, compuestos orgánicos en descomposición, y en procesos industriales que involucran temperaturas más altas. Su capacidad para tolerar temperaturas elevadas les permite ser útiles en biotecnología, particularmente en la producción de enzimas y en la bio remediación de contaminantes.
- **Sistema tipo propela:** Se refiere a un dispositivo de agitación utilizado en procesos de tratamiento de aguas residuales y cultivos de microorganismos, que utiliza un mecanismo de propulsión similar al de una hélice o propela para mezclar líquidos. Este tipo de sistema es eficiente para homogeneizar la mezcla, facilitar el contacto entre los microorganismos

y los nutrientes, y mantener la suspensión de sólidos en el agua. En la biotecnología y la ingeniería ambiental, se emplea para optimizar procesos de tratamiento biológico y mejorar la transferencia de oxígeno en reactores biológicos.

- **Emulsiones:** Las emulsiones son sistemas coloidales formados por la mezcla de dos líquidos inmiscibles, donde uno de los líquidos (la fase dispersa) se encuentra disperso en el otro (la fase continua) en forma de gotas pequeñas. Las emulsiones se clasifican generalmente en dos tipos: emulsiones aceite en agua (O/W), donde el aceite es la fase dispersa, y emulsiones agua en aceite (W/O), donde el agua es la fase dispersa. La estabilidad de las emulsiones puede ser mejorada mediante la adición de emulsificantes, que son sustancias que reducen la tensión interfacial entre las fases y ayudan a mantener la dispersión de las gotas.
- **Hidrolizar:** Es un proceso químico en el cual un compuesto se descompone al reaccionar con agua. En términos más específicos, la hidrólisis implica la ruptura de enlaces químicos en la presencia de agua, resultando en la formación de nuevos compuestos. Este proceso es fundamental en diversas áreas, como la biología, la química orgánica y el tratamiento de aguas, donde puede ser utilizado para descomponer sustancias orgánicas complejas en componentes más simples. La hidrólisis también es un paso crucial en la digestión de nutrientes, donde los polímeros como carbohidratos, lípidos y proteínas son descompuestos en sus monómeros.
- **Inóculo:** En microbiología y biotecnología, el término "inóculo" se refiere a una cantidad pequeña de microorganismos, células o esporas que se introducen en un medio de cultivo o en un sistema de tratamiento para iniciar un proceso de crecimiento o fermentación. El inóculo puede ser utilizado para inocular cultivos en la producción de productos biotecnológicos, como enzimas, antibióticos o biocombustibles, y es un factor crítico para

el éxito del proceso, ya que influye en la velocidad de crecimiento y la productividad del cultivo.

- **Sobrenadante:** Es la porción líquida que queda en la parte superior de un sedimento después de un proceso de centrifugación, sedimentación o filtración. En microbiología y tratamiento de aguas, el sobrenadante se refiere a la fracción de un cultivo o de una muestra que contiene los nutrientes, metabolitos y microorganismos en suspensión, excluyendo los sólidos o las células sedimentadas en el fondo del recipiente. El sobrenadante puede ser analizado o tratado posteriormente, y su calidad puede ser un indicador de la eficiencia de procesos de separación y tratamiento.
- **Integumento:** El integumento es una estructura que cubre y protege a un organismo. En botánica, se refiere a las capas de células que rodean el óvulo en las plantas, formando la semilla. En zoología, el integumento puede referirse a la piel o a la cubierta externa de los animales, que incluye la epidermis, dermis y estructuras asociadas como plumas, escamas o pelo. Esta estructura tiene múltiples funciones, como protección contra agentes patógenos, regulación de la temperatura, y en algunos casos, participación en la percepción sensorial.
- **Blanco analítico o de reactivos:** Agua reactivo o matriz equivalente que no contiene, por adición deliberada, la presencia de ningún analito o sustancia por determinar, pero que contiene los mismos disolventes, reactivos y se somete al mismo procedimiento analítico que la muestra.

ANEXOS

ANEXO A. NÚMERO MÁS PROBABLE por 100 mL, USANDO TRES TUBOS (APHA et al., 1992)

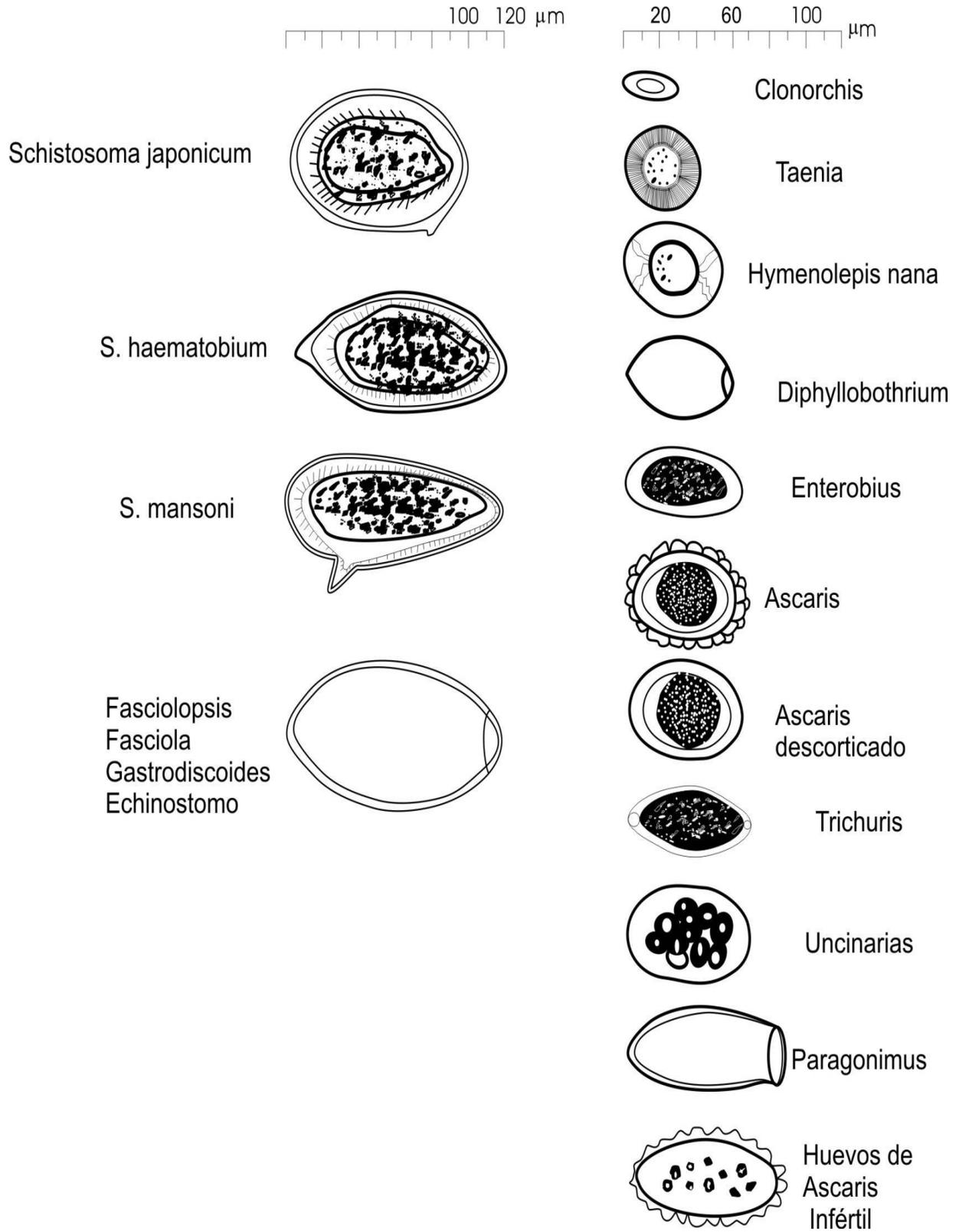
Tubos positivos			No.												
(100 mL)															
0	0	0	-3	1	0	0	3.6	2	0	0	9.1	3	0	0	23
0	0	1	3	1	0	1	7.2	2	0	1	14	3	0	1	39
0	0	2	6	1	0	2	11	2	0	2	20	3	0	2	64
0	0	3	9	1	0	3	15	2	0	3	26	3	0	3	95
0	1	0	3	1	1	0	7.3	2	1	0	15	3	1	0	43
0	1	1	6.1	1	1	1	11	2	1	1	20	3	1	1	75
0	1	2	9.2	1	1	2	15	2	1	2	27	3	1	2	120
0	1	3	12	1	1	3	19	2	1	3	34	3	1	3	160
0	2	0	6.2	1	2	0	11	2	2	0	21	3	2	0	93
0	2	1	9.3	1	2	1	15	2	2	1	28	3	2	1	150
0	2	2	12	1	2	2	20	2	2	2	35	3	2	2	210

0	2	3	16	1	2	3	24	2	2	3	42	3	2	3	290
0	3	0	9.4	1	3	0	16	2	3	0	29	3	3	0	240
0	3	1	13	1	3	1	20	2	3	1	36	3	3	1	460
0	3	2	16	1	3	2	24	2	3	2	44	3	3	2	1100
0	3	3	19	1	3	3	29	2	3	3	53	3	3	3	≥ 2400

Fuente: APHA, AWWA, WPCF,1992; NMX-AA-042/1987

$$\text{NMP} = \frac{\text{Valor de tabla} \times 10}{\text{Mayor dilución}}$$

ANEXO B. Diagramas de Huevos de Helmintos de Importancia Médica (Ayres, 1989).





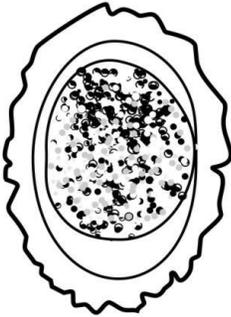
Taenia



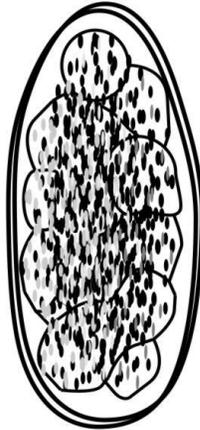
Hymenolepis nana



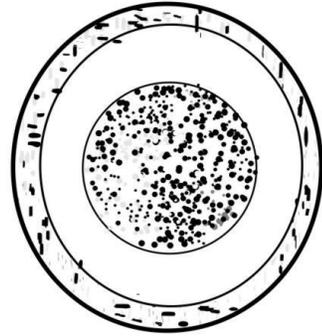
Trichuris



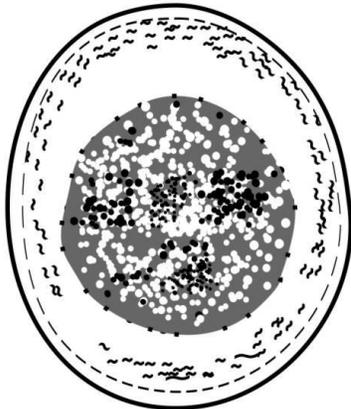
Ascaris



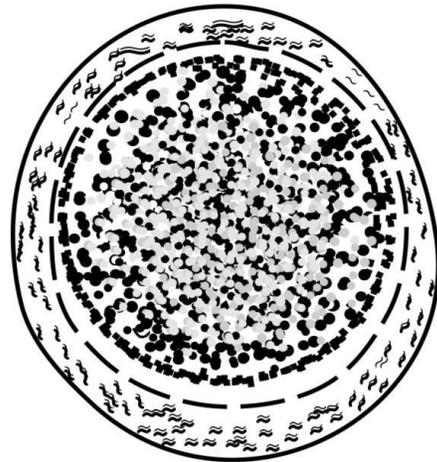
Trichostrongyle



Hymenolepis diminuta



Toxascaris



Toxocara

