



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**EVALUACIÓN DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE
CONTAMINANTES EN HUMEDALES DE TRATAMIENTO,
INTENSIFICADOS MEDIANTE RECIRCULACIÓN PARA
AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA
ALIMENTARIA**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestro en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Cesar Axel Villanueva Celestino

Asesor:

Dr. Rodolfo Cisneros Almazán

San Luis Potosí, S.L.P

Agosto 2022



AGRADECIMIENTOS

A mi amiga Magdalena Hernández Gallegos por su apoyo, contribución, asesoría y gestión durante la implementación de la obra, por siempre estar al pendiente de que ejecutara de manera correcta lo requerido en el proyecto, su disposición y acompañamiento en las visitas de muestreo, su liderazgo en el desarrollo y trato con el personal de la empresa para la rendición de cuentas y en general por haber hecho posible este proyecto.

A los ingenieros Sergio Alonso y Raúl Ramírez por su apoyo en la visitas de muestreo, en la gestión del laboratorio para contar con los reactivos necesarios para el análisis de las muestras y sus sugerencias y enseñanzas para la resolución de problemas presentados en la implementación del proyecto.

A la ingeniera Yessica Leos por su confianza, amistad, compañerismo, disposición, iniciativa incondicional de apoyo durante toda la realización del proyecto.

Al MSc. Rodolfo Cisneros Pérez por la amistad y confianza incondicional que me brindó para realizar el diseño del sistema de tratamiento, sus enseñanzas, consejos sobre la ingeniería del tratamiento de agua y la autonomía para el desarrollo del proyecto.

Al Dr. Rodolfo Cisneros Almazán por la orientación brindada sobre humedales de tratamiento, su disposición en brindarme información y siempre estar al pendiente buscando mi desarrollo académico y personal, por su enseñanza y orientación sobre la estructuración de documentos y fomentar el pensamiento crítico.

A mi papá Rogelio Daniel Villanueva Rivera por su apoyo, consejos y confianza para poder seguir creciendo tanto escolar, personal y profesionalmente.

Finalmente a los ingenieros Luis Gerarado Rangel y César Hernandez por la confianza brindada para realización, ejecución del proyecto y los resultados pudieran ser utilizados para fines de investigación.

ÍNDICE

LISTADO DE FIGURAS.....	1
LISTADO DE CUADROS.....	3
GLOSARIO DE TÉRMINOS	4
LISTADO DE ACRÓNIMOS.....	7
RESUMEN.....	8
INTRODUCCIÓN.....	9
HIPÓTESIS	12
JUSTIFICACIÓN.....	12
OBJETIVOS.....	13
1. GENERAL.....	13
2. ESPECÍFICOS.....	13
CAPÍTULO 1. EL AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA ALIMENTARIA Y SUS TRATAMIENTOS CONVENCIONALES.....	14
1.1 EFLUENTE DE LA INDUSTRIA ALIMENTARIA	14
1.2 TRATAMIENTO CONVENCIONAL DE EFLUENTES DE LA INDUSTRIA ALIMENTARIA.....	14
1.3 INDUSTRIA CÁRNICA.....	15
1.3.1 CALIDAD DE EFLUENTE INDUSTRIA CÁRNICA.....	15
1.3.2 TRATAMIENTO CONVENCIONAL EFLUENTE INDUSTRIA CÁRNICA .	16
1.4 INDUSTRIA CERVECERA	17
1.4.1 CALIDAD DE EFLUENTE INDUSTRIA CERVECERA.....	17
1.4.2 TRATAMIENTO CONVENCIONAL EFLUENTE INDUSTRIA CERVECERA.....	17
1.5 INDUSTRIA AZUCARERA	19
1.5.1 CALIDAD DE EFLUENTE INDUSTRIA AZUCARERA	19
1.5.2 TRATAMIENTO CONVENCIONAL EFLUENTE INDUSTRIA AZUCARERA	19
1.6 INDUSTRIA LÁCTEA	20
1.6.1 CALIDAD DE EFLUENTE INDUSTRIA LÁCTEA.....	20
1.6.2 TRATAMIENTO CONVENCIONAL EFLUENTE INDUSTRIA LÁCTEA.....	22
CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES DE TRATAMIENTO	24

2.1 FUNDAMENTOS	24
2.2 MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES Y PATÓGENOS.....	24
2.3 MATERIA ORGÁNICA	25
2.4 MATERIA ORGÁNICA PARTICULADA	25
2.5 MATERIA ORGÁNICA SOLUBLE	26
2.6 RESPIRACIÓN AEROBIA	26
2.7 NITRÓGENO	27
2.8 AMONIFICACIÓN	27
2.9 NITRIFICACIÓN	27
2.10 DESNITRIFICACIÓN	28
2.11 SULFATO REDUCCIÓN	28
2.12 METANOGÉNESIS	28
2.13 ASIMILACIÓN POR VEGETACIÓN	29
2.14 FÓSFORO.....	29
2.15 PATÓGENOS	29
2.16 METABOLISMO MICROBIANO	29
2.17 CLASIFICACIÓN DE LOS MICROORGANISMOS.....	30
2.18 FUENTE DE ENERGÍA Y CARBONO	30
2.14 CONDICIONES AMBIENTALES	32
2.15 CLASIFICACIÓN DE HUMEDALES DE TRATAMIENTO.....	33
2.15.1 HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL	34
2.15.2 HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.....	36
2.16 INTENSIFICACIÓN DE HUMEDALES	38
2.16.1 RECIRCULACIÓN	38
2.16.2 MEDIOS FILTRANTES ESPECÍFICOS	39
2.17 ESTADO DEL ARTE	39
2.17.1 HUMEDALES DE TRATAMIENTO	39
2.17.2 INTENSIFICACIÓN DE HUMEDALES	40
CAPÍTULO 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE HUMEDALES DE TRATAMIENTO PARA LOS EFLUENTES DE UN CASO DE ESTUDIO DE UNA INDUSTRIA ALIMENTARIA	41
3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL INFLUENTE.....	42
3.2 LOCALIZACIÓN DEL SISTEMA.....	45

3.3 DISEÑO DE SISTEMA DE TRATAMIENTO	46
3.3.1 PRETRATAMIENTO.....	46
3.3.2 TRATAMIENTO PRIMARIO	49
3.3.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO	50
3.3.4 TRATAMIENTO TERCIARIO.....	55
3.3.5 RESUMEN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO.....	56
3.4 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	57
3.4.7 MANTENIMIENTO.....	64
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL TRATAMIENTO	66
4.1 MONITOREO DEL SISTEMA.....	66
4.2 PLAN DE MUESTREO	67
4.3 PUNTOS DE MUESTREO	68
4.4 PARÁMETROS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA	69
4.5 PERIODO DE ADAPTACIÓN.....	70
4.6 ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA	71
4.6.1 PARÁMETROS IN SITU.....	71
4.6.2 PARÁMETROS MEDIDOS EN LABORATORIO.....	75
4.7 CUMPLIMIENTO DE NORMATIVA	81
4.8 COMPARACIÓN CON OTROS HUMEDALES DE TRATAMIENTO	82
CONCLUSIONES.....	83
BIBLIOGRAFÍA.....	85
ANEXOS.....	90
ANEXO 1. PLANO ARQUITECTÓNICO.....	91
ANEXO 2. PLANO CONSTRUCTIVO.....	92
ANEXO 3. PLANO GENERAL.....	93
ANEXO 4. PLANO DE INSTALACIONES.....	94
ANEXO 5. PLANO DE TERRACERÍAS.....	95

LISTADO DE FIGURAS

<i>Figura 1. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, por caudal tratado</i>	9
<i>Figura 2. Esquema pretratamiento y tratamiento fisicoquímico para industria láctea</i>	22
<i>Figura 3. Esquema de tratamiento secundario para industria láctea</i>	23
<i>Figura 4. Esquema espesamiento de lodos para industria láctea</i>	23
<i>Figura 5. Efecto de la temperatura sobre las tasas de crecimiento de los microorganismos</i>	33
<i>Figura 6. Humedal de tratamiento de flujo superficial Fuente: Arias (2017)</i>	34
<i>Figura 7. Principales procesos en los HFS Fuente: Wallace & Knight (2006)</i>	35
<i>Figura 8. Configuración de HFSS Fuente: Arias (2017)</i>	36
<i>Figura 9. Humedal de tratamiento de flujo vertical Fuente: Arias (2017)</i>	37
<i>Figura 10. Número de publicaciones recuperadas en marzo de 2017 de la Colección principal de Web of Science para los diferentes nombres de tecnologías de humedales construidos, Intervalo de tiempo 1900-2016</i>	39
<i>Figura 11. Muestreo de influente</i>	42
<i>Figura 12. Muestreo compuesto del influente</i>	43
<i>Figura 13. Preservación de las muestras</i>	44
<i>Figura 14. Ubicación del sistema de Tratamiento en Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P.</i>	45
<i>Figura 15. Izquierda: Acumulación de GyA en biodigestores actuales. La imagen de la derecha representa un biodigestor obstruido. Se necesita trampa GyA como tratamiento preliminar</i>	46
<i>Figura 16. Esquema de trampa de grasas y aceites</i>	47
<i>Figura 17. Configuración hidráulica de biodigestores primarios Rotoplas®. (1) Tubo de entrada, (2) Tubo de sedimentación y (3) tubería de salida</i>	49
<i>Figura 18. Thypa spp.</i>	52
<i>Figura 19. Representación de configuración de sustratos</i>	54
<i>Figura 20. Esquema del alimentador de cloro</i>	55
<i>Figura 21. Trazo y nivelación del terreno</i>	57
<i>Figura 22. Excavación del terreno</i>	57
<i>Figura 23. Taludes y zanja de excavación</i>	58
<i>Figura 24. Compactación del terreno</i>	59
<i>Figura 25. Colocación de tubería de entrada</i>	59
<i>Figura 26. Impermeabilización del humedal</i>	60
<i>Figura 27. Colocación de cama arena sílice, grava 3/8 y posteriormente grava 3/4</i>	61
<i>Figura 28. Sistema de distribución de tuberías</i>	62
<i>Figura 29. Siembra de vegetación</i>	63
<i>Figura 30. Limpieza de trampa de grasas y aceites</i>	64
<i>Figura 31. Purga de lodos</i>	65
<i>Figura 32. Poda de vegetación</i>	65
<i>Figura 33. Puntos de muestreo en el HT</i>	68
<i>Figura 34. Valores de temperatura a lo largo del seguimiento del HT</i>	72

Figura 35. Valores de conductividad eléctrica a lo largo del seguimiento del HT. 73

Figura 36. Valores de pH a lo largo del seguimiento del HT. 74

Figura 37. Valores de SST a lo largo del seguimiento del HT. 76

Figura 38. Cámaras 2 y 4 respectivamente de la trampa de grasas y aceites. 78

Figura 39. Valores de DQO a lo largo del seguimiento del HT. 79

Figura 40. Infuente vs Efluente. 80

Figura 41. Valores de Turbidez a lo largo del seguimiento del HT. 80

LISTADO DE CUADROS

<i>Cuadro 1. Consumo de agua dependiendo del proceso de la industria cárnica.....</i>	<i>15</i>
<i>Cuadro 2. Consumo de agua dependiendo del animal sacrificado.....</i>	<i>15</i>
<i>Cuadro 3. Parámetros habituales de agua residual de la industria cárnica.....</i>	<i>16</i>
<i>Cuadro 4. Tecnologías de tratamiento posibles de agua residual de la industria cárnica.....</i>	<i>16</i>
<i>Cuadro 5. Parámetros habituales de agua residual de la industria cervecera.....</i>	<i>17</i>
<i>Cuadro 6. Casos de estudio de tratamiento de efluentes de la industria cervecera.....</i>	<i>18</i>
<i>Cuadro 7. Parámetros habituales de agua residual de la industria azucarera.....</i>	<i>19</i>
<i>Cuadro 8. Tecnologías de tratamiento posibles de agua residual de la industria azucarera.....</i>	<i>19</i>
<i>Cuadro 9. Volumen de agua consumida y producida por producto lácteo.....</i>	<i>20</i>
<i>Cuadro 10. Parámetros habituales de agua residual de la industria láctea.....</i>	<i>21</i>
<i>Cuadro 11. Principales mecanismos de remoción en humedales de tratamiento.....</i>	<i>25</i>
<i>Cuadro 12. Principales reacciones en los humedales de tratamiento.....</i>	<i>26</i>
<i>Cuadro 13. Clasificación trófica de los microorganismos.....</i>	<i>31</i>
<i>Cuadro 14. Clasificación de microorganismos dependiendo de los requerimientos de oxígeno.....</i>	<i>32</i>
<i>Cuadro 15. Datos de muestreo compuesto.....</i>	<i>42</i>
<i>Cuadro 16. Resultados de caracterización físicoquímica de efluente de industria alimentaria.....</i>	<i>43</i>
<i>Cuadro 17. Consideraciones para el diseño de trampas de grasas y aceites.....</i>	<i>47</i>
<i>Cuadro 18. Resultados del dimensionamiento de trampa de grasas y aceites.....</i>	<i>48</i>
<i>Cuadro 19. Capacidad de biodigestores para cada corriente del influente.....</i>	<i>49</i>
<i>Cuadro 20. Métodos y consideraciones para el dimensionamiento de humedales.....</i>	<i>50</i>
<i>Cuadro 21. Ficha técnica de humedal de tratamiento.....</i>	<i>51</i>
<i>Cuadro 22. Ficha técnica <i>Thypha spp.</i>.....</i>	<i>53</i>
<i>Cuadro 23. Configuración de sustratos humedal de tratamiento.....</i>	<i>54</i>
<i>Cuadro 24. Resumen del sistema de tratamiento.....</i>	<i>56</i>
<i>Cuadro 25. Mantenimiento del sistema de tratamiento.....</i>	<i>64</i>
<i>Cuadro 26. Plan de muestreo.....</i>	<i>67</i>
<i>Cuadro 27. Parámetros a evaluar dependiendo de la etapa del proyecto.....</i>	<i>69</i>
<i>Cuadro 28. Valores promedio (\pm desviación estándar) de parámetros medidos in situ.....</i>	<i>71</i>
<i>Cuadro 29. Valores promedio (\pm desviación estándar) de parámetros medidos en laboratorio.....</i>	<i>75</i>
<i>Cuadro 30. Comparación de resultados con respecto a la NOM-001-SEMARNAT-2021 Uso en Riego.....</i>	<i>81</i>
<i>Cuadro 31. Comparativo trabajo de tesis con otros humedales de tratamiento.....</i>	<i>82</i>

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Aguas residuales:	Aguas usadas descargadas de hogares, negocios, ciudades, industria y agricultura.
Análisis de balance de masas:	Contabilidad de la masa dentro de un límite definido antes y después de que hayan tenido lugar las reacciones y conversiones.
Calidad del agua:	Clases generales de constituyentes de aguas residuales tales como parámetros físicos, químicos y biológicos.
Coliformes fecales (CF):	Subgrupo termotolerante del grupo de coliformes totales que se encuentra en el tracto intestinal de humanos y animales de sangre caliente,
Concentración inicial (C_0):	Concentración de entrada de cualquier parámetro que contenga una muestra.
Concentración final (C_f):	Concentración final después de un proceso de tratamiento unitario.
Contaminación:	Se dice cuando un sistema no tiene la calidad suficiente en cuanto a algún parámetro para lo que su propósito inicial.
Huevos de Helminto:	Un grupo de gusanos parásitos; en todo el mundo, los helmintos son uno de los principales agentes causantes de enfermedades humanas.
Huella de carbono:	Índice ambiental que mide el impacto ambiental de un proceso en términos de carbono (CO_2) liberado a la atmósfera.
Huella superficial:	Índice ambiental que mide el impacto suelo superficial de un proceso, estandarizado en una medida unitaria.
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5):	Es la cantidad de oxígeno que los microorganismos, especialmente bacterias (aeróbicas o anaeróbicas), hongos y plancton, consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra. Se utiliza para medir el grado de contaminación.
Demanda Química de Oxígeno (DQO):	Es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en CO_2 y H_2O .
Efluente de proceso:	Aguas residuales de fuentes no domésticas en las que predominan los desechos industriales.
Efluente sanitario:	Aguas residuales descargadas de residencias y de establecimientos comerciales, institucionales y públicos.
Fosa séptica:	Cámara subterránea cubierta herméticamente para recolectar las aguas residuales de una casa o grupo de casas donde existe una biodegradación parcial de la materia orgánica por acción bacteriana.

Lodo:	Cualquier material producido durante el tratamiento primario, secundario o avanzado de aguas residuales que no ha pasado por ningún proceso para reducir patógenos o atracción de vectores.
pH:	Medida del grado de acidez o alcalinidad de una sustancia o una solución.
Población equivalente (P.E):	Se refiere a la cantidad de sustancias demandantes de oxígeno cuyo consumo de oxígeno durante la biodegradación es igual a la demanda promedio de oxígeno de las aguas residuales producidas por una persona (60 g DBO_5/d).
Proceso unitario:	Un subconjunto de un proceso de tratamiento completo en el que la conversión o eliminación de constituyentes se logra mediante fuerzas físicas o reacciones químicas o biológicas.
Tratamiento de Aguas residuales:	La eliminación de componentes para que el efluente tratado pueda devolverse al medio ambiente o reutilizarse de manera segura.
Tasa de Carga orgánica (OLR):	La tasa de masa de adición de sustrato orgánico por unidad de volumen de un reactor.
Tasa de Recirculación:	Volumen de efluente ingresado nuevamente al sistema de tratamiento.
Tiempo de Retención Hidráulico (TRH):	La tasa de tiempo de las aguas residuales permanece dentro de un reactor.
Tratamiento preliminar:	Eliminación de los componentes de las aguas residuales como trapos, palos, material flotante, arena y grasa que pueden causar problemas operativos o de mantenimiento con las operaciones de tratamiento, los procesos y los sistemas auxiliares.
Tratamiento primario:	Eliminación de una parte de los sólidos en suspensión y materia orgánica de las aguas residuales.
Tratamiento primario avanzado:	Eliminación mejorada de sólidos en suspensión y materia orgánica de las aguas residuales. Por lo general, se logra mediante la adición de productos químicos o la filtración.
Tratamiento secundario:	Eliminación de materia orgánica biodegradable (en solución o suspensión) y sólidos en suspensión.
Tratamiento terciario:	Eliminación de sólidos residuales en suspensión (después del tratamiento secundario). La desinfección también es típicamente una parte del tratamiento terciario.
Sólidos Totales (ST):	El residuo que queda después de que una muestra de agua residual ha sido evaporado y secado a la temperatura especificada (105°C).
Sólidos suspendidos totales (SST):	Porción de TS retenida en un filtro con un tamaño de poro específico, medido después de secarse a una temperatura específica (105 °C)

Sostenible:	Enfoque que genera impactos positivos en tres aspectos (1) Económico, (2) Ambiental y (3) Social en un largo período de tiempo.
Sostenibilidad:	Desarrollo social que satisface las necesidades sociales del presente sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras, garantiza el equilibrio entre el crecimiento económico, la protección del medio ambiente y la riqueza social.
Residuos:	Materiales gruesos de más de 6 mm (0.25 pulgadas) compuestos por escombros como rocas, ramas, trozos de madera, hojas, papel, raíces de árboles, plásticos, botellas, latas y trapos.
Reutilización del agua:	El uso de aguas residuales tratadas para un uso beneficioso, como el riego agrícola y paisajístico, y para uso potable indirecto y directo.

LISTADO DE ACRÓNIMOS

DBO₅:	Demanda bioquímica de oxígeno.
CF:	Coliformes fecales.
C₀:	Concentración inicial.
C_f:	Concentración final.
EC:	Economía circular.
%E:	Eficiencia en la remoción de contaminantes en porcentaje.
FH:	Humedal de tratamiento subsuperficial de flujo horizontal.
FV:	Humedal de tratamiento subsuperficial de flujo vertical.
FS:	Humedal de tratamiento de flujo superficial.
GyA:	Grasas y Aceites.
HT:	Humedales de Tratamiento.
HS:	Huella o área requerida para la implementación de la tecnología.
H:	Huevos de Helminto.
TCO:	Tasa de Carga Orgánica.
P.E:	Población Equivalente.
pH:	Potencial de Hidrógeno.
Q:	Flujo de agua medido como volumen en una unidad de tiempo.
ST:	Sólidos Totales.
SST:	Sólidos Suspendidos totales.
TR:	Tasa de Recirculación.
TRH:	Tiempo de Retención Hidráulica.

RESUMEN

Se ha implementado un sistema de tratamiento para un influente de industria alimentaria, utilizando un humedal de tratamiento subsuperficial de flujo vertical intensificado mediante recirculación, el sistema se diseñó para dar cumplimiento a la NOM-001-SEMARNAT-2021 descarga en suelo para riego de áreas verdes. Los parámetros que se midieron a lo largo del experimento fueron: Temperatura, pH, conductividad eléctrica, sólidos suspendidos, demanda química de oxígeno y turbidez.

Se operó el humedal de tratamiento de 150 m^2 de superficie con diferentes tasas de recirculación, se utilizó una tasa de recirculación del 100% durante 9 meses dividido en dos fases: la primera fase consta de la adaptación del humedal, se utilizó esta tasa para optimizar la adaptación del humedal, en esta etapa se obtuvieron eficiencias de remoción del 56.1% de DQO, posteriormente la segunda fase utilizando el 100% tuvo una duración de 7 meses, esta etapa fue la más prolongada del experimento ya que se utilizó esta tasa de recirculación hasta cumplir los límites máximos permisibles establecidos en la normativa, y al desarrollar el experimento con condiciones reales, existió mucha variación en el flujo y las concentraciones del influente, a lo largo de esta etapa se obtuvieron eficiencias de remoción del 86.1% de DQO, una vez cumpliendo la normativa se comenzó a utilizar tasas de recirculación del 75% por 1.9 meses, durante esta etapa se obtuvieron las eficiencias de remoción más altas del experimento, con eficiencias de remoción de 96.3% de DQO y por último se utilizaron tasa de recirculación del 50% por 1 mes con resultados de 89% de eficiencia de remoción. No fue posible la utilización de tasas de recirculación menores del 50% debido a que para poder alcanzar estas tasas de recirculación se debe contar con un correcto mantenimiento y operación de las trampas de grasas y aceites las cuales tienden a oxidarse afectando así al parámetro de DQO.

En conclusión, los humedales de tratamiento son una opción viable como alternativa de tratamiento para efluentes de la industria alimentaria ya que es capaz de depurar concentraciones de hasta 2780 ppm de DQO con eficiencias del 78% para estas concentraciones, a su vez, utilizando tasas de recirculación del 50% se obtienen eficiencias de remoción altas de DQO (89%), esta intensificación logra reducir la huella superficial hasta $1.8\text{ m}^2/\text{P.E}$ y optimiza los costos operativos siendo esta una de las principales ventajas de los humedales de tratamiento con respecto a las tecnologías convencionales.

INTRODUCCIÓN

El término "aguas residuales" se refiere a cualquier tipo de agua cuya composición ha sido modificada por influencias antropogénicas. Es agua que no puede ser utilizada para el fin que fue producida debido a la alteración de componentes. A partir de este concepto existen diferentes clasificaciones dependiendo de su origen, como lo pueden ser: uso doméstico, agrícola, industrial y pluvial. El agua residual doméstica, a su vez se puede subclasificar en aguas negras y grises; las aguas negras contienen las descargas de inodoros, por lo que contienen materia fecal y orina; las aguas grises, son descargas provenientes de lavabos, regaderas y lavadoras. Las aguas industriales son las producidas por actividades industriales que hacen uso del agua de acuerdo con la actividad económica. Otro tipo de agua residual es el agua de lluvia, que viaja por diferentes suelos y lleva consigo material contaminado. Finalmente, las aguas residuales agrícolas son las producidas por riegos e incluyen contaminantes agroquímicos (Tchobanoglous, 2014).

Es necesario realizar un tratamiento óptimo de las aguas residuales para que no afectar en las aguas superficiales, aguas subterráneas y aguas marinas, ya que son la fuente primaria que sostiene los ecosistemas como una unidad funcional de vida. Sin embargo, en México las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, durante el año 2018, las 2 540 plantas en operación a lo largo del país trataron 137.7 m³/s, es decir el 63.8% de los 215.8 m³/s recolectados a través de los sistemas de alcantarillado. La principal tecnología utilizada en México como proceso tratamiento de agua residual municipal son los lodos activados (Figura 1) (CONAGUA, 2019).

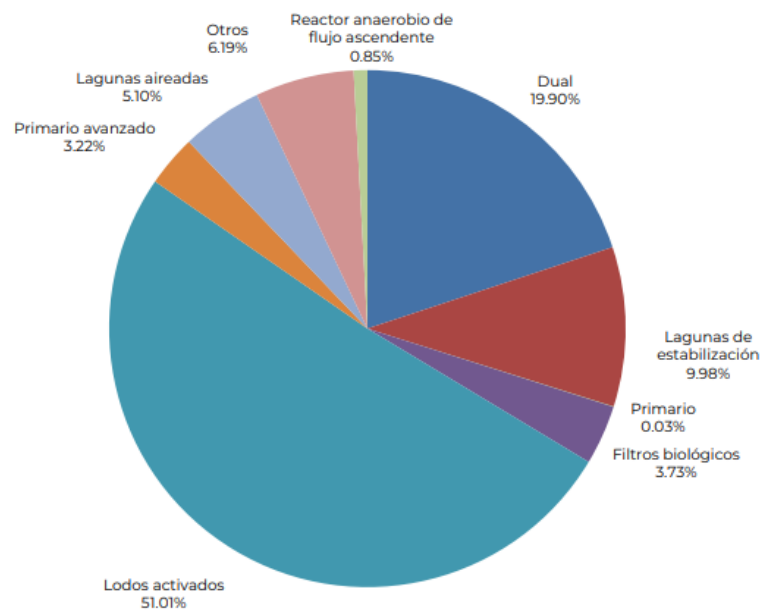


Figura 1. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, por caudal tratado. Fuente: CONAGUA (2019).

En cuanto a las plantas de tratamiento de aguas residuales industriales CONAGUA et al (2019) reporta que durante el año 2018, las 3 144 plantas en operación a lo largo del país trataron 87.1 m³/s, es decir el 85.9% de los 101.33 m³/s generados. Lo que indica que además de que no se cuenta con la infraestructura y recursos humanos para mejorar la calidad del agua, se requieren alternativas de tratamiento sostenibles.

El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos destinados a eliminar los contaminantes que se encuentran en el agua, cuyo objetivo es reducir, gestionar y eliminar los elementos que afectan las condiciones para ser vertido o reutilizado sin causar ningún impacto negativo para el ambiente y para la salud.

Existen diversas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, dentro de las cuales como tratamientos no convencionales se encuentran las soluciones basadas en la naturaleza que son sistemas que imitan y aprovechan el funcionamiento ecosistemas con mínima dependencia de la ingeniería. Estos sistemas utilizan plantas, suelo, medios porosos, bacterias y otros elementos y procesos naturales para eliminar contaminantes en aguas residuales, incluidos sólidos en suspensión, orgánicos, nitrógeno, fósforo y patógenos (Kadlec & Wallace, 2009). El uso de estos sistemas para el tratamiento de aguas residuales puede contribuir a ambientes más saludables al mejorar la calidad del agua y mejorar el entorno natural y los hábitats circundantes.

Los humedales de tratamiento se encuentran en la definición de soluciones basadas en la naturaleza y son utilizados para aguas residuales de tipo doméstico, aunque han funcionado para aguas de origen industrial (Fenoglio, 2000). Su aplicación se desarrolló en Europa hace unos 25 años y todavía se utiliza con éxito en la actualidad (Cooper, 1999). El término “HT” se refiere a sistemas que simulan una zona de transición entre los ambientes terrestre y acuático, pero están específicamente diseñados para el tratamiento de aguas residuales bajo condiciones controladas de ubicación, dimensionamiento y capacidad de tratamiento (Gerba, 1999).

El bajo costo de instalación y mantenimiento, en comparación con los sistemas convencionales, así como la generación de agradables escenarios, son algunos de los beneficios de este sistema. Los HT correctamente diseñados y construidos pueden purificar agua municipal, industrial y de escorrentía, y son especialmente efectivos para eliminar contaminantes acuosos como nitrógeno, fósforo y material orgánico. Son una tecnología efectiva y segura para el tratamiento y recirculación de agua si se mantienen y operan adecuadamente (Miranda, 2000). Como resultado de su versatilidad y viabilidad económica, esta tecnología es atractiva para su uso en el tratamiento de aguas residuales.

Las plantas, el suelo y los microorganismos son los componentes de un HT. Las plantas utilizadas pueden ser de varias especies, siendo las funciones principales la absorción de nutrientes, relaciones simbióticas con microorganismos, suministro de oxígeno y filtrado de partículas (Brix, 2001). El sustrato sirve tanto de soporte para las plantas como de medio de fijación de los microorganismos en el sistema, y también funciona como conductor hidráulico. Los microorganismos, por su parte, juegan un papel fundamental en la operación de los HT, ya que son los responsables de la remoción de diversos contaminantes, como la degradación

de la materia orgánica y la transformación de los compuestos de nitrógeno y fósforo que se encuentran en las aguas residuales.

Muchos factores influyen en el diseño de los HT, incluida la calidad necesaria del efluente, el área requerida, las combinaciones de tecnología y la utilización de la energía. Otras ventajas de los HT incluyen su facilidad de construcción, operación y mantenimiento, así como su alta robustez y estabilidad del proceso, alta capacidad de amortiguación para cambios de carga hidráulica y orgánica, y baja producción de lodos. Varios trabajos de investigación se han centrado en investigar las posibilidades de reducir la huella superficial manteniendo una buena calidad del efluente (Kantawanichkul et al., 2005).

En este proyecto se diseñó, implementó y evaluó un sistema de tratamiento utilizando un humedal de FV intensificado mediante recirculación como tratamiento secundario para un afluente de industria alimentaria con el fin de reducir la huella superficial y conocer la eficiencia de remoción a altas cargas orgánicas en clima cálido.

HIPÓTESIS

Es posible obtener eficiencias de remoción mayores al 90% de DQO a través de tasas de recirculación menores al 50% debido a que la recirculación contribuye a la dilución de la carga orgánica del influente y promueve mayores condiciones aerobias.

JUSTIFICACIÓN

Si bien se ha logrado a lo largo del tiempo un gran progreso para mejorar la eficiencia de los HT, todavía existen algunas limitaciones para todas las formas de HT. Las limitaciones principales son:

- La eliminación deficiente de nutrientes:
 - Nitrógeno
 - Fósforo.
- Alta huella superficial.
- Los límites de transferencia de oxígeno.

Otros aspectos importantes a considerar es que ningún humedal puede ser idéntico a otro debido a que al ser ecosistemas cada uno se comporta diferente por las condiciones ambientales: temperatura, humedad, presión, concentraciones influente (Vymazal, 2007).

Por otra parte la mayoría de los estudios reportados para los humedales de tratamiento se realizan utilizando efluentes domésticos bajo condiciones controladas, este tipo de experimentos facilita el análisis de resultados debido a que la naturaleza de las aguas residuales domésticas ya están muy estudiadas en función de sus componentes, variaciones y aportaciones por población, al ser condiciones controladas en un laboratorio se mitigan las variaciones de flujo y concentración que se presentan en condiciones reales.

Al solo recibir tratamiento un 38.37% las aguas residuales industriales que se generaron (CONAGUA, 2019) este sector presenta grandes áreas de oportunidad para la recuperación de agua, a su vez, el sector industrial busca siempre reducir sus costos operativos por lo que se requieren tecnologías capaces de depurar sus contaminantes buscando siempre la optimización de sus operaciones.

OBJETIVOS

1. GENERAL

Evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes en un humedal de tratamiento subsuperficial de flujo vertical intensificado mediante recirculación en aguas residuales de la industria alimentaria.

2. ESPECÍFICOS

- Determinar las características físico-químicas del influente mediante métodos estandarizados HACH.
- Diseñar la configuración del sistema de tratamiento mediante la metodología de (Kadlec & Wallace, 2009) para humedales de tratamiento cuyo objetivo normativo sea la NOM-001-SEMARNAT-2021-Usos en Riego.
- Determinar las tasas de recirculación de manera empírica en el humedal de tratamiento para la optimización del sistema.
- Evaluar el efecto de la recirculación en el humedal de tratamiento mediante la caracterización fisicoquímica del efluente.

CAPÍTULO 1. EL AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA ALIMENTARIA Y SUS TRATAMIENTOS CONVENCIONALES

1.1 EFLUENTE DE LA INDUSTRIA ALIMENTARIA

El uso del agua dentro la industria alimentaria tiene numerosas y diversas aplicaciones, van desde la limpieza de materiales y equipos, instalaciones y la higiene del personal hasta su aplicación como ingrediente de productos. En este tipo de industria es importante considerar la huella hídrica, debido a que en un estudio del Instituto Nacional de Estadística realizado en el 2013 se muestra que la industria consumió el 12% del agua de la industria europea.

1.2 TRATAMIENTO CONVENCIONAL DE EFLUENTES DE LA INDUSTRIA ALIMENTARIA

Debido a que los acuíferos residuales de la industria alimentaria son altamente biodegradables, pueden tratarse de manera efectiva con sistemas biológicos.

Las tecnologías de tratamiento comunes incluyen opciones tradicionales de tratamiento químico, biológico y físico, así como procesos anaeróbicos de conversión de residuos en energía. Los pasos pueden incluir flotación por aire disuelto, coagulación, sedimentación, filtración por membrana y filtración por carbón activado. Todo esto puede complicarse por el espacio limitado (Kantawanichkul, et al., 2005).

Uno de los factores importantes a considerar en la variación estacional del volumen de producción es que puede aumentar la complejidad del diseño.

1.3 INDUSTRIA CÁRNICA

1.3.1 CALIDAD DE EFLUENTE INDUSTRIA CÁRNICA

Los principales consumos de esta industria se encuentran en las áreas de carnicería y el lavaplatos. Esto se debe a la limpieza y desinfección de equipos, instalaciones y vehículos, que tienen que ser lavados constantemente durante todo el proceso productivo, desde el sacrificio de animales hasta el lavado de partes comestibles, así como el escaldado de carne de cerdo y otras operaciones. En el cuadro 1 se muestra el consumo de agua en una planta de la industria cárnica, el consumo depende la infraestructura con la que cuente cada empresa.

Cuadro 1. Consumo de agua dependiendo del proceso de la industria cárnica.

Etapa	Porcentaje de consumo
Estabulación	25
Matanza	10
Lavado de tripas y canales	20
Acondicionamiento de subproductos (proteínas y grasas)	2
Estaciones de lavado y esterilización	10
Lavado de equipo personal	7
Limpieza de instalaciones	22
Limpieza de equipos	4

Fuente: Onet (2010)

A su vez, el consumo de agua se basa en función del animal sacrificado (Cuadro 2).

Cuadro 2. Consumo de agua dependiendo del animal sacrificado.

Animal sacrificado	Cantidad (L)
Aves	8
Porcino	250-550
Vacuno	500-1000

Fuente: Onet (2010)

Debido a los muchos modos de operación y la diversidad de las especies sacrificadas en una industria, es difícil establecer un rango específico de los parámetros de descarga de esta industria, por lo que pueden llegar a presentar los valores mostrados en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Parámetros habituales de agua residual de la industria cárnica.

Contaminantes	Unidades	Valores aproximados
pH	-	6 – 8.5
SST	mg/L	300-5000
Grasas y Aceites	mg/L	25 -1500
DBO ₅	mg/L	600-7000
DQO	mg/L	1000-35000
Nitrógeno Total	mg/L	50-750
Fósforo Total	mg/L	15-80

Fuente: Cruz Morales (2019)

1.3.2 TRATAMIENTO CONVENCIONAL EFLUENTE INDUSTRIA CÁRNICA

Un sistema de tratamiento de efluentes de esta industria debe incluir: un pretratamiento: cribado, trampas de grasas y aceites, posteriormente un tratamiento físico-químico y un tratamiento biológico (Condorchem Envitech, 2015). En el cuadro 8 se describen algunas tecnologías que pueden utilizarse para la depuración de estos efluentes.

Cuadro 4. Tecnologías de tratamiento posibles de agua residual de la industria cárnica.

Etapa	Tecnología
Pretatamiento	Cribado
	Tamiz
Tratamiento Primario	Trampa de Grasas y Aceites
	Tanque homogeneizador
	Flotación por aire disuelto
	Sedimentador
	Membranas (Osmosis inversa, ultrafiltración, microfiltración)
Tratamiento Secundario	Tratamiento Anaerobio
	UASB
	Tratamiento Aerobio
	Lodos activados
	Lagunas aireadas
	Biodiscos

Fuente :Cruz Morales (2019)

1.4 INDUSTRIA CERVECERA

1.4.1 CALIDAD DE EFLUENTE INDUSTRIA CERVECERA

En este tipo de industria, las aguas residuales representan entre 65-80 % del agua total utilizada en el proceso. Se producen dos tipos de aguas residuales, una con alta carga de materia orgánica producto del lavado de los equipos e instalaciones, el otro efluente generado puede ser reutilizado o descargado sin previo tratamiento ya que este se genera por el enfriamiento del producto (Simate, 2011). Las principales características de estos efluentes son:

- Biodegradables.
- Alta conductividad.
- Alta concentración de sólidos suspendidos totales.
- pH alcalinos.

Algunos parámetros de descarga suelen sobrepasar los límites máximos permisibles establecidos en la normativa (Cuadro 4), por lo que es indispensable que este tipo de industria cuente con un sistema de tratamiento de aguas residuales.

Cuadro 5. Parámetros habituales de agua residual de la industria cervecera.

Parámetros	Unidades	Valores aproximados
Volumen de agua residual	(HL/HL cerveza)	3.5-8
DBO_5 /DQO	-	0.6-1.8
pH	-	3-12
Temperatura	°C	18-40
DBO_5	mg/L	1200-3600
DQO	mg/L	2000-6000
Ácidos grasos volátiles	mg/L	1000-2500
Sólidos Totales	mg/L	5100-8750
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	2900-3000
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	2000-5900
Nitrógeno Total	mg/L	30-100
Fósforo Total	mg/L	30-100

Fuente: Herrera (2020)

1.4.2 TRATAMIENTO CONVENCIONAL EFLUENTE INDUSTRIA CERVECERA

El tratamiento de aguas residuales puede ser clasificado en etapas, dependiendo de los procesos físicos, químicos o biológicos que ocurren. Dichos procesos se clasifican: 1) pretratamiento: cuyo objetivo es la eliminación de macro sólidos, 2) Tratamiento primario: cuyo objetivo es la eliminación de sólidos en suspensión y sedimentables de menor tamaño, 3) Tratamiento secundario: cuyo objetivo es la eliminación de materia orgánica, y 4) Tratamiento terciario: cuyo objetivo es el pulimiento del efluente, depurando los contaminantes que no hayan sido removidos en etapas previas como nutrientes y patógenos (Palmer & Kaminski, 2013).

En los sistemas de tratamiento de agua utilizados en esta industria se destacan los sistemas de tratamiento convencionales, los cuales cuentan con un tratamiento biológico para la depuración de materia orgánica (Cuadro 9) (Jizheng, 2019; Moran, 2015).

Cuadro 6. Casos de estudio de tratamiento de efluentes de la industria cervecera.

Caso	Tren de Tratamiento
1	Filtro de rejillas, Laguna anaerobia y aerobia, y ozonificador
2	Biorreactor de membrana fluidizada anaeróbica
3	Pila de combustible microbiana
4	Reactor de capa de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB)
5	Sistema combinado de reactor anaerobio y lodos activados
6	Tanque aerobio y anaerobio, reactor UASB

Fuente: Herrera (2020)

1.5 INDUSTRIA AZUCARERA

1.5.1 CALIDAD DE EFLUENTE INDUSTRIA AZUCARERA

La industria azucarera es una de las industrias que más consume agua, ya que es el ingrediente principal en la producción de azúcar, requiere agua durante el cultivo y el procesamiento, por ejemplo: transporte, lavado, condensación, enfriamiento, por lo que grandes volúmenes de agua residual. La concentración típica de este tipo de industria se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 7. Parámetros habituales de agua residual de la industria azucarera.

Contaminantes	Unidades	Valores aproximados
Temperatura	°C	30-72
pH	-	4-9
DQO	mg/L	400-7500
SST	mg/L	3000-5600

Fuente: Francisca (2016)

1.5.2 TRATAMIENTO CONVENCIONAL EFLUENTE INDUSTRIA AZUCARERA

Se recomiendan tratamientos para regulación temperatura y el pH de los efluentes de vapor, debido a que estos efluentes pueden ser reutilizados en el proceso. Los efluentes del proceso de fabricación, por ejemplo: efluente del molino, es necesario realizar un tratamiento para la disminución de materia orgánica y otros componentes. Algunos casos de sistemas de tratamiento de agua de esta industria se muestran en el Cuadro 10.

Cuadro 8. Tecnologías de tratamiento posibles de agua residual de la industria azucarera.

Tecnología	Uso final de agua
Sedimentación, Lagunas de estabilización	
Aireación	Riego, Reutilización,
Neutralización, aireación y lodos activados	Descarga al alcantarillado
Neutralización y lodos activados	

Fuente: Francisca (2016)

1.6 INDUSTRIA LÁCTEA

1.6.1 CALIDAD DE EFLUENTE INDUSTRIA LÁCTEA

Se distingue por no utilizar el agua como elemento final en la fabricación de sus productos; sin embargo, esto no implica que no se consuma agua. La mayor parte del agua utilizada es necesaria para operaciones auxiliares, en particular de limpieza y desinfección, que pueden llegar a consumir entre un 25 y un 40% del total de agua. Como resultado, la cantidad requerida en el proceso puede exceder varias veces el volumen de leche procesada, en un rango que supera de 1-4 veces el volumen de leche, dependiendo del tipo de infraestructura, el tipo de productos lácteos y el sistema de limpieza.

El agua utilizada en la fabricación de los productos lácteos debe tener estándares de calidad altos, superando los requerimientos del agua potable ordinaria. Algunas características que debe presentar son las siguientes:

- Inoloro
- Insípida.
- Incoloro
- Suave
- Casi estéril.

La cantidad de agua requerida para tratar un litro de leche oscila entre 1 y 10 L. En el cuadro 6 se muestra la cantidad de agua utilizada con relación a un litro de leche dependiendo del tipo de producto lácteo.

Cuadro 9. Volumen de agua consumida y producida por producto lácteo.

Producto lácteo	Litros de Agua consumida/ Litros de leche	Litros de Agua residual/Litros de leche
Manteca	7-9	2.1-2.5
Leche en polvo	7-9	2-4
Leche de consumo	7-9	2.5-6

Fuente: Arango (2007)

La concentración habitual de los efluentes de la industria láctea se muestra en el Cuadro 7.

Cuadro 10. Parámetros habituales de agua residual de la industria láctea.

Parámetro	Unidades	Leche	Quesos	Derivados Lácteos	Helados
Ph	-	8.5	6.9	8.5	8
CE	$\mu S/cm$	1650	3150	1250	1200
SST	mg/L	435	850	825	425
DQO	mg/L	1775	4500	4000	925
NTK	mg/L	65	100	100	75
Nitratos	mg/L	50	105	90	75
Fósforo	mg/L	20	35	6.25	5.5
Cloruros	mg/L	140	220	100	135
Grasas y Aceites	mg/L	105	365	110	25
Detergentes	mg/L	3.5	7	7.5	6

Fuente: Arango (2007)

1.6.2 TRATAMIENTO CONVENCIONAL EFLUENTE INDUSTRIA LÁCTEA

Un sistema de tratamiento de efluentes de esta industria debe diseñarse principalmente para reducir los niveles de contaminantes en parámetros como pH, grasas y aceites, sólidos suspendidos, DBO_5 , DQO.

En general, el tratamiento de aguas residuales de esta industria puede realizarse con el siguiente tren de tratamiento:

- Pretratamiento:
 - Cribado: Grueso: 20 – 30 mm, Fino: 5 – 10 mm.
 - Homogeneización.
- Tratamiento Físicoquímico:
 - Eliminación de grasas y aceites, sólidos suspendidos: DAF, coagulación – floculación, Membranas de ultrafiltración. (Figura 2).

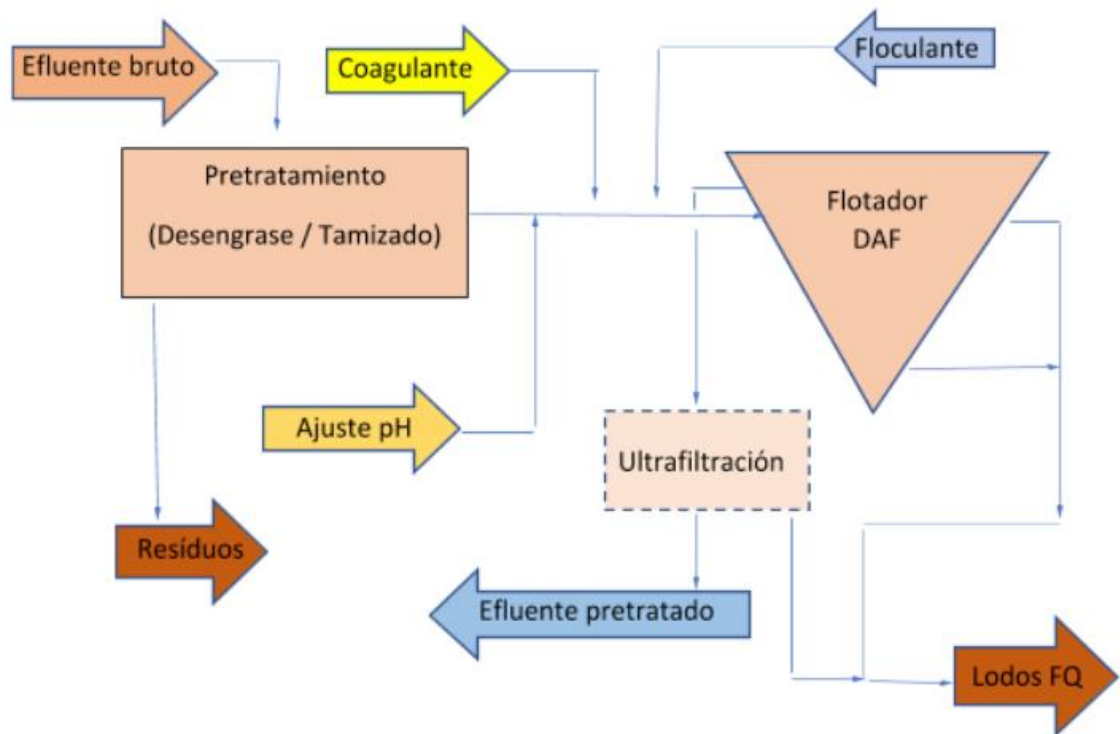


Figura 2. Esquema pretratamiento y tratamiento físicoquímico para industria láctea.
Fuente: Arango (2007).

- Tratamiento biológico:
 - Tratamiento anaerobio: UASB o EGSB.
 - Tratamiento aerobio: Lodos activados + MBR.

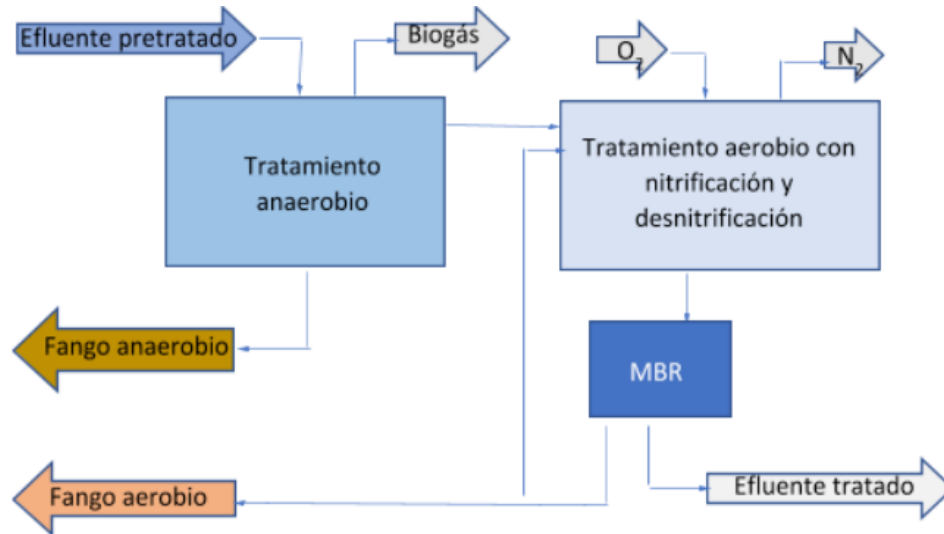


Figura 3. Esquema de tratamiento secundario para industria láctea. Fuente: Arango (2007).

- Espesador de lodos: Cal y floculante.

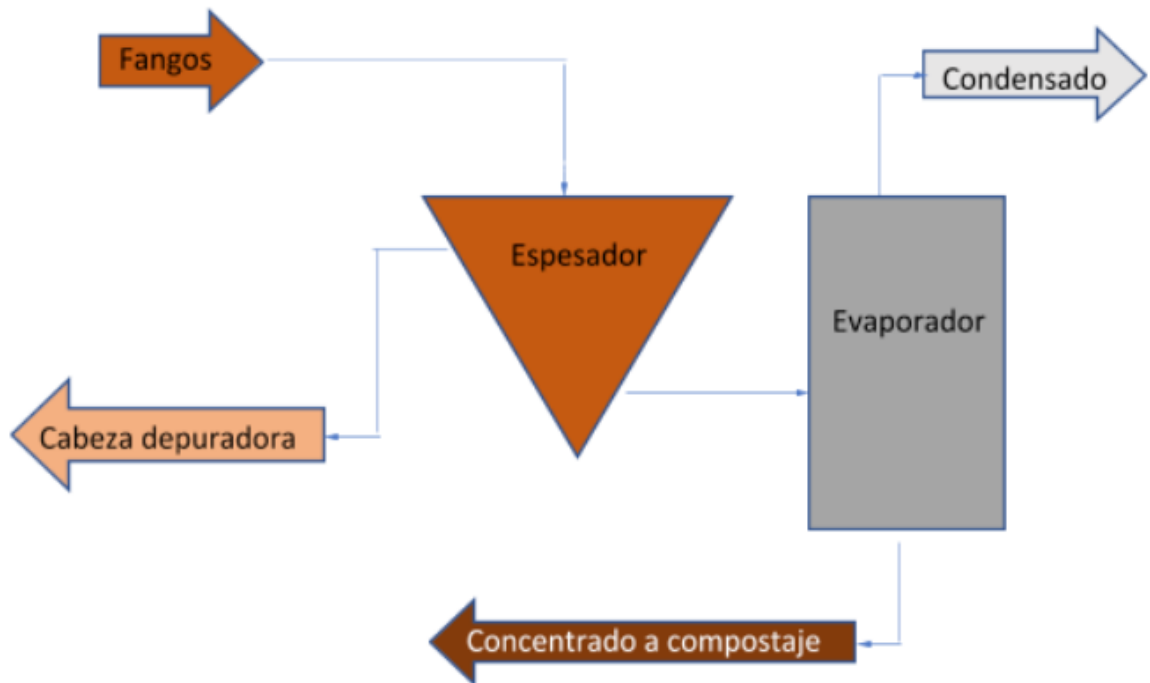


Figura 4. Esquema espesamiento de lodos para industria láctea. Fuente: Arango (2007).

CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONAMIENTO DE LOS HUMEDALES DE TRATAMIENTO

2.1 FUNDAMENTOS

Humedales de tratamiento son sistemas de ingeniería natural desarrollados para mejorar la calidad del agua a través de procesos naturales que ocurren entre los microorganismos, el suelo, la vegetación, y las interrelaciones atmosféricas bajo importantes condiciones de control (USEPA, 1999).

Basados en los principios de funcionamiento de los humedales naturales, se han puesto en marcha humedales de tratamiento, que son sistemas diseñados y construidos para imitar los mecanismos hidrodinámicos y procesos biogeoquímicos de degradación que ocurren en los humedales naturales solamente que en un ambiente más controlado, pero su objetivo es mejorar la calidad de un efluente pretratado y optimizar los sistemas de tratamiento (Langergraber, 2009; Vymazal, 2007). El funcionamiento de los humedales artificiales se basa en una relación simbiótica entre plantas y microorganismos, así como sus interacciones con la química del suelo (sustrato), para brindar tratamiento de aguas residuales (Ghosh & Gopal, 2010).

Los sistemas de purificación natural también se conocen como tecnologías no convencionales, procesos pasivos, sistemas de bajo costo, tecnologías blandas y sistemas verdes (Matamoras, 2008; Serrano & Corzo Hernández, 2008).

Las ventajas de esta tecnología incluyen bajos requerimientos de energía, tareas simples de operación y mantenimiento, menores costos de instalación y mantenimiento, baja producción de lodo, alta capacidad de amortización e incluso la creación de un paisaje agradable que sirva como destino atractivo para turistas, locales y residentes (Matamoras, 2008; Puigagut, 2007; Romero, 2009; Ye & Li, 2009; Zhu, 2011). Además, el tratamiento de aguas residuales se puede realizar en el mismo lugar donde se produce el agua residual, y el mantenimiento puede ser realizado por personal con capacitación mínima (Matamoras, 2008; Y. Wu, 2008).

2.2 MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES Y PATÓGENOS

Los humedales de tratamiento son sistemas complejos de tratamiento de aguas residuales en el cual suceden diversas reacciones para la depuración de contaminantes. A diferencia de otros sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales, donde el proceso de tratamiento se optimiza mediante una serie de procesos unitarios diseñados para un propósito específico, las vías de eliminación múltiples se encuentran simultáneamente en uno o dos reactores.

La vegetación tiene distintas funciones dentro de los humedales de tratamiento. Las raíces proporcionan una superficie para el crecimiento de biopelículas microbianas que aumentan la actividad biológica por unidad de área en comparación con los sistemas de aguas abiertas tales como los lagunajes. Además, de que limitan los cortos circuitos hidráulicos y también pueden aportar pequeñas cantidades de oxígeno y compuestos de carbono orgánico en la

matriz de enraizamiento, sustentando procesos microbianos aerobios y anóxicos (y facultativos).

Los humedales de tratamiento contienen una gran variedad de bacterias; se pueden encontrar microorganismos aerobios estrictos, facultativos y anaerobios estrictos, debido a los diversos gradientes redox, siendo un factor que contribuye al rendimiento robusto. Las principales vías de eliminación dentro de los humedales de tratamiento se enumeran para contaminantes específicos en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Principales mecanismos de remoción en humedales de tratamiento.

Contaminante	Mecanismo de eliminación principal
Sólidos suspendidos	Sedimentación, filtración
Materia orgánica	Sedimentación y filtración para la eliminación de materia orgánica particulada, degradación biológica (aerobia y/o anaerobia) para la eliminación de materia orgánica disuelta
Nitrógeno	Amonificación y posterior nitrificación y desnitrificación, asimilación por la vegetación y extracción mediante la recolección de biomasa
Fósforo	Reacciones de adsorción-precipitación impulsadas por propiedades del medio filtrante, asimilación por vegetación y extracción mediante la recolección de biomasa
Patógenos	Sedimentación, filtración, muerte natural, depredación (realizada por protozoos y metazoos)

Fuente: Kadlec & Wallace (2009)

2.3 MATERIA ORGÁNICA

La materia orgánica puede clasificarse en soluble y particulada, su medición puede realizarse de diferentes maneras, generalmente, la Demanda Química de Oxígeno se usa como principal método analítico para medir la materia orgánica, sin embargo, la Demanda Bioquímica de Oxígeno, Absorbancia – UV o el carbono orgánico total también pueden ser utilizadas.

2.4 MATERIA ORGÁNICA PARTICULADA

principalmente por procesos físicos como la filtración y la sedimentación. Las partículas retenidas se acumulan y se someten a hidrólisis, generando una carga adicional de compuestos orgánicos disueltos que pueden hidrolizarse o degradarse aún más dentro del humedal. La acumulación de materia orgánica particulada en el medio granular es una característica típica de los humedales para tratamiento de flujo subsuperficial y es uno de los principales factores que contribuye al problema operativo de colmatación en estos sistemas.

Otras fuentes de materia orgánica particulada incluyen el crecimiento de biopelículas y la acumulación de detritos de plantas y bacterias. Debido a la acumulación de materia orgánica particulada en los humedales para tratamiento de flujo subsuperficial la concentración es mucho mayor que la tasa de carga de materia orgánica particulada de entrada, lo que indica que otros materiales (como el material vegetal muerto, concentración de fondo), contribuyen a la retención de materia orgánica particulada dentro del lecho de tratamiento

2.5 MATERIA ORGÁNICA SOLUBLE

Las bacterias inducen una reacción química en la que los electrones se transfieren de la materia orgánica (donador de electrones) a un compuesto específico (aceptor de electrones), y en el proceso, liberan energía para el crecimiento celular. Las principales reacciones que se llevan a cabo en los humedales de tratamiento se describen en el cuadro 12.

Cuadro 12. Principales reacciones en los humedales de tratamiento.

Reacción	Donador de Electrones	Aceptor de Electrones	Producto Principal
Respiración Aerobia	Materia orgánica	Oxígeno	Dióxido de Carbono
Nitrificación	Materia Orgánica	Oxígeno	Nitritos y Nitratos
Desnitrificación	Materia Orgánica	Nitritos y Nitratos	Nitrógeno gas y Dióxido de Carbono
Sulfato reducción	Sulfato	Materia Orgánica	Sulfuro y Dióxido de Carbono
Metanogénesis	Materia Orgánica	Materia Orgánica	Metano y Dióxido de Carbono

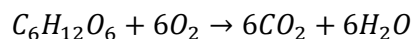
Fuente: Villanueva (2022)

Cada reacción tiene un potencial redox óptimo por lo tanto, pueden llevarse a cabo en diferentes lugares dentro del mismo humedal, ya que los gradientes redox varían en función del nivel de saturación, el volumen de espejo de agua y de las raíces de las plantas, que van desde condiciones completamente anaeróbicas (menos de - 100 mV) a completamente aeróbico (mayor que +400 mV).

2.6 RESPIRACIÓN AEROBIA

La gran mayoría de las bacterias heterótrofas utilizan el oxígeno como aceptor terminal de electrones, por lo que estas bacterias dominan cuando el oxígeno está disponible. La mayoría de las bacterias heterotróficas son facultativas, lo que significa que también pueden usar nitritos o nitratos como aceptores de electrones cuando el oxígeno es el reactivo limitante. La concentración de oxígeno varía dependiendo de la configuración del humedal utilizada. El óptimo funcionamiento de FV es mediante alimentación intermitente, permitiendo así la aireación pasiva del sustrato entre pulsos, y aumentando la presencia de oxígeno en el agua. Por lo tanto, la respiración aerobia es la reacción predominante en los sistemas de FV. Los humedales de FH se encuentran casi completamente saturados a unos pocos centímetros de la superficie (10 cm por debajo de la superficie). En los humedales de FH, solo hay unas pocas aportaciones de oxígeno:

- Concentración intrínseca del afluente.
- Reaireación física de la superficie.
- Aportación por parte de las plantas (transporte desde la atmósfera a la zona radicular).



2.7 NITRÓGENO

El nitrógeno existe en diversas especies químicas. El nitrógeno ingresa a la mayoría de los humedales para tratamiento primario y secundario como N orgánico y amonio (N-NH₄), y los sistemas terciarios, reciben una mezcla de especies de nitrógeno, incluyendo nitrato. Prácticamente todas las vías del ciclo del nitrógeno están activas en los humedales para tratamiento, incluida la mineralización (amonificación), la volatilización de amoníaco, nitrificación, desnitrificación, asimilación por plantas y bacterias, fijación de nitrógeno, reducción de nitrato, oxidación anaerobia del amonio, adsorción, desorción, sedimentación y lixiviación (Vymazal, 2007).

2.8 AMONIFICACIÓN

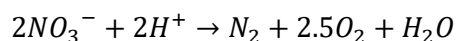
La amonificación consiste en la conversión de N orgánico en amonio a través de la actividad extracelular de enzimas excretadas por microorganismos (Vymazal, 2007). La amonificación se considera un primer paso necesario para la conversión y/o eliminación de nitrógeno a nitrato, pero rara vez es un paso limitante para la posterior eliminación de NT.

2.9 NITRIFICACIÓN

La nitrificación es la oxidación de amonio a nitrato, facilitada por un consorcio bacteriano autótrofo con nitrito como un producto intermedio. Para que el proceso tenga lugar, los microorganismos, el oxígeno, la alcalinidad y los micronutrientes deben estar presentes en las aguas residuales. Los nitrificadores autótrofos suelen ser microorganismos de crecimiento más lento que los heterótrofos aerobios y, por lo tanto, pueden no competir o perder, en presencia de materia orgánica fácilmente biodegradable. Una ventaja importante de los humedales de FV es su alta capacidad de oxigenación y, por lo tanto, su capacidad para nitrificar. Puede ocurrir cierta nitrificación en los sistemas de FH, especialmente cuando la carga de materia orgánica es baja, pero la nitrificación es a menudo un paso limitante para la eliminación de nitrógeno total en los sistemas de FH. La nitrificación por si sola es un proceso de conversión y no da como resultado la eliminación de nitrógeno, a menos que esté adecuadamente acoplada a la desnitrificación.

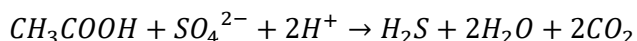
2.10 DESNITRIFICACIÓN

La desnitrificación es la reducción de nitrato a gas nitrógeno por medios biológicos, a través de varios pasos intermedios, en ausencia de oxígeno disuelto (condiciones anóxicas). Bajo estas condiciones anóxicas, la desnitrificación puede ser una vía de degradación de materia orgánica predominante en los HT, especialmente en los humedales de FH (J. Garcia et al., 2010). Se ha demostrado que la desnitrificación representa una fracción importante de la eliminación total de carbono orgánico en los humedales de FH (Baptista et al., 2003). Sin embargo, la disponibilidad de nitrato a menudo es un problema, ya que generalmente no está presente en cantidades considerables en el afluente y no puede generarse por nitrificación autotrófica hasta que suficiente materia orgánica se haya eliminado.



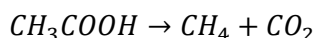
2.11 SULFATO REDUCCIÓN

El producto principal es el sulfuro, que es una fuente de malos olores y puede causar la inhibición tanto de las actividades microbianas como del crecimiento de las plantas (Wiessner et al., 2005). Por otro lado, la mayoría de los sulfuros metálicos son altamente insolubles, y la sulfato reducción es un mecanismo importante de eliminación de metales en los HT. La sulfato-reducción puede ser una vía de eliminación de materia orgánica muy importante, representando una fracción considerable de la eliminación total de DQO en un humedal de tratamiento de FH (L. M. Garcia & White, 2018).



2.12 METANOGÉNESIS

La metanogénesis es una reacción microbiana anaerobia en la que la materia orgánica se oxida a dióxido de carbono y se reduce a metano. Si bien no es un mecanismo de eliminación estricto en términos de DQO, la baja solubilidad del metano en agua elimina efectivamente la materia orgánica mediante la desgasificación del metano. Las condiciones redox requeridas para la metanogénesis son muy similares a las requeridas para la sulfato-reducción. Además, los metanógenos y los reductores de sulfato utilizan sustratos orgánicos similares (como el ácido acético y el metanol). Cuando la relación DQO-sulfato (expresada como DQO: S) es inferior a 1,5, las bacterias reductoras de sulfato generalmente superan a los metanógenos y cuando la relación es mayor que seis, predominan los metanógenos (Stein et al., 2007).



2.13 ASIMILACIÓN POR VEGETACIÓN

Un concepto erróneo es que las plantas eliminan la mayor parte del nitrógeno en los humedales para tratamiento. Las macrófitas emergentes almacenan nitrógeno en sus tejidos y la asimilación por la vegetación resulta en eliminación de nitrógeno que varía desde 0.2 a 0.8 g N/m²·d, dependiendo de la especie de macrófita considerada (Vymazal, 2007). Parte de este nitrógeno almacenado puede eliminarse mediante la cosecha periódica de la biomasa foliar (tejido superficial), sin embargo, más de la mitad del nitrógeno asimilado por la planta puede almacenarse en el tejido subterráneo (raíces), y el tiempo es importante, ya que las plantas translocan nitrógeno entre el tejido superficial y subterráneo dependiendo de la temporada. Si las plantas no se cosechan, no se produce una eliminación neta de nitrógeno, porque durante su descomposición final se libera el nitrógeno que ha sido almacenado en el tejido vegetal.

2.14 FÓSFORO

El fósforo ingresa a la mayoría de los humedales para tratamiento principalmente como fósforo orgánico y ortofosfato, pero la mayoría del fósforo orgánico se convierte en ortofosfato como parte de la degradación de materia orgánica. Los mecanismos que juegan un papel en la eliminación de fósforo en los humedales para tratamiento incluyen precipitación química, sedimentación, adsorción y asimilación por vegetación y bacterias. Desafortunadamente, la mayoría de estos procesos son lentos o no están activos, a menos que se utilicen sustratos especiales para mejorar los procesos abióticos. Al igual que con el nitrógeno, las plantas incorporan fósforo en su biomasa, pero esto puede ser un mecanismo de eliminación solo si las plantas se cosechan y, por lo tanto, está sujeto a las mismas limitaciones que la asimilación de nitrógeno por las plantas (Von Sperling, 2007).

2.15 PATÓGENOS

La eliminación de patógenos en los HT es extremadamente compleja debido a la variedad de procesos que pueden conducir a la eliminación o inactivación de bacterias, virus, protozoos o parásitos. Los mecanismos de eliminación biológica incluyen la liberación de oxígeno y la actividad bacteriana en la zona de la raíz (rizosfera), así como la agregación y retención en biopelículas, muerte natural, predación y competencia por nutrientes limitantes u oligoelementos (López, 2017).

2.16 METABOLISMO MICROBIANO

En los sistemas de tratamiento biológico se utilizan las bacterias que proliferan naturalmente en el medio ambiente. A través de la ingeniería, los requisitos para alcanzar bioconversión, como el flujo de aire, tiempo de retención hidráulico, entre otros, se pueden satisfacer. Además, el diseño de procesos biológicos se basa en la creación y uso de nichos ecológicos para la elección de los microorganismos mejor adaptados puede reproducirse en estas condiciones ambientales (López, 2017).

2.17 CLASIFICACIÓN DE LOS MICROORGANISMOS

Hay dos tipos de organismos: procariotas y eucariotas. Las procariotas son en su mayoría organismos unicelulares como bacterias, cianobacterias (algas) y arqueas (algunas viven en ambientes extremos), mientras que las eucariotas son organismos unicelulares (protozoos, algas y hongos) y organismos multicelulares (hongos, plantas y animales) (McCarty & Rittman, 2001).

Los microorganismos presentes en el agua residual son principalmente (virus, bacterias, protozoos), además de otros microorganismos (algas, plantas y animales). Los microorganismos catalizan el tratamiento de las aguas residuales, siendo una pequeña pero significativa porción de ellas patógenas para los humanos. Los patógenos que se encuentran en las aguas residuales incluyen virus (por ejemplo, el virus de la hepatitis A), bacterias (por ejemplo, *Vibrio cholerae*, que causa diarrea), protozoos (por ejemplo, *Giardia lamblia*, que causa giardiasis) e incluso animales (por ejemplo, helmintos, *Taenia saginata*, que causa teniasis).

2.18 FUENTE DE ENERGÍA Y CARBONO

El metabolismo es el conjunto de todos los procesos químicos que ocurren en las células. El catabolismo y el anabolismo son los dos tipos de metabolismo. Las reacciones catabólicas son las que aportan energía a la célula. La reacción catabólica es una reacción redox en la que el transporte de electrones del donante al aceptor genera una fuerza de motilidad de protones que genera ATP. Esta energía se utiliza en reacciones anabólicas para sintetizar componentes celulares a partir de carbono y otros nutrientes. Los procesos anabólicos son parecidos en todas las bacterias, pero los procesos catabólicos pueden variar mucho entre los diferentes grupos microbiológicos.

Se requiere la presencia de un donador y un aceptor de electrones para la producción de energía. Un compuesto reducido actúa como donante de electrones (por ejemplo, materia orgánica o amoníaco), mientras que un compuesto oxidado actúa como aceptor de electrones (por ejemplo, oxígeno o nitrato).

Las fuentes de carbono para la biosíntesis son solo de dos tipos: orgánicas e inorgánicas. Hay tres tipos de fuentes de energía: orgánica, inorgánica y lumínica, pero la variedad de combinaciones de donantes y aceptores de electrones produce una amplia gama de microorganismos (Cuadro 13).

Cuadro 13. Clasificación trófica de los microorganismos.

Fuente de energía					
Grupo trófico	Donador de electrones		Aceptor de e-	Productos	Fuente de carbono
	Grupo microbiano	Donador de e-			
Quimiótrofo					
Organótrofo	Heterótrofos aerobios	Orgánico	O_2	CO_2, H_2O	Orgánico
	Desnitrificantes	Orgánico	NO_2^-, NO_3^-	N_2, CO_2, H_2O	Orgánico
	Fermentadores	Orgánico	Orgánico	Ácidos grasos volátiles	Orgánico
	Hierro reductores	Orgánico	Fe^{3+}	Fe^{2+}	Orgánico
	Sulfato reductores	Acetato	SO_4^{2-}	H_2S	Acetato
	Metanógenos (acetoclásicas)	Acetato	Acetato	CH_4	Acetato
Litótrofo	Nitrificantes (oxidantes de amonio)	NH_4^+	O_2	NO_2^-	CO_2
	Nitrificantes (oxidantes de nitrito)	NO_2^-	O_2	NO_3^-	CO_2
	Anammox	NH_4^+	NO_2^-	N_2	CO_2
	Desnitrificantes	H_2	NO_2^-, NO_3^-	N_2, H_2O	CO_2
	Desnitrificantes	S	NO_2^-, NO_3^-	N_2, SO_4^{2-}, H_2O	CO_2
	Hierro oxidantes	Fe^{2+}	O_2	Fe^{3+}	CO_2
	Sulfato reductores	$H_2, S^0, S_2O_3^{2-}$	SO_4^{2-}	H_2S, H_2O	CO_2
	Sulfato oxidantes		O_2	SO_4^{2-}	CO_2
	Hidrogenotróficos aeróbicos	H_2	O_2		CO_2
	Metanógenos (hidrogenotróficos)	H_2	CO_2	CH_4	CO_2
Fotótrofo					
	Algas	H_2O	CO_2	O_2	CO_2
	Bacterias fotosintéticas	H_2O	CO_2	S^0	CO_2

Fuente: McCarty & Rittman (2001); Tchobanoglous (2014)

2.14 CONDICIONES AMBIENTALES

Las condiciones ambientales deben ser óptimas para el crecimiento de microorganismos. Los principales factores que influyen en el crecimiento son el oxígeno y la temperatura, aunque también son importantes el pH (entre 6 y 8) y la presión osmótica (dependiendo de la concentración de las sales) (López, 2017).

2.14.1 OXÍGENO

La necesidad o la tolerancia o la sensibilidad al oxígeno molecular (O_2) varía dependiendo del tipo de microorganismo (Cuadro 14). Los microorganismos aerobios consumen oxígeno y pueden requerirlo estrictamente, a su vez, pueden funcionar en ausencia de éste (microorganismos facultativos), o requerirlo en niveles bajos (microorganismos microaerofílicos). Por el contrario, los microorganismos anaerobios no necesitan oxígeno para su supervivencia, sin embargo, pueden tolerarlo (microorganismos aerotolerantes) o no (microorganismos estrictos) (McCarty & Rittman, 2001).

Cuadro 14. Clasificación de microorganismos dependiendo de los requerimientos de oxígeno.

Microorganismo	Presencia de O_2	Tipo de metabolismo
Aerobios		
Estrictos	Presente; $O_2 > 0.5$ ppm	Respiración Aerobia
Facultativos	Presente pero no esencial utilizan NO_3^-	Respiración aerobia, Nitrificación, Fermentación
Microaerofílicos	Concentraciones bajas; $O_2 < 0.5$ ppm	Respiración aerobia
Anaerobios		
Aerotolerantes	No requerido	Fermentación, sulfato – reducción
Estrictos	No requerido, O_2 es perjudicial para los microorganismos	Fermentación

Fuente: Mandigan & Martinko (2006)

2.14.2 TEMPERATURA

La temperatura tiene papel muy importante tanto en la tasa de crecimiento como en el metabolismo de los microorganismos (Figura 4). Los microorganismos que proliferan en un rango de temperatura más alto tienen una tasa máxima de crecimiento más alta que aquellos que proliferan en un rango de temperatura más bajo. Con el aumento de la temperatura, la tasa de crecimiento aumenta gradualmente hasta que disminuye considerablemente debido a la desnaturalización de las proteínas por las altas temperaturas. La clasificación de los microorganismos con respecto a las temperaturas que proliferan son las siguientes (López, 2017):

- Psicrófilos: menor de 15 °C.
- Mesófilos: entre 15-40 °C.
- Termófilos entre 40-70 °C.
- Hipertermófilos; de 70 °C hasta 110 °C.

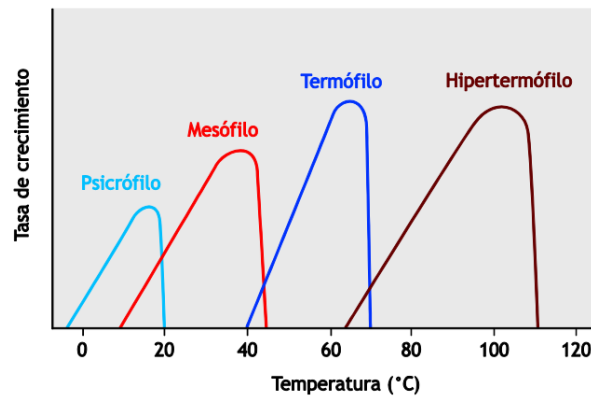


Figura 5. Efecto de la temperatura sobre las tasas de crecimiento de los microorganismos.

Fuente: McCarty & Rittman (2001).

2.15 CLASIFICACIÓN DE HUMEDALES DE TRATAMIENTO

Los humedales de tratamiento se pueden clasificar en función de las características de la especie macrófita que predomina y del régimen de flujo de agua (Vymazal, 2007), las dos categorías principales en el diseño de estos sistemas y que han sido ampliamente aplicadas son los sistemas de flujo superficial y subsuperficial con un sentido horizontal en la circulación del agua (Kadlec, 2000).

2.15.1 HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL

Los Humedales de tratamiento de flujo superficial (HFS) fueron una de las primeras opciones de humedales para tratamiento que se implementaron, ya que imitan los procesos de purificación del agua que se llevan a cabo en un humedal natural más que cualquier otro tipo de humedal para tratamiento. Se usan comúnmente para tratar fuentes no puntuales como las aguas pluviales urbanas, la escorrentía agrícola y los flujos cargados de metales, además de las aguas residuales municipales (Vymazal, 2013). Debido a su costo relativamente bajo por unidad de área, su mayor aplicación radica en situaciones de alto volumen de flujo y baja concentración de contaminantes. En el tratamiento de aguas residuales domésticas y municipales, generalmente se encuentran después de otras unidades de tratamiento y con frecuencia se consideran como una etapa terciaria o de pulimento.

La configuración de estos sistemas es muy variable. Pueden estar impermeabilizados o no, ser de profundidad constante o variable, con vegetación total o parcial, la vegetación puede ser emergente, sumergida o flotante y su tamaño puede variar desde unos pocos metros cuadrados hasta varios kilómetros cuadrados. Sin embargo, existen características estándar para su óptimo funcionamiento. El nivel del agua se mantiene por encima del suelo, arena o grava que soporta el crecimiento de plantas de humedal, las cuales pueden sobrevivir en condiciones de inundación continua (Figura 5).

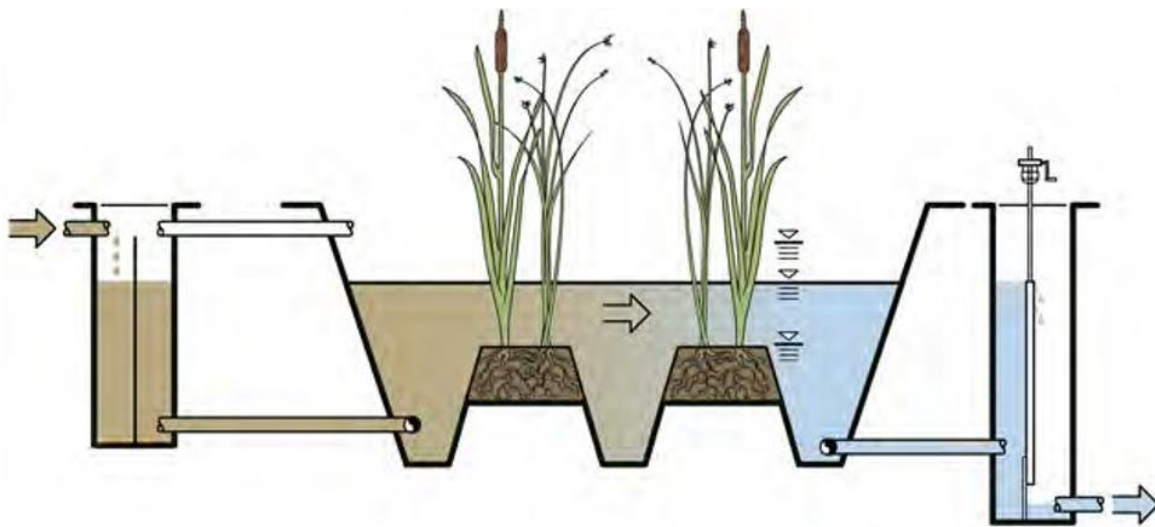


Figura 6. Humedal de tratamiento de flujo superficial. Fuente: Arias (2017).

Los HFS dependen de un conjunto diverso de mecanismos de eliminación de contaminantes, incluyendo la sedimentación física y la degradación de contaminantes por rutas químicas, microbianas y lumínicas. Más que otras variantes de humedales de tratamiento, los HFS promueven simultáneamente procesos aeróbicos y anaeróbicos y las tasas de carga de materia orgánica a menudo determinan cuál domina. La capa de enraizamiento es en gran parte anaerobia, especialmente después de que el sistema madura y una capa de detritos que consiste en vegetación muerta y sedimento entrante se establece sobre ella. Los niveles más bajos de la columna de agua pueden variar de anaerobio a aerobio dependiendo de las tasas

de carga de contaminantes, la profundidad de la columna de agua y la distancia desde el punto de entrada del flujo. El humedal debe diseñarse de manera que las capas superiores de la columna de agua sean siempre aerobias para evitar la liberación de olores y promover la muerte de organismos patógenos (Von Sperling, 2007).

La captación por las plantas en un sistema de FS juega un papel más importante en la eliminación de nutrientes que en otros tipos de humedales de tratamiento. Las plantas también liberan pequeñas cantidades de oxígeno y compuestos de carbono orgánico en la matriz de enraizamiento, alimentando procesos microbianos aerobios y anóxicos. La mayoría de los procesos que juegan un papel en los humedales de tratamiento FS se representan en la Figura 6 (Vymazal, 2013).

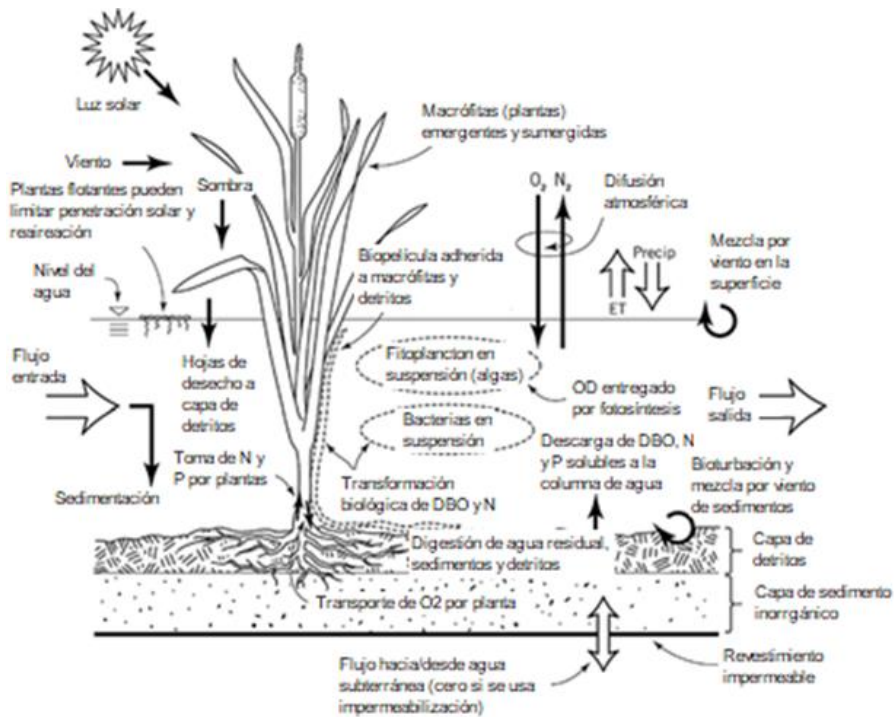


Figura 7. Principales procesos en los HFS. Fuente: Wallace & Knight (2006).

2.15.2 HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

2.15.2.1 HUMEDALES DE FLUJO HORIZONTAL

Los humedales de flujo horizontal son usados para tratamiento secundario y terciario de agua residual doméstica, así como también para una variedad de efluentes industriales (Kadlec & Wallace, 2009; Vymazal & Kröpfelová, 2008). Para humedales de tratamiento subsuperficial de flujo horizontal tratando aguas residuales domésticas, el tratamiento primario es generalmente mediante el uso de tanques sépticos, tanques Imhoff, sedimentadores.

En un humedal FH típico, el lecho de grava opera con flujo saturado y plantado con plantas macrófitas emergentes (Figura 7). El agua entra al sistema de tratamiento por uno de sus extremos, fluye a través del medio de grava, sin estar expuesto a la atmósfera, y es colectado en el lado opuesto de lecho para su descarga final. Una tubería vertical instalada en una arqueta externa, e independiente del lecho del humedal, controla el nivel de agua dentro del medio de grava. El lecho está aislado del terreno por una combinación de una lámina impermeabilizante plástico (Geomembrana HDPE) y una membrana de geotextil protegiendo ambas caras del plástico impermeabilizante.

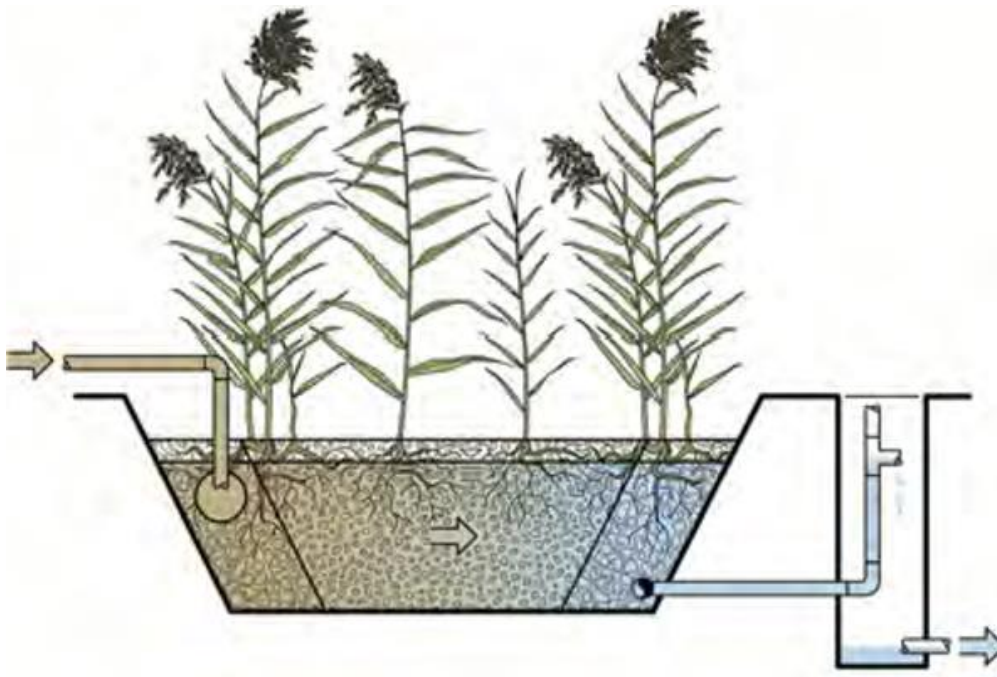


Figura 8. Configuración de HFSS. Fuente: Arias (2017).

Para el tratamiento secundario de agua residual doméstica con HF, la profundidad de la capa de grava (o de relleno) es generalmente de 0.5 a 0.7 m y el nivel del agua es mantenido entre 5 y 10 cm por debajo de la superficie.

2.15.2.2 HUMEDALES DE FLUJO VERTICAL

Los humedales de flujo vertical generalmente se usan para tratar aguas residuales secundarias domésticas. El lecho, relleno de arena /gravas se planta con macrófitas emergentes. Posterior al tratamiento primario se descarga secuencialmente en la superficie del lecho con volúmenes considerables para garantizar una buena y uniforme distribución para cubrir toda la superficie del lecho. El agua percola lentamente a través del sustrato, escurre y se recoge por medio de tuberías en el fondo del lecho. Entre cargas de aguas a tratar, los poros del medio filtrante se llenan de aire, saturando de oxígeno el lecho y así sostener los procesos microbianos aerobios (Figura 8). El lecho debe estar aislado por medio de una película impermeable plástica y membrana geotextil.

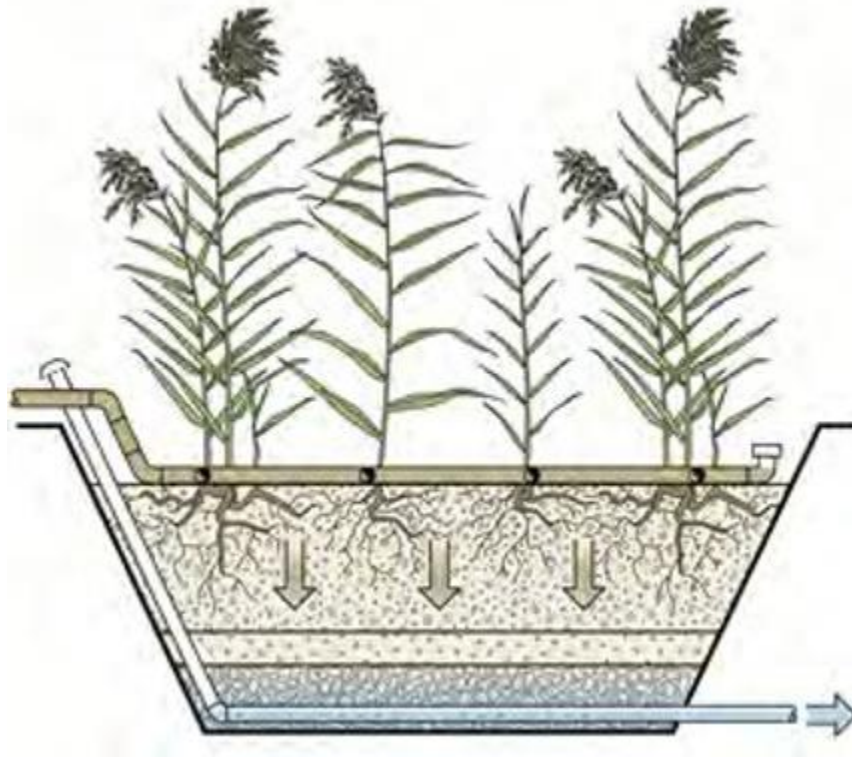


Figura 9. Humedal de tratamiento de flujo vertical. Fuente: Arias (2017).

Debido a las altas condiciones oxidantes dentro del lecho, los humedales de FV son eficientes eliminando carbono orgánico (DBO5 o DQO). Los humedales de FV son también aptos cuando procesos estrictamente aerobios son necesarios como en el caso de la nitrificación (J. Garcia et al., 2010; Langergraber & Haberl, 2001). Por tanto, los humedales de FV son normalmente usados como tratamiento secundario, así como también, para tratamiento terciario de aguas residuales domésticas. Los sistemas FV también son usados para tratar aguas lixiviadas de vertederos y aguas residuales de procesadoras de alimentos, las cuales usualmente contienen altas concentraciones de amonio y/o carbono orgánico (por encima de cientos de miligramos por litro) (Kadlec & Wallace, 2009), como también otras aguas residuales resultantes de procesos agroindustriales tales como efluentes de producción de aceite de oliva, lácteos y efluentes de ganadería (Stefanakis et al., 2014).

2.15.3 HUMEDALES TIPO FRANCÉS

Estos sistemas tratan los lodos y las aguas residuales en un solo paso. Los humedales de FV tipo francés se componen de dos etapas, y cada etapa contiene celdas que operan alternadamente. En una primera etapa se realiza el tratamiento de los lodos, la retención de sólidos, la eliminación parcial de materia orgánica y nitrificación. En la segunda etapa, se produce la eliminación final de materia orgánica y nitrificación. El lodo tratado de la primera etapa se acumula a una tasa de aproximadamente dos a tres cm por año cuando el sistema funciona con la carga de diseño. La capa retenida en la superficie debe retirarse una vez alcance una profundidad aproximada de 20 cm, que en la práctica suele ser cada 10 a 15 años. La capa de depósito puede acumularse más lentamente en sistemas que no reciben la carga de diseño completa al inicio de la operación (IMTA, 2012).

2.16 INTENSIFICACIÓN DE HUMEDALES

Los HT al ser soluciones basadas en la naturaleza como se describió anteriormente, son sistemas de tratamiento pasivo que pueden funcionar sin suministro externo de energía (con la excepción de las bombas que pueden ser necesarias para la alimentación del sistema). Los humedales intensificados generalmente se dividen en dos categorías:

- Uso de una fuente de energía externa para aumentar la capacidad aerobia del sistema (como la recirculación de efluentes o la aireación artificial).
- Medios filtrantes específicos (principalmente destinados a la mejora de la eliminación de fósforo).

2.16.1 RECIRCULACIÓN

La recirculación implica devolver y mezclar una parte del efluente con el influente de sistema de tratamiento. La recirculación de efluentes se ha propuesto como un cambio operativo para mejorar la eliminación de materia orgánica y nitrógeno, particularmente en humedales FV. La remoción de NT mejora porque un efluente que contiene una cantidad significativa de nitrato pero una cantidad limitada de material orgánico se combina con un afluente bajo en nitrato pero alto en carbono orgánico, lo que permite que ocurra la desnitrificación. Von Sperling et al (2007) señala que los principios de recirculación aplicados a los humedales de tratamiento son similares a los esquemas de desnitrificación utilizados en las plantas de lodos activados convencionales.

Aunque es más habitual en los humedales FV, la recirculación se ha aplicado a prácticamente todos los tipos de humedales de tratamiento. Ya en la década de 1990, los experimentos con recirculación en un humedal FV demostraron una mayor eficiencia, lo que resultó en la incorporación de la recirculación en algunas pautas de diseño (Brix & Arias, 2005; Brix & Johansen, 2004; Laber et al., 1997). Cuanto mayor es la relación, más nitrato se libera para una mayor desnitrificación, pero al mismo tiempo aumenta la carga hidráulica y, en consecuencia, disminuye la TRH del primer afluente, ya que la relación de recirculación adecuada es específica para la hidráulica del sistema, niveles de carga y nutrientes.

2.16.2 MEDIOS FILTRANTES ESPECÍFICOS

Los medios filtrantes específicos se pueden usar en humedales subsuperficiales en vez de arena y/o grava para mejorar la eliminación de fósforo. La remoción de fósforo en humedales FH y FV para el tratamiento secundario de aguas residuales domésticas se basa principalmente en la adsorción, precipitación y cristalización sobre materiales ricos en Ca^{2+} , Fe^{3+} y Al^{3+} .

2.17 ESTADO DEL ARTE

2.17.1 HUMEDALES DE TRATAMIENTO

Durante las últimas décadas, el interés científico por los humedales de tratamiento ha permitido optimizar el rendimiento de los humedales. El número de artículos científicos publicados ha aumentado exponencialmente en todo el mundo (Figura 10).

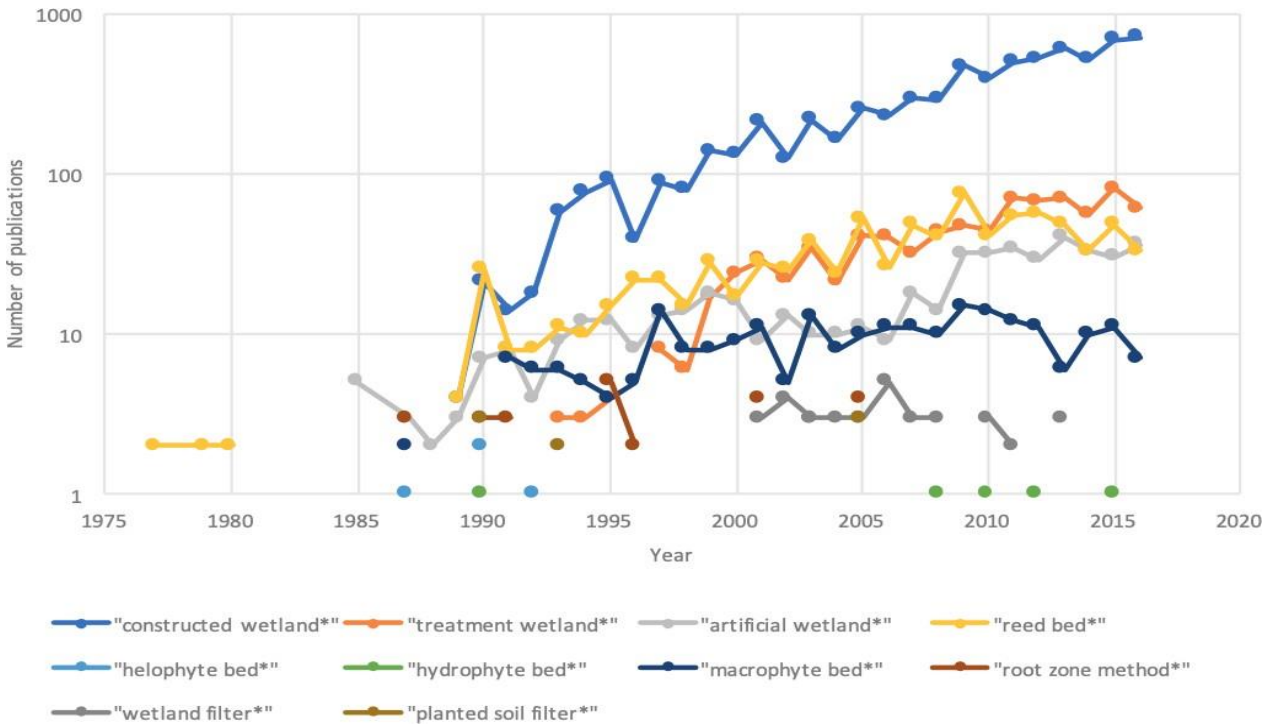


Figura 10. Número de publicaciones recuperadas en marzo de 2017 de la Colección principal de Web of Science para los diferentes nombres de tecnologías de humedales construidos, Intervalo de tiempo 1900-2016. Fuente: Carvalho (2017).

Los últimos hallazgos científicos han demostrado que los humedales de tratamiento tienen un enorme potencial para tratar no solo las aguas residuales domésticas sino también los efluentes industriales.

Se han realizado varios estudios para la intensificación de humedales (reducción de la huella), mediante la evaluación de diferentes estrategias entre las que se han destacado algunas como: aplicación de diferentes materiales para la remoción de nutrientes (Avery et al., 2007; Blanco

et al., 2016), varias configuraciones hidráulicas (Kantawanichkul et al., 2005; Ye & Li, 2009), humedales aireados (Zhang et al., 2010) y condiciones de operación variables (Foladori et al., 2013; Prost-Boucle & Molle, 2012; H. Wu et al., 2016).

Los humedales de tratamiento como parte de las soluciones basadas en la naturaleza ahora están ganando un impulso importante en la comunidad científica y profesional como soluciones factibles, descentralizadas y de bajo costo para la recuperación de agua y recursos bajo el enfoque de economía circular.

2.17.2 INTENSIFICACIÓN DE HUMEDALES

2.17.2.1 HUMEDALES DE TRATAMIENTO EN SERIE.

Algunos estudios utilizan la percepción de aumentar la profundidad del sistema en lugar de aumentar la huella superficial.

S. Kantawanichkul et al (2003) diseñaron dos humedales híbridos (Humedal Vertical y Humedal Horizontal) a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales de granjas porcinas. En uno, el Humedal vertical estaba sobre el lecho de arena de flujo horizontal, y en el otro los humedales estaban conectados en serie.

Ye & Li et al (2009) diseñaron una especie de torre que consta de tres etapas; la primera y la tercera etapa eran Humedales horizontales rectangulares, y la segunda etapa era un humedal superficial circular de tres capas, el diseño de apilar humedales contribuyó a la reducción de la huella con una media y una desviación estándar de $3,2 \pm 1,9 \text{ m}^2 \text{ P. E}^{-1}$.

2.17.2.2 RECIRCULACIÓN

La percepción detrás de la recirculación es aumentar la actividad microbiana aeróbica a través de la interacción excesiva entre contaminantes y microorganismos sin alteraciones sustanciales. S. Kantawanichkul et al (2003) utilizó una relación 1:1 efluente tratado: influente obteniendo eficiencias de remoción de DQO entre 86 y 95% utilizando humedales híbridos a escala piloto. Zhang et al (2016) utilizó una relación 2.6:1 efluente tratado: influente obteniendo eficiencias de remoción de DQO entre 55 y 88% utilizando humedales verticales a escala real.

2.17.2.2 AIREACIÓN

Se ha propuesto como una solución para crear una condición aeróbica prometedora para la nitrificación para mejorar el rendimiento de todo tipo de HT. Sin embargo, el uso de aireación con bomba de aire y soplador de aire es principalmente en humedales verticales y humedales horizontales.

Zapater-Pereyra et al (2014) estudiaron los efectos de la aireación en el rendimiento del tratamiento de los humedales horizontales y los humedales híbridos, se concluyó que la aireación incrementó la eficiencia del sistema por unidad de área, se obtuvo una huella superficial menor de entre 1.5 y 1.9 veces en comparación al humedal control.

CAPÍTULO 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE HUMEDALES DE TRATAMIENTO PARA LOS EFLUENTES DE UN CASO DE ESTUDIO DE UNA INDUSTRIA ALIMENTARIA

El primer aspecto necesario para poder realizar un diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales es conocer el origen del agua, qué contaminantes contiene y la concentración de cada uno de ellos, por consiguiente, se requiere conocer el uso final del agua. Conociendo estos parámetros se puede diseñar de manera esquemática el tren de tratamiento que se necesitará para la depuración de contaminantes. Para el dimensionamiento de cada una de las operaciones unitarias, se requieren datos más específicos como lo son:

- Flujos.
 - Flujos por hora
 - Flujo máximo instantáneo.
 - Flujo máximo extraordinario.
- Velocidad de llegada del agua.
- Periodos de trabajo.
- Periodos vacacionales.
- Proyección de crecimiento del proyecto.
- Espacio Disponible.
- Planos del sitio.
- Áreas verdes disponibles.
- Conexiones eléctricas disponibles.
- Estudios preliminares.
 - Mecánica de suelos.
 - Topografía.
 - Hidrología.

La conjunción de toda la información antes mencionada nos permite realizar un diseño a la medida para cada ocasión previendo así cualquier escenario que pudiera alterar el funcionamiento del sistema y comprometiendo la calidad de agua del efluente que, en cuestiones del marco normativo además de realizar contaminaciones ambientales por su incumplimiento, viene relacionado con sanciones económicas.

3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL INFLUENTE

La evaluación de la situación actual de la gestión de aguas residuales requiere de la caracterización de las aguas residuales para diseñar adecuadamente la solución óptima, por lo que se realizó un muestreo compuesto por 5 días tomando muestras en diferentes horarios para obtener la muestra lo mas representativa posible (Cuadro 15), el número de muestras y los intervalos entre la toma de muestras se tomó con base en la Ley Federal de Derechos Artículo 278 - B Fracción III. El muestreo se realizó con base en la NMX-AA-003-1980 AGUAS RESIDUALES.- MUESTREO

Cuadro 15. Datos de muestreo compuesto.

Muestra	Hora	Volumen	Unidades
1	10 am	0.5	L
2	12 pm		
3	2 pm		
4	4 pm		
Total		3	L



Figura 11. Muestreo de influente.



Figura 12. Muestreo compuesto del influente.

Se realizaron muestreos para la determinación de las características fisicoquímicas del efluente industrial (Cuadro 16). El influente del sistema de tratamiento comprende de la mezcla de diferentes corrientes: las pruebas piloto, el proceso de producción y las aguas residuales de los baños del almacén.

Cuadro 16. Resultados de caracterización fisicoquímica de efluente de industria alimentaria.

Parámetro	Valor ¹	Ref ²	Unidades	Método ³
Q	3.00-6.00	-	m ³ /d	Estimación ⁴
DQO	790-1440	60	mg/L	5220 D.
DBO ₅	335-770	30	mg/L	5210 B.
SS	0.1	-	mg/L	2540 F.
SST	210.0	30.0	mg/L	2540 D.
GyA	27.34	15.0	mg/L	5520 B.
CF	18 ⁵	1 ³	NMP /100mL	9221 E.
H	0.0	<=5	Huevo/L	NMX-AA-113- SCFI-2012

¹ Resultados de caracterización fisicoquímica del influente; Considera Pruebas Piloto, Proceso de Producción y Sanitarios de Almacén.

² Valores de referencia establecidos en la norma NOM-001-SEMARNAT-2021 para fines de reúso de agua en riego con contacto directo.

3 Métodos Estándar HACH.

4 Debido a la configuración de la infraestructura actual, no fue posible medir el flujo de aguas residuales, por lo que se utilizó la estimación con encuestas y estimaciones proporcionadas por la empresa

Las muestras de agua residual se colectaron de la entrada y salida del humedal utilizándose envases estériles. Para la preservación de la muestra se utilizaron hieleras para mantener su temperatura cercana a los 4 °C y se añadió H_2SO_4 hasta alcanzar un pH de 2 (Figura 13), y se realizó el análisis en un periodo no mayor a 4 h tomada la muestra, esto para evitar la degradación de ciertos compuestos a causa de los microorganismos.



Figura 13. Preservación de las muestras.

3.2 LOCALIZACIÓN DEL SISTEMA

Para desarrollar este trabajo de investigación, se implementó el sistema dentro de las instalaciones de una industria alimentaria, en las coordenadas 22° 13'42.3"N, 100° 54'10.2"W. (Figura 14).



Figura 14. Ubicación del sistema de Tratamiento en Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P.

3.3 DISEÑO DE SISTEMA DE TRATAMIENTO

3.3.1 PRETRATAMIENTO

Debido a la naturaleza del influente, se cuenta con altas concentraciones y acumulación de grasas y aceites (Figura 15), la importancia de la eliminación de este contaminante en las primeras etapas del sistema es de suma importancia debido a que las grasas son el componente de las aguas residuales que tiene una mayor tendencia a oxidarse, al estar presentes en los sistemas biológicos, fijan rápidamente el oxígeno disuelto disponible, pudiendo ocasionar situaciones de anoxia puntuales. Además, las grasas y aceites tienen tendencia a flotar, debido a que su densidad es inferior a la del agua, lo que genera capas en la superficie de los sistemas biológicos, dificultando la transferencia de oxígeno, a su vez, puede causar la obstrucción de componentes del sistema. De acuerdo con la información proporcionada por la empresa, se producen 15 m^3 de GyA en un período de tiempo que varía entre 20 y 30 días.



Figura 15. Izquierda: Acumulación de GyA en biodigestores actuales. La imagen de la derecha representa un biodigestor obstruido. Se necesita trampa GyA como tratamiento preliminar.

Para la remoción de este contaminante se propuso una trampa de grasas y aceites (desengrasador estático), en ellos las aguas residuales pasan a través de un depósito, que obliga a las aguas residuales a salir por la parte inferior del mismo, permitiendo así que los componentes de menor densidad con respecto al agua queden retenidos en la superficie (Figura 15).

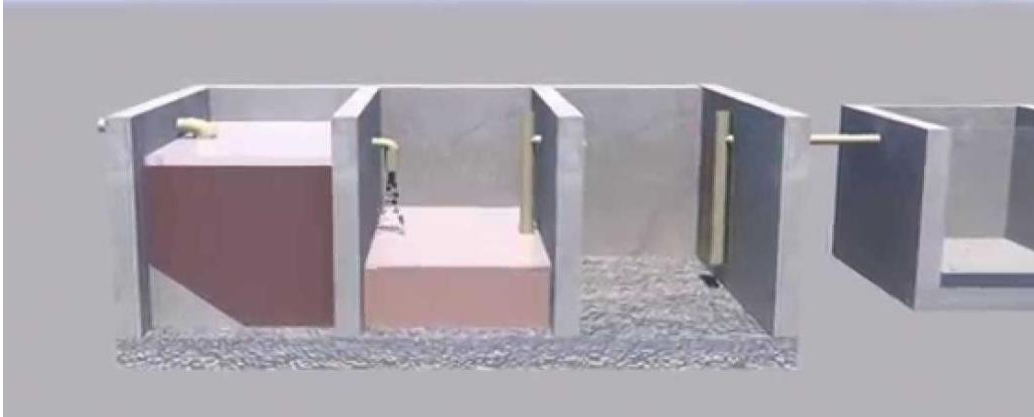


Figura 16. Esquema de trampa de grasas y aceites. Fuente: Quima (2018).

El dimensionamiento de la trampa de grasas y aceites se realizó utilizando como base la norma DIN 4040, cuyos parámetros se muestran en el cuadro 17.

Cuadro 17. Consideraciones para el diseño de trampas de grasas y aceites.

Parámetro	Valor	Unidades
Flujo de entrada, Q	0.35	L/s
Tiempo de Retención Hidráulico, TRH	3	minutos
Relación Largo – Ancho	1.80:1	-
Tasa de Aplicación, TA	0.17	$\frac{L}{s \cdot m^2}$
Altura mínima útil recomendada	0.9	M
Volumen que ingresa a la trampa, Vag	$Q \left \frac{L}{s} \right \cdot TRH s $	L
Área superficial mínima, As	$\frac{Q \left \frac{L}{s} \right }{TA \left \frac{L}{s \cdot m^2} \right }$	m ²
Volumen mínimo, Vu	$2 \cdot Vag$	m ³
Largo mínimo	$\frac{Vu}{a \cdot Hu}$	M
Área superficial mínima	$a \cdot L$	m ²

Fuente: DIN 4040

Con respecto al cuadro 18, en el cual se muestran las dimensiones de las trampas de grasas y aceites se puede observar que las dimensiones propuestas se cumplen con el área superficial mínima y la relación largo-ancho establecidas de la norma DIN 4040.

Cuadro 18. Resultados del dimensionamiento de trampa de grasas y aceites.

Parámetro	Valor	Unidades
Flujo de entrada, Q	0.35	L/s
Tiempo de Retención Hidráulico, TRH	3	Minutos
Tasa de Aplicación, TA	0.17	$\frac{L}{s \cdot m^2}$
Volumen mínimo, Vu	0.13	m^3
Volumen que ingresa a la trampa, Vag	63	L
Área superficial mínima, As	2.06	m^2
Altura útil	1.5	M
Largo	3.45	M
Acho	1.95	M
Relación Largo – Ancho	1.80:1	-
Área superficial	6.73	m^2

3.3.2 TRATAMIENTO PRIMARIO

3.3.2.1 SEDIMENTADOR PRIMARIO

La industria alimentaria ya contaba con la infraestructura de biodigestores como tratamiento marca Rotoplas® cuyas especificaciones se muestran en el Cuadro 19.

Cuadro 19. Capacidad de biodigestores para cada corriente del influente.

Biodigestor	Capacidad, m ³	TRH, d ¹
Plantas piloto	7	2-4
Producción	7	2-4
Baños de almacén	1.3	5-10

Los tiempos de retención hidráulica se determinaron de acuerdo a los caudales estimados. Es importante mencionar que se observó y confirmó durante los estudios de campo que los valores fueron muy similares a los estimados.

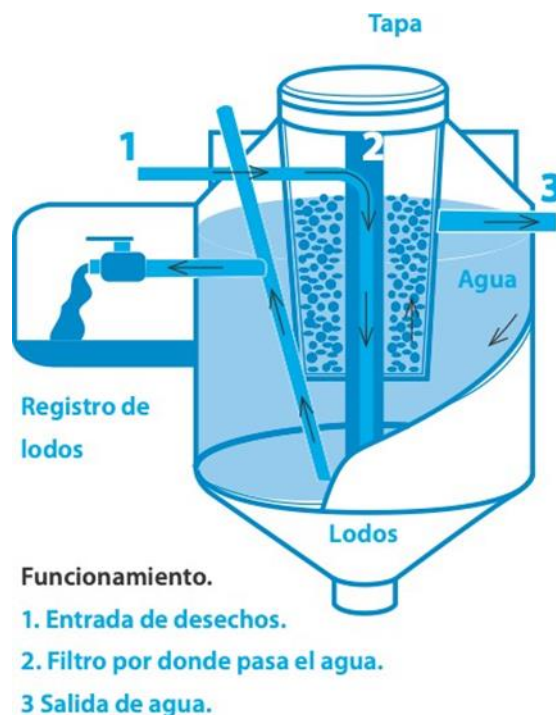


Figura 17. Configuración hidráulica de biodigestores primarios Rotoplas®. (1) Tubo de entrada, (2) Tubo de sedimentación y (3) tubería de salida. Fuente: Rotoplas (2022).

De acuerdo con los TRH se muestra que son suficientes para la eliminación SST por separación por gravedad. Las eficiencias de eliminación de SST alcanzan hasta el 60-70 % con un tiempo de sedimentación de 2 h, después de este período de tiempo, las bacterias anaerobias pueden causar la eliminación de compuestos orgánicos hasta en un 30 % (Tchobanoglous, 2014).

3.3.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO

3.3.3.1 HUMEDAL

Se utilizaron métodos cinéticos de primer orden (Kadlec & Knight, 1996) para dimensionar los humedales, se utilizaron varios métodos y consideraciones (Cuadro 20).

Cuadro 20. Métodos y consideraciones para el dimensionamiento de humedales.

Parámetro	Valor	Unidades	Referencia	
Consideraciones Hidráulicas				
Persona Equivalente	$\frac{Q \left \frac{m^3}{d} \right \times DBO_5 \left \frac{g}{m^3} \right }{60 \left \frac{g}{hab \cdot d} \right }$	Hab	Ecuación	(European Commission, 2019)
Tamaño Porosidad Efectiva D_{10}	1.0-2.0	mm	-	-
Media porosity, ϵ	28.0-32.0	%	-	-
Conductividad Hidráulica, K_s	100.0-1,000.0	$\frac{m^3}{m^2 \cdot d}$	-	-
Tiempo de Retención Hidráulico, HRT	$\frac{\epsilon \times As m^2 \times h m }{Q \left \frac{m^3}{d} \right }$	h	Ecuación	Ecuación Darcy
Carga hidráulica HLR	$\frac{Q \left \frac{m^3}{d} \right }{As m^2 }$	$\frac{m}{d}$	Ecuación	(Reed & Crites, 1995)
Consideraciones biológicas y fisicoquímicas				
Área Requerida	$\frac{Q \left \frac{m^3}{d} \right }{K_A} \ln \left(\frac{C_0 - C^*}{C_f - C^*} \right)$	m^2	Ecuación	(Kadlec & Knight, 1996)
K_{DBO_5}	0.493	$\frac{m}{d}$	-	(Kadlec & Knight, 1996)
K_{SST}	8.22	$\frac{m}{d}$	-	(Kadlec & Knight, 1996)
Carga Orgánica	$\frac{Q \left \frac{m^3}{d} \right \times DBO_5 \left \frac{g}{m^3} \right }{As m^2 }$	$\frac{g DBO_5}{m^2 \cdot d}$	Ecuación	(Reed & Crites, 1995)

Los resultados de los métodos y consideraciones para el dimensionamiento de humedales se muestran en el cuadro. Debido a que los humedales de tratamiento de flujo vertical tienen $40 \frac{g DBO_5}{m^2}$ de carga orgánica como tasa máxima de trabajo, con el dimensionamiento de Kadlec

Capítulo 3 Diseño e implementación de humedales de tratamiento para los efluentes de un caso de estudio de una industria alimentaria

se obtuvo una carga de $116.17 \frac{gDBO_5}{m^2}$, con esta justificación se realizó un ajuste en la superficie del humedal para contar una carga orgánica de $30 \frac{gDBO_5}{m^2}$.

Cuadro 21. Ficha técnica de humedal de tratamiento.

Parámetro	Valor	Unidades
Flujo Promedio, Q	5.0	$\frac{m^3}{d}$
DBO ₅ influente, C ₀	770.0	$\frac{mg}{L}$
SST influente, C ₀	210.0	$\frac{mg}{L}$
DBO ₅ efluente, C _f	30.0	$\frac{mg}{L}$
Persona Equivalente, P.E.	64.2	Hab
k DBO ₅	0.493	$\frac{m}{d}$
KSST	8.22	$\frac{m}{d}$
Conductividad Hidráulica, K _s	500.0	$\frac{m^3}{m^2 \cdot d}$
Pendiente, s	0.01	$\frac{m}{m}$
Porosidad	30	%
Profundidad, h	1.05	M
Factor de Seguridad, f	4	-
Área requerida para depuración DBO ₅ , A _s	32.9	m ²
Área requerida para depuración de SST, A _s	1.6	m ²
Carga Hidráulica, HLR	0.15	$\frac{m}{d}$
Carga Orgánica, OLR	116.17	$\frac{gDBO_5}{m^2}$
Carga orgánica de diseño	30.0	$\frac{gDBO_5}{m^2}$
Corrección de Área requerida DBO ₅ , A _s	128.3	m ²
Corrección de Carga Hidráulica	0.04	$\frac{m}{d}$
TRH	8.4	D
Evapotranspiración, ETo	0.64	$\frac{m^3}{d}$
Largo	32.5	M
Ancho	4	M
Relación Largo:Ancho	8:1	-

3.3.3.2 VEGETACIÓN

La vegetación seleccionada para el HT fue la *Thypha spp* (Figura 17), el motivo de selección de esta especie fue debido a que presenta las características óptimas para el rango de trabajo del experimento (Cuadro 22), la especie presenta una temperatura deseable entre 10 – 30 °C, la temperatura media anual en el estado de S.L.P es de 21 °C por lo que está dentro del rango deseable de la vegetación, a su vez, presenta un amplio rango de pH 4 – 10, en promedio el pH del influente tiende a la neutralidad. El tipo de reproducción de esta especie es por rizomas, por lo que con esto no es una amenaza como foco de infección para la industria alimentaria, un tipo de reproducción por esporas si lo fuera.

Por último, es una especie que se encuentra fácilmente en la región, así como en invernaderos, por lo que facilita la adquisición de esta especie ya que se requiere una gran cantidad de éstas en el experimento (150-450).



Figura 18. Thypha spp (IMTA, 2012).

Cuadro 22. Ficha técnica *Thypha spp.*

Género		<i>Thypha spp</i>
Familia		Tifácea
Nombres comunes		Espadaña, enea, anea, junco
Características		Ubicua en distribución. Capaz de crecer bajo diversas condiciones medio ambientales. Se propaga fácilmente. Capaz de producir una biomasa anual grande. Tiene potencial pequeño de remoción de N y P por la vía de la poda y la cosecha
Distancia de siembre		60 cm
Penetración de raíces en grava		Relativamente pequeña (30 cm) por lo que no es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial
Tipo de reproducción		Rizomas
Temperatura °C	Deseable	10 – 30
	Germinación de semilla	12 – 24
Salinidad (ppt)		30
pH		4 – 10

Fuente: IMTA (2012)

3.3.3.3 SUSTRATO

Todas las guías (Brix & Arias, 2005; Brix & Johansen, 2004; DWA, 2017; ÖNORM, 2009) exigen que los HT contengan 3 capas de sustrato:

- Capa principal
- Capa transición
- Capa de drenaje.

La granulometría de las capas aumenta conforme la profundidad del HT, es decir, los sustratos más finos se colocan en la parte superior y los más gruesas al fondo. La capa de transición evita que las partículas de la capa filtrante principal migren hacia la capa de drenaje. La capa de gravas gruesas en la zona de drenaje facilita un buen drenaje, y junto con el sistema de tuberías de vaciado, permiten la oxigenación de las capas inferiores del lecho. Para evitar la migración de las gravas finas hacia las gravas gruesas inferiores, se debe usar la regla de Terzaghi $D/d \leq 4$ (donde D corresponde a la capa de transición y d a la capa principal) (Sherard et al., 1984).

Las guías de diseño incluyen una capa superior de gravas (ej.: 4 – 8 mm), que no es obligatoria, pero que sirve para prevenir la erosión que puede generar la carga secuencial, como también, para evitar la exposición de agua en la superficie. Adicionalmente, la capa superior aumenta el aislamiento térmico y asegura temperaturas más altas dentro del filtro

durante el invierno (cerca de 1 – 2°C por cada 15 cm de capa superior). Sin embargo, la presencia de esta capa superior reduce la difusión de oxígeno a la capa principal y limita el movimiento de las plantas emergentes de tal manera que no pueden moverse y ayudar a romper la superficie durante los periodos cuando no se distribuye agua en la superficie. Ambos fenómenos llevan a la disminución de la degradación de materia orgánica particulada en la superficie de la capa filtrante y se aumenta el riesgo de colmatación. Si se debe utilizar una capa superficial, ésta debe ser limitada a un espesor de 5 – 10 cm (Langergraber, 2009). Los sustratos utilizados, así como la cantidad de cada uno de ellos se detallan a continuación (Cuadro 23, Figura 19).

Cuadro 23. Configuración de sustratos humedal de tratamiento.

Capa	Sustrato	Espesor
Superior	Grava 3/8"	10 cm
Principal	Arena Sílice	70 cm
Transición	Grava 3/8"	10 cm
Drenaje	Grava 3/4"	20 cm

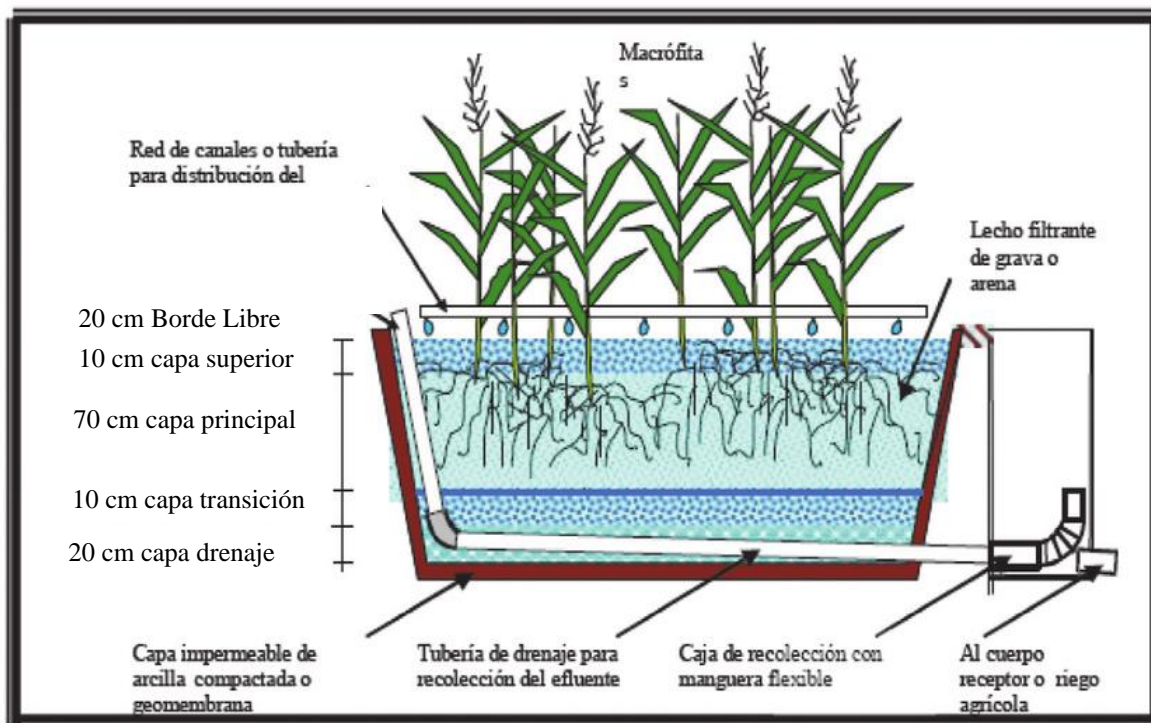


Figura 19. Representación de configuración de sustratos. Fuente: Arias (2010).

3.3.4 TRATAMIENTO TERCIARIO

Como parte del pulimento del afluente del humedal se propusieron un sistema de filtración y un sistema de cloración.

- Filtros de arena

Es un sistema de filtrado que retiene las partículas de mayor tamaño suspendidas en el agua quedando en las distintas capas de arena que, en relación, guardan distinto espesor.

- Filtración de carbón activado

Es un filtro que logra eliminar algún sabor u olor del agua, como es el caso del cloro o mercurio.

- Filtros de cartuchos o anillas

Es último paso del agua para lograr su pulido físico, el agua pasa a través de un dispositivo que contiene papel filtro con la capacidad de retener algún posible residuo suspendido en el agua de un tamaño aproximado de hasta 1 micra.

- Cloración

La desinfección es obligatoria para la eliminación de coliformes fecales residuales. El alimentador de cloro en línea de desinfección Pentair® se propone en la salida del tanque tratado (Figura 17). El cloro libre residual de 0.2-0.5 es suficiente para una desinfección completa antes de la reutilización del agua.

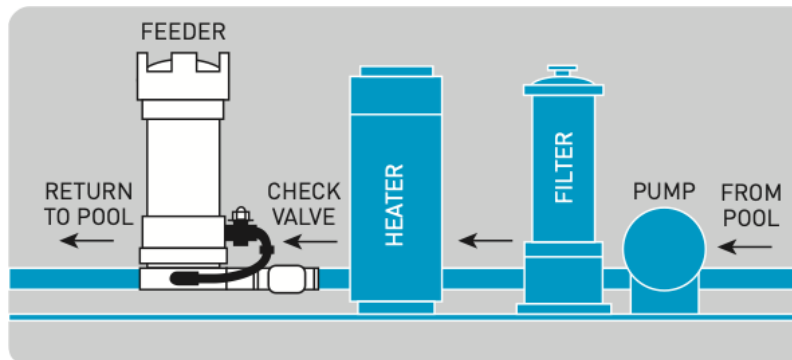


Illustration of Model 320 Feeder

Figura 20. Esquema del alimentador de cloro. Fuente: Pentair (2020).

3.3.5 RESUMEN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

Cuadro 24. Resumen del sistema de tratamiento.

Sistema	Humedal de Tratamiento
Aireación	Opcional
Tipo de Humedal	Subsuperficial Flujo Vertical
Vegetación	<i>Thypa spp</i>
Densidad Vegetal	3 plantas/m ²
Capacidad del sistema	50-70 P.E.
<i>DBO</i> ₅ diseño influente	770.0 ppm
<i>DBO</i> ₅ diseño efluente	30.0 ppm
Área superficial	130 m ²
HLR	0.04
OLR	30.0
<i>ETo</i> ¹	0.64 m ³ /d
Huella Superficial	1.8 m ² P.E.
Pretratamiento	Trampa de Grasas y Aceite
Tratamiento Primario	Biodigestor (Sedimentador)
Tratamiento Secundario	Humedal de Tratamiento
Tratamiento Terciario	Filtro sedimentos Filtro Carbón Activado Filtro Pulidor 1micra Cloración

¹ La evapotranspiración se determinó utilizando el software CROPWAT® para mediciones climáticas locales.

3.4 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

3.4.1 TERRACERÍAS

3.4.1.1 TRAZO Y NIVELACIÓN

Trazo y nivelación: Este paso consiste en la delimitación del área del humedal (puntos, distancias, ángulos y cotas). Figura 19.



Figura 21. Trazo y nivelación del terreno.

3.4.1.2 EXCAVACIÓN

Consiste en el afloje, extracción, remoción y acarreo del material natural del terreno. (Figura 20).



Figura 22. Excavación del terreno.

3.4.1.3 FORMACIÓN Y AFINE DE TALUDES

De acuerdo con la mecánica de suelos se determina la inclinación de los taludes, ancho y altura de corona y zanja de excavación (Figura 21). Es importante humedecer el terreno e ir compactando como lo indican los planos (Figura 22). Hacer pruebas de compactación (90% al proctor) una cala por talud y una por lado de la corona.

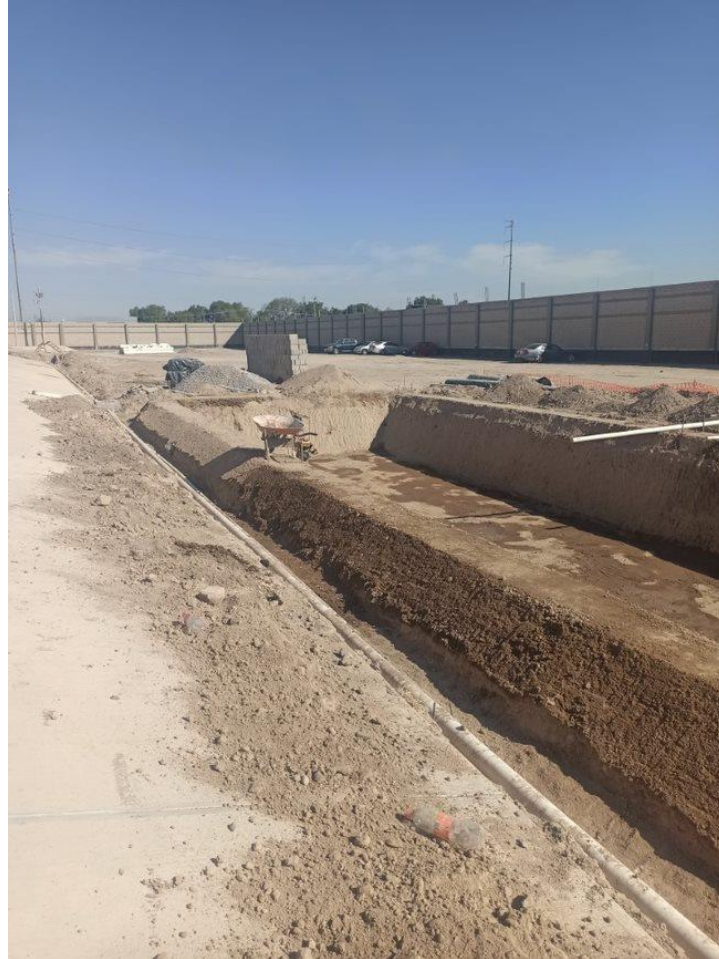


Figura 23. Taludes y zanja de excavación.



Figura 24. Compactación del terreno.

3.4.2 INSTALACIÓN DE TUBERÍAS

Previo a la impermeabilización del sistema se colocan las tuberías de entrada y de salida, esto con e fin de poder recubrir los tubos a la hora de impermeabilizar (Figura 23).



Figura 25. Colocación de tubería de entrada.

3.4.3 IMPERMEABILIZACIÓN

La parte más importante del proyecto, con la finalidad de garantizar que el agua residual pase por el sistema de tratamiento y evitar la infiltración residual al subsuelo, la impermeabilización del fondo, taludes, tuberías presentes en el humedal de tratamiento utilizando geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) con todas sus especificaciones para una correcta instalación.

La colocación debe realizarse sobre una superficie limpia y libre de elementos punzocortantes, que pudieran dañar el material afectando su capacidad impermeabilizante. Su compactación deberá ser del 95% junto con una inspección de que el terreno no presente deformaciones.

Los traslapes se realizan longitudinalmente y en el sentido de la pendiente del talud, los cuales serán únicamente unidos por termofusión y/o extrusión.



Figura 26. Impermeabilización del humedal.

3.4.4 COLOCACIÓN DE MEDIO FILTRANTE

Consiste en el llenado del humedal con material filtrante o granular, una vez ya instalada la geomembrana, se utilizó grava $\frac{3}{4}$ y $\frac{3}{8}$, y arena sílice.



Figura 27. Colocación de cama arena sílice, grava $\frac{3}{8}$ y posteriormente grava $\frac{3}{4}$.

3.4.5 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN Y RECOLECCIÓN

Para la distribución y recolección del agua se instalará tubería de PVC sanitario de 4", la cual tendrá que ser ranurada y su arreglo será en tresbolillo sobre la media caña superior del tubo.



Figura 28. Sistema de distribución de tuberías.

3.4.6 SIEMBRA DE VEGETACIÓN

Para la siembra de las plantas se debe colocar la raíz en el fondo y se rellenará con el mismo material filtrante hasta el nivel que se tenía inicialmente. A cada metro cuadrado se sembrarán tres plantas colocándolas en forma de pirámide triangular.



Figura 29. Siembra de vegetación.

3.4.7 MANTENIMIENTO

Algunas de las acciones de mantenimiento recomendadas se presentan en el cuadro 24.

Cuadro 25. Mantenimiento del sistema de tratamiento.

Componente	Acciones	Periodicidad	Consecuencias
Trampa de Grasas y Aceites	Desazolve de la Trampa	Semanal	Baja remoción de este contaminante, por lo que aumenta la carga orgánica del sistema.
Biodigestor	Purga de Lodos	Anual	Traspaso de Sólidos al humedal, lo cual puede causar colmatación del sistema
Humedal de Tratamiento	Poda y cuidado de la vegetación	Mensual	Vegetación Alta
	Limpieza de tuberías de entrada/salida	Bimensual	Taponamiento de tuberías

3.4.7.1 EXTRACCIÓN DE GRASAS Y FLOTANTES

La extracción de grasas y flotantes se realiza de forma manual o con sistemas de bombeo mediante barrido de la superficie con rastrillo o espátula tamizadora.



Figura 30. Limpieza de trampa de grasas y aceites.

3.4.7.2 PURGA DE LODOS

Para realizar el mantenimiento de purga de fangos basta con abrir la válvula situada en el depósito de fangos, los fangos tardarán unos segundos en salir. Tan pronto como comience a salir el agua residual, cierre la válvula. El lodo se puede compostar o estabilizar químicamente agregando cal.



Figura 31. Purga de lodos.

3.4.7.3 PODA Y CUIDADO DE LA VEGETACIÓN

Retirar plantas en mal estado o distintas a las cultivadas en el humedal, haciendo uso de herramientas de jardinería. Si hay plagas, agregue pesticidas biodegradables.



Figura 32. Poda de vegetación

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL TRATAMIENTO

4.1 MONITOREO DEL SISTEMA

Una vez concluida la implementación del sistema, se consideró un periodo de arranque y adaptación de 2 meses antes de la etapa de monitoreo, con la intención de asegurar una mayor área de cobertura en el crecimiento vegetal y ajustar los detalles técnicos Kadlec y Wallace (2009) establecen un tiempo de maduración o estabilización en humedales artificiales de 30 a 60 días dependiendo del tipo de planta que se utiliza.

Una mayor área de cobertura sugiere un desempeño estable respecto a la remoción de contaminantes; esto debido a que los microorganismos tienen una mayor superficie para adherirse y crecer a través de la formación de biopelícula en la superficie tanto del medio poroso como en las raíces de las especies plantadas (Lin et al. 2002).

El monitoreo del sistema se realizó durante 11 meses (02 agosto 2021 al 27 Junio del 2022).

4.2 PLAN DE MUESTREO

El monitoreo se dividió en diferentes etapas en función de la tasa de recirculación a utilizar (Cuadro 25). Las muestras se tomaron de acuerdo con la norma mexicana NMX-AA-003-1980 y NMX-AA-030/2-SCFI-2011 entre 10:30 am y 12:00 pm.

Cuadro 26. Plan de muestreo.

Etapa	Duración	Frecuencia de Muestreo	Tasa de Recirculación	Flujo Recirculado
Adaptación del humedal	60 días	15 días	100%	$6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$
Primera Evaluación	214 días - 7 meses	15 días	100%	$6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$
Segunda Evaluación	58 días - 1.9 meses	7 días	75%	$4.5 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$
Tercera Evaluación	30 días	7 días	50%	$3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$
Cuarta Evaluación	30 días	7 días	35%	$2.1 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$

4.3 PUNTOS DE MUESTREO

Para estimar el desempeño del sistema de tratamiento se monitoreó la calidad del agua en dos puntos de muestreo a lo largo del tren de tratamiento:

- Influyente (P1): Corresponde al registro donde se mezclan las 3 descargas de agua residual.
 - Plantas Piloto.
 - Proceso de industria alimentaria.
 - Baños de Almacén.
- Efluente (P2): Corresponde a la cisterna de agua tratada, una vez cumplido el TRH dentro del humedal el agua es colectada en el fondo del humedal por un tubo transversal ranurado, el efluente del humedal de tratamiento que se colecta en la cisterna ya es apto para su utilización en riego.

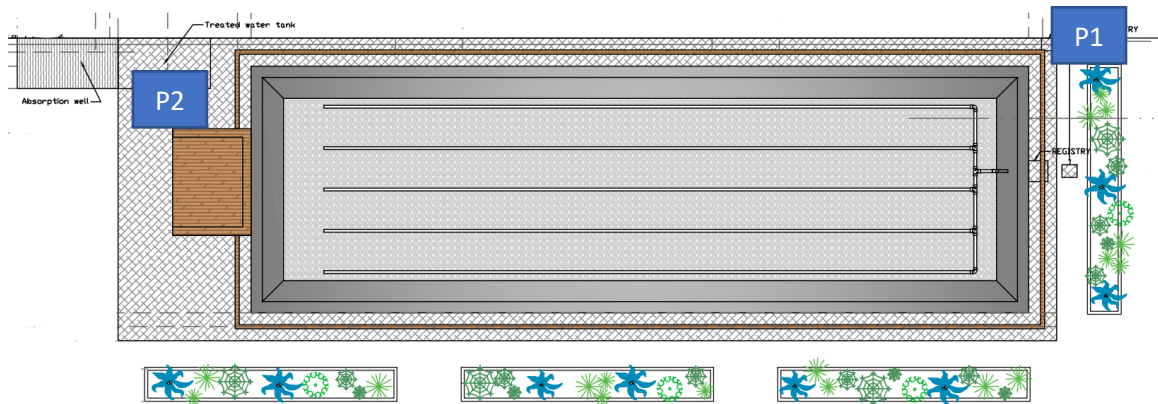


Figura 33. Puntos de muestreo en el HT.

4.4 PARÁMETROS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

El seguimiento del sistema de tratamiento incluyó las determinaciones (Cuadro 26) en cada punto de muestreo para evaluar la calidad de agua.

Cuadro 27. *Parámetros a evaluar dependiendo de la etapa del proyecto.*

Etapa	Duración	Frecuencia de Muestreo	Tasa de Recirculación	Parámetros a Evaluar Rutinarios*
Adaptación del humedal	60 días	15 días	100%	HLR/OLR /DQO/SST /pH/CE/T
Primera Evaluación	214 días - 7 meses	15 días	100 %	HLR/OLR /DQO/SST /pH/CE/T
Segunda Evaluación	58 días - 1.9 meses	15 días	75%	HLR/OLR /DQO/SST /pH/CE/T
Tercera Evaluación	30 días	15 días	50%	HLR/OLR /DQO/SST /pH/CE/T
Cuarta Evaluación	30 días	15 días	35%	HLR/OLR /DQO/SST /pH/CE/T

**Valores a Evaluar conforme la frecuencia de muestreo.*

4.5 PERIODO DE ADAPTACIÓN

El periodo de adaptación del sistema comprendió un periodo de 6 semanas, del 02 de Agosto del 2021 al 27 de Junio del 2022, al inicio de las operaciones del humedal se contaba con una cobertura vegetal de 1 planta por m², con una tasa de recirculación del 100% con el fin mantener al sistema lo más saturado posible y con esto acelerar el tiempo de adaptación. Al principio el humedal de tratamiento tuvo una eficiencia de remoción de DQO del 44% y conforme fue aumentando la cobertura vegetal y por consiguiente el número de microorganismos para la depuración de materia orgánica, el sistema alcanzo una eficiencia de remoción de DQO del 83% Cuadro .En cuanto al pH el humedal se mantuvo cercano a la neutralidad por lo que este pH era el óptimo para el crecimiento de los microorganismo 6.5-8 (). Con respecto a la conductividad se mostró una disminución de éste parámetro, se puede deber en conjunto con los SST que también disminuyeron debido a que el sustrato utilizado sirve como sistema de filtración, por lo que los SST removidos en el humedal tenían aportación a la CE, otro aspecto importante a considerar es la carga orgánica con la cual se mantuvo trabajando el humedal, debido a que tiende a ser el límite superior reportado en la bibliografía para humedales de tratamiento subsuperficiales de flujo vertical (40 gDBO₅/m²).

4.6 ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA

Las muestras de agua se recolectaron en cada uno de los puntos antes mencionados, las condiciones ambientales que se observaron, las mediciones de campo y los resultados de la caracterización fisicoquímica realizados se describen a continuación.

4.6.1 PARÁMETROS IN SITU

Las principales variables que afectan la degradación de la materia orgánica y el nitrógeno de los HT son el pH, el oxígeno disuelto (OD) y la temperatura (Saeed y Sun 2012). Esto se debe a que los microorganismos involucrados en el tratamiento biológico son sensibles a estos parámetros. Los valores promedio y las desviaciones estándar de las condiciones ambientales a las que trabajó el HT incluyen temperatura, CE, pH que se muestran en el cuadro 27.

Cuadro 28. Valores promedio (\pm desviación estándar) de parámetros medidos in situ

Parámetro	TR	(P1)	(P2)	N
Temperatura	100%*	27.4 \pm 1.8	25.4 \pm 1.3	4
	100%	25.2 \pm 2.6	22.1 \pm 2.5	11
	75%	25.1 \pm 2.2	23.3 \pm 2.3	4
	50%	25.1 \pm 4.1	23.5 \pm 4.5	3
Conductividad eléctrica	100%*	1236.8 \pm 265.6	925.3 \pm 404.4	4
	100%	1415.5 \pm 514.3	1161.8 \pm 417.1	11
	75%	1572.3 \pm 506.7	1344.8 \pm 532.4	4
	50%	1482.7 \pm 315.4	2181.7 \pm 229.7	3
pH	100%*	8.0 \pm 0.8	7.9 \pm 0.4	4
	100%	6.8 \pm 0.8	7.2 \pm 0.3	11
	75%	7.2 \pm 0.7	7.6 \pm 0.1	4
	50%	6.9 \pm 0.2	7.7 \pm 0.1	3

*Etapa de Adaptación del Humedal.

4.6.1.2 TEMPERATURA

A lo largo del seguimiento del HT en general no se observó una diferencia significativa en la variación de la temperatura del influente con respecto a la temperatura del efluente en cada etapa de evaluación variando la tasa de recirculación, esta variación mínima se debe a la capa superior de grava utilizada en el humedal que sirve como aislamiento térmico y asegura una temperatura uniforme con respecto al exterior (cerca de 1–2°C por cada 15 cm de capa superior). Sin embargo, como el seguimiento del humedal de tratamiento se realizó 1 año (02 agosto 2021 al 05 agosto del 2022) si existe una variación de temperatura con respecto a las estaciones del año (Figura 32).

Los valores promedio obtenidos de la temperatura tanto del influente como del efluente son entre 22–25°C, estas temperaturas favorecen a la disminución de la generación de lodos debido a la influencia que tiene la temperatura sobre la tasa específica de respiración endógena (69). Esto favorece a que el tiempo de vida útil del HT aumente ya que, al existir una menor producción de lodo, menor riesgo de colmatación del HT.

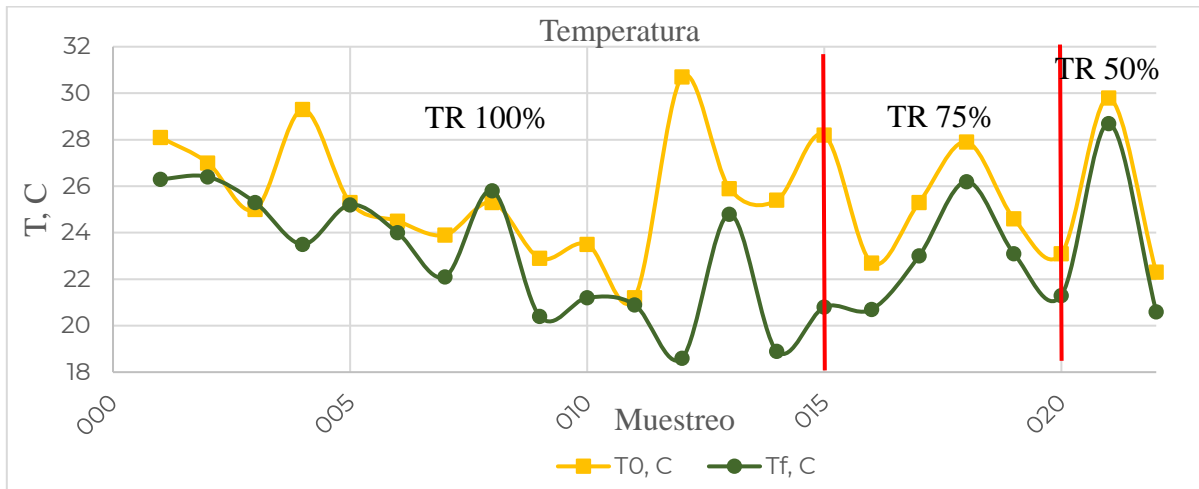


Figura 34. Valores de temperatura a lo largo del seguimiento del HT.

4.6.1.3 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La CE es la que presenta mayor variación de las condiciones in situ, incluso en los últimos muestreos se presenta una CE mayor en el efluente con respecto al influente. A pesar de que la NOM-001-SEMARNAT-2021 no presenta límites máximos permisibles con respecto a la CE en su etapa de proyecto presentaba un límite máximo permisible de $<1500 \mu S cm^{-1}$, por lo que se puede mencionar que el efluente presenta valores altos de CE, el aumento en la CE se debe a la mineralización de los contaminantes, principalmente a las grasas y aceites, al ser efluentes de industria alimentaria, presentan altas concentraciones de grasa (Figura 33), por lo que al presentar una acumulación de éstas en el humedal aportan a la CE, se tiene observado que los periodos en los cuales se tiene un buen mantenimiento de las trampas de grasas y aceites la CE del efluente es menor que la del influente, con el fin de obtener un efluente de buena calidad, es necesario contar con una etapa de tratamiento con la capacidad de remover las sales disueltas que aportan a dicha CE.

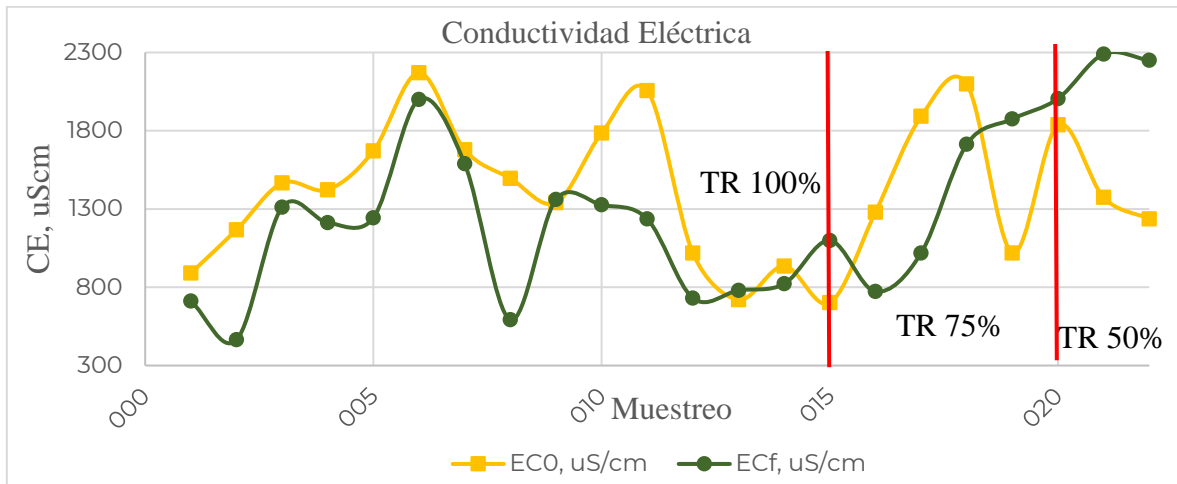


Figura 35. Valores de conductividad eléctrica a lo largo del seguimiento del HT.

4.6.1.4 pH

El pH en el influente presentó considerables variaciones a lo largo del monitorio, esto se debe a que la empresa dentro de sus instalaciones dosifica sosa (NaOH) para regular el pH del influente, por lo que solo se buscaba que el pH tendiera a la neutralidad, sin embargo, no es un proceso que lo tengan estandarizado para siempre obtener el mismo valor de pH. En los muestreos 12 y 13 (Figura 34) se puede observar una abrupta disminución en el pH de entrada, este evento fue ocasionado por un deslavado que sufrió la planta de pintura epóxica de sus instalaciones causando así que el pH del influente tuviera valores de 5.39.

En caso contrario el pH del efluente es el que presenta menores variaciones de los parámetros medidos in situ, presentando tendencias a ser más básico que el influente la mayoría de las veces, tendiendo a valores entre 7.2 y 7.9. El pH óptimo para los tratamientos biológicos es entre 6 y 8 (Tchobanoglous, 2014), por lo que los valores obtenidos en el efluente favorecen el rendimiento del HT, a su vez, el pH del efluente favorece los procesos de nitrificación (pH entre 7 y 8.5), los valores de pH fuera de este rango inhiben los procesos de nitrificación. A pesar de que no se realizó la medición de alcalinidad del influente se puede inferir que tiene concentraciones por encima de los 40 mg/L de alcalinidad debido a que los procesos de nitrificación tienden a causar reducciones drásticas en el pH del efluente (López, 2017). Contrario a la nitrificación, la desnitrificación usa el consumo de protones para producir alcalinidad. Debido a la naturaleza del nitrato, es un aceptor de electrones, se generan 3.57 mg de carbonato de calcio por cada mg de nitrato que se ha desnitrificado (López, 2017). Por lo tanto, la pérdida neta de alcalinidad disminuye cuando el proceso de desnitrificación se lleva a cabo, manteniendo así concentraciones de alcalinidad por encima de 40 mg/L, como resultado, el valor de pH por encima de 7.

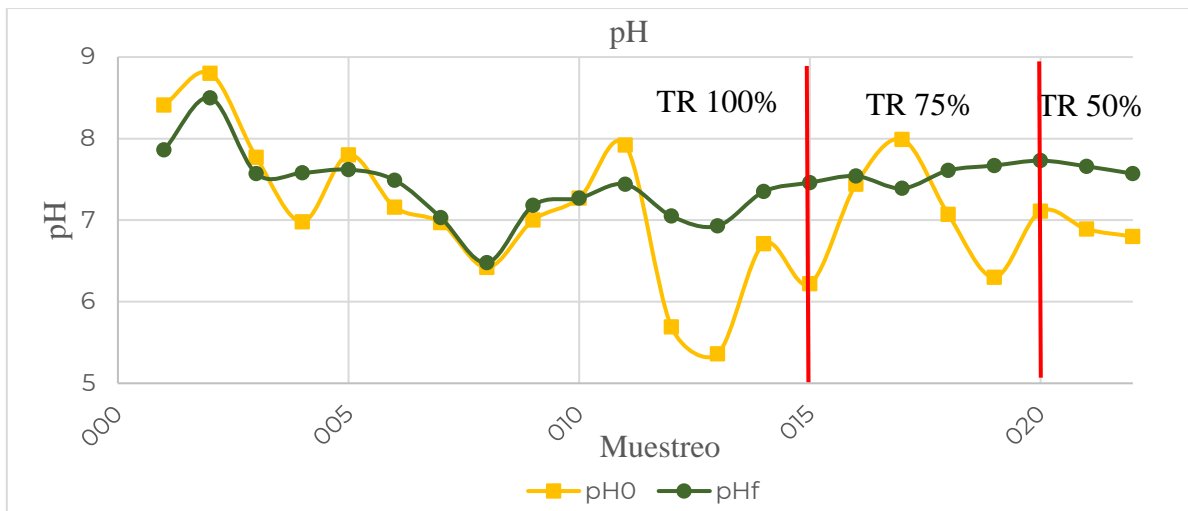


Figura 36. Valores de pH a lo largo del seguimiento del HT.

4.6.2 PARÁMETROS MEDIDOS EN LABORATORIO

La concentración en el influente de estos parámetros (SST, DQO y Turbidez) son los que muestran mayor variación debido a que la concentración de éstos depende de la producción que se tenga en el día por la industria alimentaria (cárnicos, lácteos, confitería y panadería), por lo que dependiendo de la demanda de producción y el tipo de producción es la calidad del agua, no fue posible reportar a tal grado específico el aporte de cada etapa de producción debido a temas de confidencialidad.

Cuadro 29. Valores promedio (\pm desviación estándar) de parámetros medidos en laboratorio.

Parámetro	TR	(P1)	(P2)	Eficiencia Remoción	n
Sólidos Suspendidos Totales	100%*	174.5 \pm 47.8	34.5 \pm 20.7	81.3	4
	100%	275.6 \pm 263.7	13.4 \pm 5.2	92	11
	75%	359.3 \pm 116.9	14.0 \pm 8.2	95.5	4
	50%	229.7 \pm 31.8	8.3 \pm 6.4	96.6	3
Demanda Química de Oxígeno	100%*	990.5 \pm 321.0	462.0 \pm 299.6	56.1	4
	100%	1322.9 \pm 731.2	178.6 \pm 167.2	86.1	11
	75%	1941.5 \pm 479.2	66.0 \pm 20.3	96.3	4
	50%	1359 \pm 542.9	119.3 \pm 124.5	89.0	3
Turbidez	100%*	-	-	-	-
	100%	254.3 \pm 376.8	15.9 \pm 8.8	87.5	11
	75%	238.8 \pm 128.8	20.9 \pm 13.1	91.2	4
	50%	187.7 \pm 51.1	13.5 \pm 2.5	92.7	3

*Etapa de Adaptación del Humedal.

4.6.2.1 SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

En la etapa de adaptación del HT la eficiencia de remoción de este contaminante presentó los valores más bajos de todo el estudio con 81.3% (Cuadro 28), debido a que el principal mecanismo de remoción de los SST en los HT es la filtración, en esta etapa de evaluación lo único que aportaba a la filtración es el sustrato utilizado, conforme fue proliferando la vegetación el espacio disponible entre las partículas de sustrato fue disminuyendo por el enraizamiento de las plantas, ayudando así a la filtración de éstos, una vez terminada la etapa de adaptación del HT se mantiene constante la eficiencia de remoción con valores mayores al 90%, a su vez, se observó que independientemente de la tasa de recirculación no se ve afectada la eficiencia de remoción (Figura 35).

Como se mencionó en las discusiones de pH, en los muestreos 12 y 13 ocurrió un evento de pintura epóxica, para el parámetro de SST, este evento solo afectó en el muestreo 12 donde se puede observar un aumento de casi 100% afectando así a la desviación estándar teniendo valores cercanos a la media (Cuadro 28). A pesar de este aumento de concentración la eficiencia de remoción no se vio afectada manteniendo la concentración promedio del efluente (Figura 35).

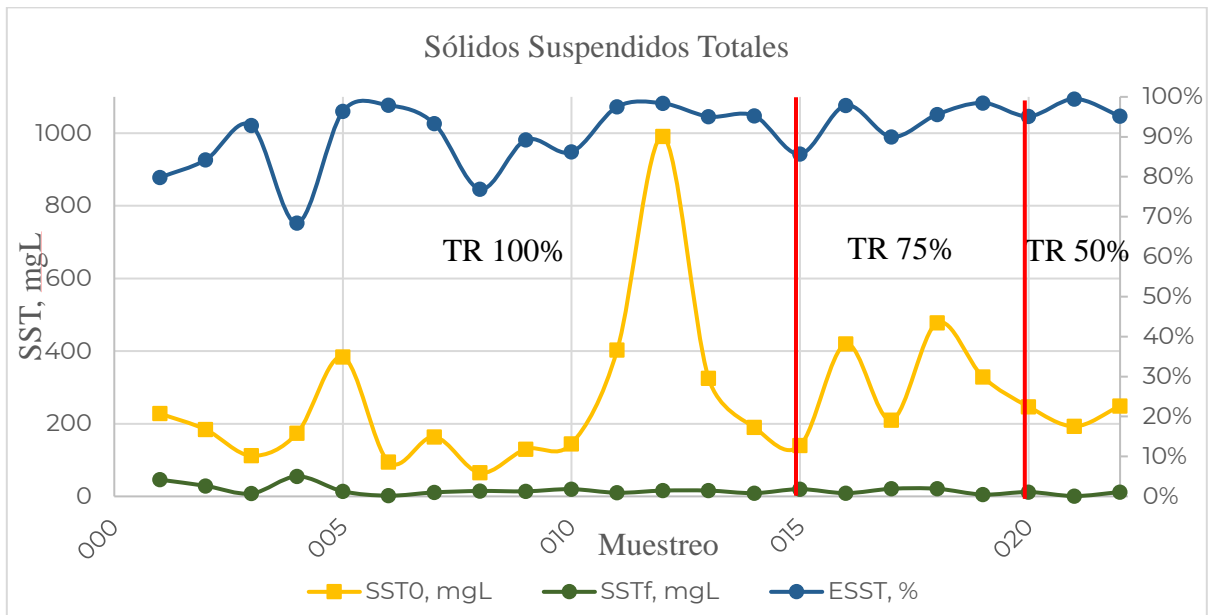


Figura 37. Valores de SST a lo largo del seguimiento del HT.

4.6.2.2 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

En la etapa de adaptación del HT la eficiencia de remoción de este contaminante presentó los valores más bajos de todo el estudio con 56.1% (Cuadro 28), el principal mecanismo de remoción de la materia orgánica en los sistemas de biológicos aerobios de agua residual es la oxidación por medio de microorganismos, la baja eficiencia de remoción en esta etapa de evaluación se debe a 2 factores:

- **Microorganismos:** Estos organismos unicelulares crecen mientras oxidan la materia orgánica. Una forma de reproducción de las bacterias se llama fisión binaria, consiste en que la célula se divide, originando dos nuevas células. El tiempo que le toma a la célula realizar cada división varía entre 20 minutos o varios días (Tchobanoglous, 2014), por eso es que en etapa de evaluación no se contaba con gran cantidad de microorganismos capaces de oxidar la ma
- **Cobertura vegetal:** Se contaba con una cobertura vegetal de 1 planta por m^2 (150 plantas), al ser las plantas a través de sus raíces el soporte para la proliferación de microorganismos, en esta etapa no se contaba con una amplia superficie de raíces para la generación de biopelículas.

Terminada la etapa de adaptación del HT se comenzó la evaluación del HT utilizando tasas de recirculación del 100% (muestreo 5-15, Figura 37) se observó que la eficiencia de remoción fue del 86.1% y la concentración promedio en el efluente fue de 178.6 ppm, a pesar de que el valor de la concentración del efluente es aproximadamente el triple del límite máximo permisible de la NOM-001-SEMARNAT-2021 descarga en suelo para riego de áreas verdes, el cual es 60 ppm de DQO, como se mencionó durante esta etapa se contó con el incidente de la pintura epóxica, para este parámetro ese suceso afecto en 2 medidas: aumento en las concentraciones del influente de más del doble y muerte de los microorganismos por las propiedades bactericidas de la pintura epóxica ocasionando así que no hubiera microorganismos disponibles para la remoción de materia orgánica, sumado a este evento, a lo largo de la evaluación del sistema de tratamiento se observó que realizar una mala operación y mantenimiento de las trampas de grasas y aceites condiciona la calidad del efluente, ya que una de las principales características, es que las grasas son el componente de las aguas residuales que tiene una mayor tendencia a oxidarse. Esto provoca que, al llegar al HT, fijen rápidamente el oxígeno disuelto disponible, además, las grasas y aceites tienen tendencia a flotar, debido a que su densidad es inferior a la del agua, lo que genera capas en la superficie de los HT, dificultando la transferencia de oxígeno. Cada kg de grasa supone entre 2 y 2.5kg de DQO, lo que implica que las grasas y aceites en su proceso oxidativo, consumen importantes cantidades del oxígeno disuelto en los HT, aumentando en gran medida el parámetro DQO por lo que debido a esto se obtuvo dicho resultado. Debido a la naturaleza de las grasas, estas tienden a oxidarse, pero no son fácilmente degradables aeróbicamente, por lo que éstas pueden continuar aguas abajo del HT, manteniéndose presentes en todo el proceso incluso, por lo que pueden llegar a colmatar el sustrato del humedal y los filtros reduciendo así la vida útil de éstos.

En la etapa de evaluación utilizando tasas de recirculación del 75% se obtuvieron los mejores resultados de todo el estudio con eficiencias de remoción del 96.3% y una concentración promedio del efluente de 66 mg L^{-1} DQO, obteniendo así valores muy cercanos a los límites máximos permisibles, durante esta etapa se pudieron observar cosas interesantes a recalcar: la concentración del influente tendió a aumentar con respecto a las primeras etapas debido a la adición de nuevas corrientes al influente, en este caso se añadieron unos baños a la aportación del influente, con este cambio la concentración del influente es mayor a la concentración de diseño del sistema por lo que en ocasiones el HT trabaja por encima de la capacidad de diseño, a pesar de esto las concentraciones del efluente no presentaron variación por lo que con esto se observa la robustez de los HT en comparación de tecnologías convencionales que al existir altas cargas o capacidades superiores a las de diseño existe un desajuste en el sistema. Es importante mencionar que durante esta etapa no existía una concentración de grasas y aceites en el influente, debido a que se realizaba un mantenimiento correcto de las trampas de grasas y aceites.

En la etapa de evaluación utilizando tasas de recirculación del 50% se obtuvieron resultados no muy favorecedores tanto al cumplimiento de normativa como a la hipótesis planteada, con eficiencias de remoción del 89% y una concentración promedio del efluente de 119.3 ppm DQO, ya que durante este periodo de estudio del HT el último muestreo presentó una concentración de efluente de 262 ppm de DQO (muestreo 22, Figura 37), este valor alteró el promedio que se tenía en esta etapa que sin contar dicho muestreo el promedio del efluente era de 48 ppm DQO, lo que ocurrió en este último muestreo es que se contaba nuevamente con una saturación de grasas y aceites en las trampas por no haber tenido el correcto mantenimiento. El diseño de la trampa de grasas y aceites consta de 4 cámaras, esperando así que la concentración de grasas y aceites disminuya conforme el paso de cada cámara, en la Figura 38 se muestra la acumulación de este contaminante a lo largo de la trampa.



38

Figura 38. Cámaras 2 y 4 respectivamente de la trampa de grasas y aceites.

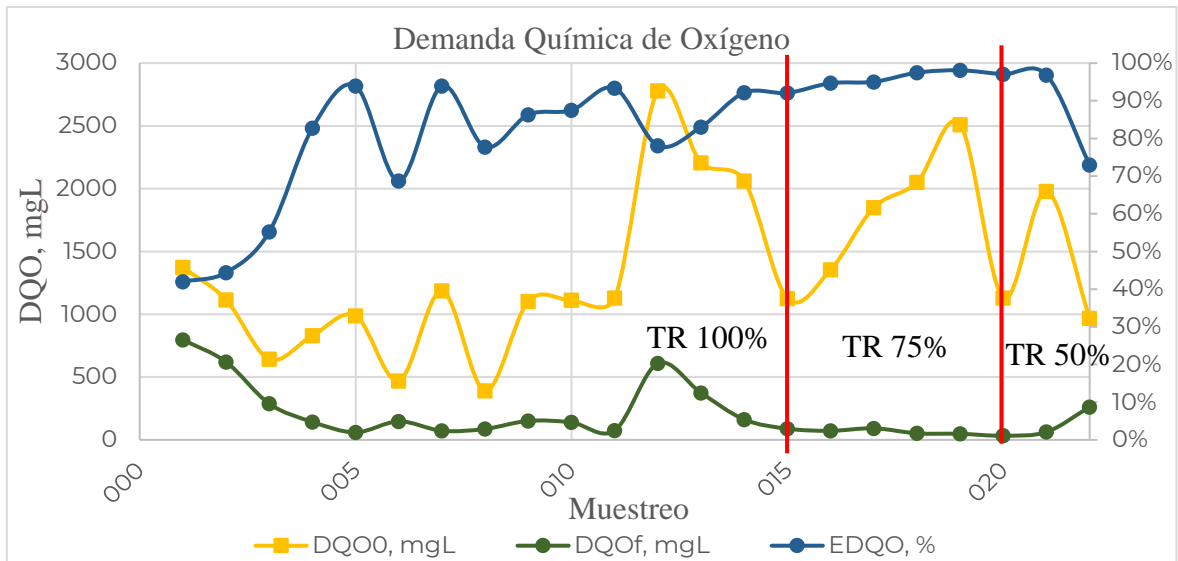


Figura 39. Valores de DQO a lo largo del seguimiento del HT.

No fue posible utilizar tasas de remoción menores al 50% por el compromiso que se tenía con la empresa de entregar un sistema de tratamiento que cumpla la NOM-001-SEMARNAT-2021 descarga en suelo para riego de áreas verdes, a pesar de esto, por lo observado en el estudio es posible utilizar tasas de recirculación del 50% en los HT obteniendo altas eficiencias de remoción (>90%) y dando cumplimiento a la normativa, además de que con el uso de estas tasas de recirculación se optimiza el consumo energético y por consiguiente los costos operativos del sistema de tratamiento.

4.6.2.3 TURBIDEZ

Este parámetro no contiene límites máximos permisibles en la NOM-001-SEMARNAT-2021, debido a que está relacionado con los SST y SDT que son los que aportan a la turbidez y color del agua, con este parámetro puede servir como indicador visual del agua (grado de

transparencia, Figura 38), como se mencionó que este parámetro tiene relación con los SST y sobre este parámetro se obtuvieron eficiencias de remoción mayores al 95% la turbidez promedio reportada en el efluente a lo largo del seguimiento es de 8.1 NTU (Figura 39).



Figura 40. Influyente vs Efluente.

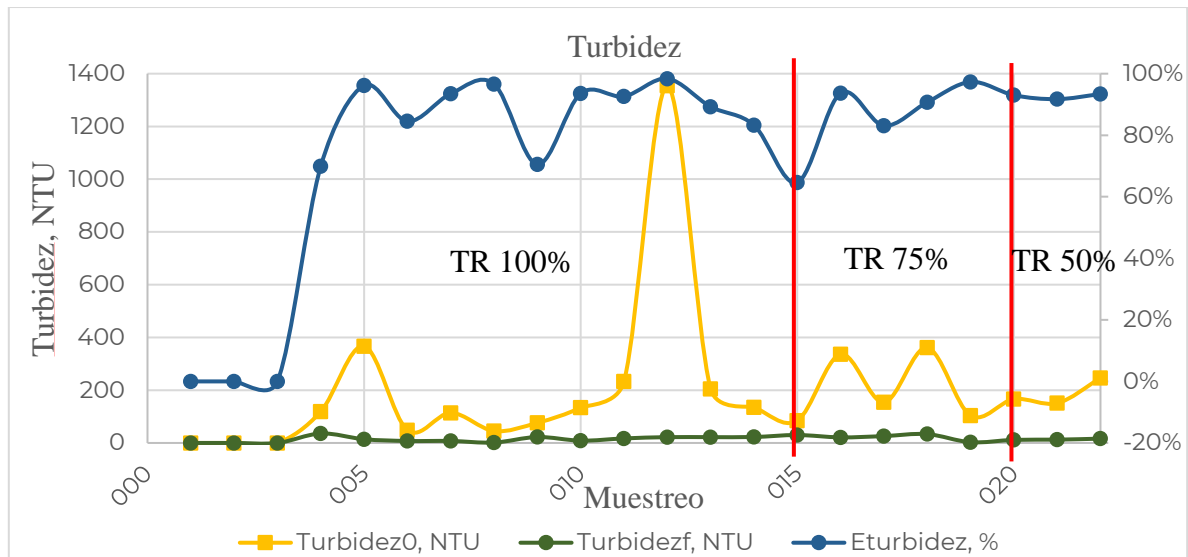


Figura 41. Valores de Turbidez a lo largo del seguimiento del HT.

4.7 CUMPLIMIENTO DE NORMATIVA

Al 27 junio del 2022 con el uso de HT como tratamiento secundario se tienen cumplimiento de todos los parámetros medidos en el estudio (Cuadro 29) de la normativa actual NOM-001-SEMARNAT-1996, los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-2021 entran en vigor el 3 de abril del 2023, para darle el cumplimiento a la normativa que entrará en vigor se cuenta en el sistema con un tratamiento terciario a base de filtración y cloración, la cual sirve como pulimiento y oxidación de la materia orgánica remanente pudiendo así dar cumplimiento a la normativa.

*Cuadro 30. Comparación de resultados con respecto a la NOM-001-SEMARNAT-2021
Uso en Riego.*

Parámetro	Unidades	Concentración 27/06/2022	NOM-001- SEMARNAT 2021	NOM-001- SEMARNAT 1996
Temperatura	°C	20.6	35	-
pH	-	7.57	6.5-8.5	5-10
CE	μS/cm	2250	-	-
SST	ppm	12	30	150
DQO	ppm	262	60	-
DBO*	ppm	131	-	150

**Estimación del valor en función de la relación de DBO/DQO igual a 0.5 por la naturaleza de las aguas residuales.*

4.8 COMPARACIÓN CON OTROS HUMEDALES DE TRATAMIENTO

A pesar de que cada humedal de tratamiento no tendrá el mismo rendimiento debido a las condiciones ambientales, naturaleza y concentración del influente, se realizó una comparativa con otros estudios reportados de humedales de tratamiento subsuperficiales de flujo vertical intensificados mediante recirculación (Cuadro 31).

Cuadro 31. Comparativo trabajo de tesis con otros humedales de tratamiento

Humedal	Influente	Área (m^2 PE^{-1})	OLR ($g\ DQO$ $m^{-2}d^{-1}$)	Tasa Recirculación (%)	ER SST (%)	ER DQO (%)	Autor
Piloto	Porcino	1.6	86	0	91.2	77.6	1
Piloto	Porcino	1	133	50	49- 77	-	2
Piloto	Porcino	0.5	265	50	49- 77	-	2
Piloto	Doméstico	0.5	270	0	90	84	3
Real	Doméstico	1.1	350	50	90	83	4
Real	Doméstico	1.6	300	100	95	90	4
Piloto	Doméstico	1.4	83	60	73- 76	80- 94	5
Experimento realizado - Real	Industria alimentaria	1.8	110	100	92	86	6
				75	95	96	
				50	97	90	

1 Sun et al. (2003), 2 He et al. (2006), 3 Sklarz et al. (2009),

4 Prost-Boucle & Molle (2012), 5 Foladori et al. (2013), 6 Villanueva (2022).

En el experimento realizado en este trabajo de tesis se obtuvieron eficiencias de remoción mayores a lo reportado en otros experimentos, como se mencionó previamente existen diversos factores que afectan al rendimiento de los humedales de tratamiento, algo importante que se observó en la comparativa es que existen 2 estudios que presentan una carga orgánica similar ($86\ g\ DQO\ m^{-2}d^{-1}$) al experimento realizado en este trabajo ($110\ g\ DQO\ m^{-2}d^{-1}$) presentan eficiencias de remoción similar a la obtenida en el experimento. Esto se debe a que las guías de diseño ÖNORM (2009) menciona que existe una tasa máxima de $80\ g\ DQO\ m^{-2}d^{-1}$, por lo que se corrobora lo mencionado en las guías de diseño.

CONCLUSIONES

La adaptación de los humedales se puede optimizar utilizando tasas de recirculación del 100% ya que se tiene un aporte de agua mayor para las plantas, en comparación que si solo se opera de manera convencional los HT subsuperficiales de flujo vertical que la alimentación es intermitente, teniendo así lapsos en los cuales la planta no recibe agua o no recibe la suficiente.

Considerando una superficie de $1.8 \text{ m}^2/\text{P.E}$ en este HT subsuperficial de flujo vertical, se obtuvieron eficiencias de remoción mayores al 90% para DQO cuando la concentración del influente está dentro de la capacidad de diseño del HT ($<1400 \text{ ppm DQO}$), los resultados sugieren que cuando se supera la capacidad de diseño con concentraciones de hasta 2780 ppm DQO puede ser tratado por el HT obteniendo eficiencias de remoción del 78%. El efecto de dilución inducido por la recirculación es importante para alcanzar concentraciones en el efluente que cumplan con la NOM-001-SEMARNAT-2021 descarga en suelo para riego de áreas verdes. La eficiencia de remoción de SST y Turbidez se mantuvieron bastante estables con valores mayores al 95% incluso cuando las concentraciones de SST son de hasta 991 ppm .

A pesar de los buenos y estables rendimientos en el transcurso de un año, las concentraciones del efluente a veces superan los límites máximos permisibles establecidos en la normativa debido a concentraciones del influente superiores a la capacidad de diseño. En tal condición, se cuenta con un sistema de tratamiento terciario cuya funcionalidad es darle un pulimiento al agua capaz de depurar los contaminantes remanentes del HT a base de filtración y cloración pudiendo así dar cumplimiento a la normativa.

Se recomienda tener el correcto mantenimiento de las trampas de grasas y aceites para evitar el paso de estas hacia el humedal, las cuales además de aumentar el parámetro de DQO y tener incumplimientos normativos, reducen el tiempo de vida útil del sistema de tratamiento, al HT afecta en el sistema de distribución tapando las ranuras de alimentación hacia el humedal, al sustrato lo afecta en el sentido de que se forma una capa superficial impidiendo la filtración del agua y la transferencia de oxígeno, deteriorando las funciones microbiológicas, y por último como el HT no es capaz de depurarlas al pasar por los sistemas de filtración se forma una capa en los filtros deteriorándolos y aumentando la presión en la línea de distribución afectando también así al sistema de bombeo.

Los HT es una tecnología de tratamiento confiable que se puede aplicar a todo tipo de aguas residuales, incluidas las aguas residuales, las aguas residuales industriales y agrícolas, los lixiviados de vertederos y la escorrentía de aguas pluviales. La contaminación se elimina a través de los procesos que son comunes en los humedales naturales, pero en los HT, estos procesos se llevan a cabo en condiciones más controladas. Los HT subsuperficiales de flujo vertical son muy efectivos en la eliminación de materia orgánica, sólidos en suspensión y nitrificación.

Una de las principales ventajas de los HT con respecto a las tecnologías convencionales es que requieren un aporte de energía muy bajo o nulo y, por lo tanto, los costos de operación y mantenimiento son mucho más bajos. Además del tratamiento, los HT a menudo se diseñan como ecosistemas de propósito doble o múltiple que pueden brindar otros servicios ecosistémicos, como el control de inundaciones, el secuestro de carbono o el hábitat de la vida silvestre

BIBLIOGRAFÍA

- Arango, Á., Luis, R., & Garcés, F. (2007). Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Produccion Mas Limpia*, 2(2), 23–31.
- Arias, C. (2017). *Humedales para tratamiento* (IWA (Ed.); 1st ed.).
- Arias Martínez, S. A., Betancur Toro, F. M., & Salazar Giraldo, J. P. (2010). *Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas*.
- Avery, L. M., Frazer-Williams, R. A. D., Winward, G., Shirley-Smith, C., Liu, S., Memon, F. A., & Jefferson, B. (2007). Constructed wetlands for grey water treatment. *Ecology and Hydrobiology*, 7(3–4), 191–200. [https://doi.org/10.1016/S1642-3593\(07\)70101-5](https://doi.org/10.1016/S1642-3593(07)70101-5)
- Baptista, J. D. C., Donnelly, T., Rayne, D., & Davenport, R. J. (2003). *Microbial mechanisms of carbon removal in subsurface flow wetlands*. <https://iwaponline.com/wst/article-pdf/48/5/127/423428/127.pdf>
- Blanco, I., Molle, P., Sáenz de Miera, L. E., & Ansola, G. (2016). Basic Oxygen Furnace steel slag aggregates for phosphorus treatment: Evaluation of its potential use as a substrate in constructed wetlands. *Water Research*, 89, 355–365. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.064>
- Brix, H. (2001). Media selection for sustainable phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands. *Water Science & Technology*, 44(11–12), 47–54.
- Brix, H., & Arias, C. A. (2005). Danish guidelines for small-scale constructed wetland system for onsite treatment of domestic sewage. *Water Science and Technology*, 51, 1–9.
- Brix, H., & Johansen, N. H. (2004). Guidelines for the Establishment of Reed Bed Systems up to 30 PE (Retningslinier for etablering af beplantede filteranlæg op til 30 PE). *Økologisk Byfornyelse Og Spildevandsrensning*, 52.
- Carvalho, P. N., Arias, C. A., & Brix, H. (2017). Constructed wetlands for water treatment: New developments. In *Water (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 6). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w9060397>
- CONAGUA. (2019). *Estadísticas del Agua en México*.
- Condorchem Envitech. (2015). *TRATAMIENTO DE EMULSIONES (AGUAS RESIDUALES ACEITOSAS)*.
- Cooper, P. (1999). A review of the design and performance of vertical-flow and hybrid reed bed treatment systems. *Water Science and Technology*, 40(3), 1–9.
- Cruz Morales, Z. (2019). *Evaluación de producción más limpia del ciclo del agua en la Empresa Cárnica Cienfuegos (ECC)*. 1–113.
- DWA. (2017). Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Kläranlagen mit bepflanzten und unbepflanzten Filtern zur Reinigung häuslichen und kommunalen Abwassers, in

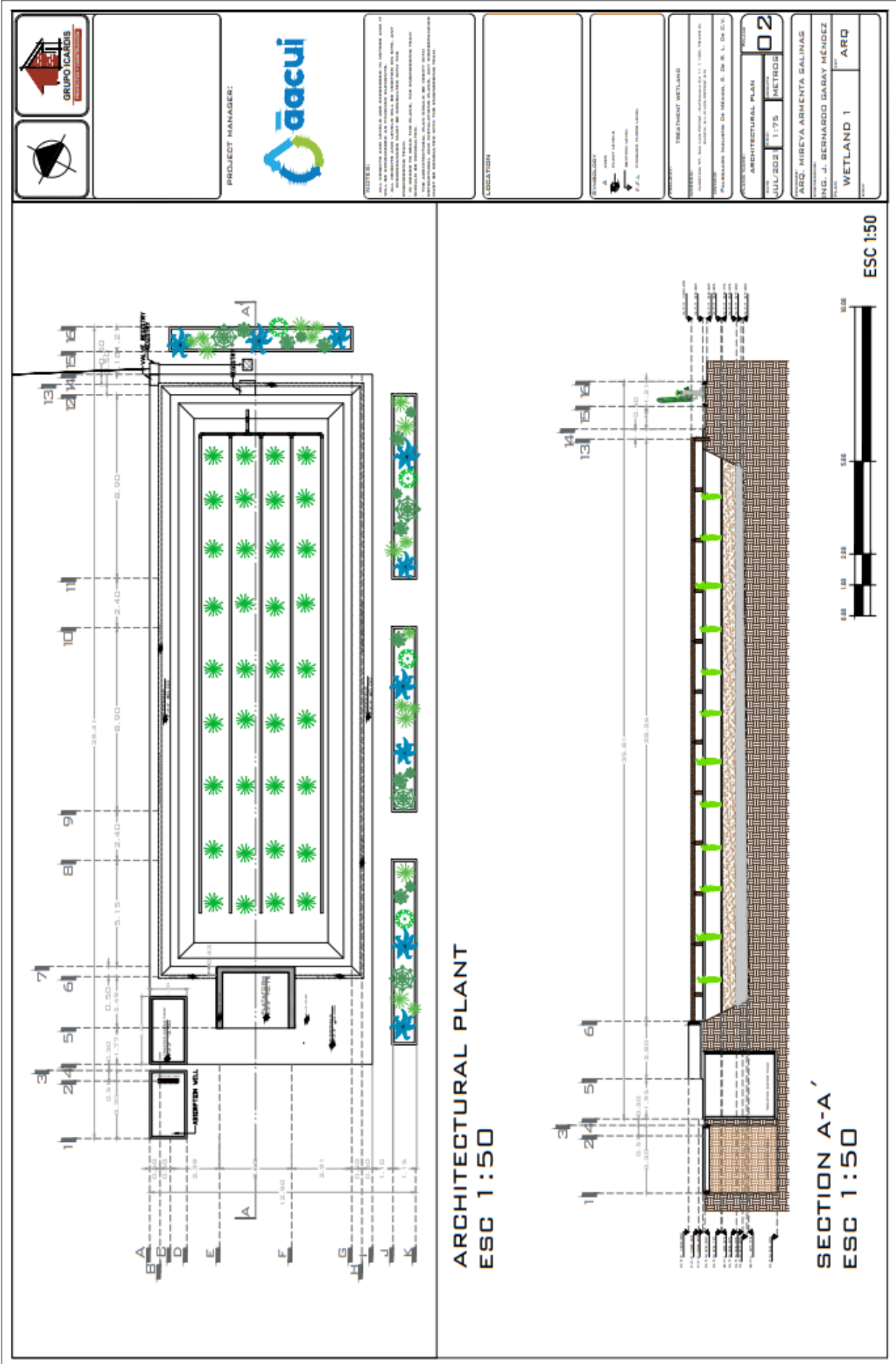
- German. (Principles of design, construction and operation of planted and unplanted filters for treatm. *Deutsche Vereinigung Für Wasserwirtschaft, Abwasser Und Abfall e.V.*
- Fenoglio, F. E. (2000). *Bases de diseño para la construcción de un reactor biológico coexperimental basado en los sistemas de humedales de flujo vertical*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Foladori, P., Ruaben, J., & Ortigara, A. R. C. (2013). Recirculation or artificial aeration in vertical flow constructed wetlands: A comparative study for treating high load wastewater. *Bioresource Technology*, *149*, 398–405. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.099>
- Francisca, K. (2016). *Caracterización de las aguas residuales de la industria azucarera Tres Valles, en Honduras*. www.tcpdf.org
- Garcia, J., Rousseau, D., Morato, J., Lesage, E. L. S., Matamoros, V., & Bayona, J. (2010). Contaminant Removal Processes in Subsurface-Flow Constructed Wetlands: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *40*, 561–661.
- Garcia, L. M., & White, S. A. (2018). Aeration and plant coverage influence floating treatment wetland remediation efficacy. *Ecological Engineering*, *122*(May), 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.011>
- Gerba, C. P. (1999). Optimization of artificial wetland design for removal of indicator microorganisms and pathogenic protozoa. *Water Science and Technology*, *40*(4–5), 363–368.
- Ghosh, D., & Gopal, B. (2010). Effect of hydraulic retention time on the treatment of secondary effluent in a subsurface flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, *36*(8), 1044–1051. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.04.017>
- He, L. S., Liu, H. L., Xi, B. D., & Zhu, Y. B. (2006). Effects of effluent recirculation in vertical-flow constructed wetland on treatment efficiency of livestock wastewater. *Water Science and Technology*, *54*(11–12), 137–146. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.845>
- Herrera, L. (2020). *Procesamiento de cerveza: tratamiento de aguas residuales y subproductos*. 11 páginas.
- IMTA. (2012). *Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas residuales*.
- Jizheng, P. (2019). Enhanced nitrogen removal by the integrated constructed wetlands with artificial aeration. *Environmental Technology and Innovation*, *14*, 100362. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100362>
- Kadlec, R. H. (2000). The inadequacy of first-order treatment wetland models. *Ecological Engineering*, *15*, 105–120.
- Kadlec, R. H., & Knight, R. L. (1996). *Treatment Wetlands, First Edition*. CRC Press.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment wetlands*. CRC Press.

- Kantawanichkul, Suwasa, Wara, & Shepard. (2005). LAS removal by a horizontal flow constructed wetland in tropical climate. *Natural and Constructed Wetlands: Nutrients, Metals and Management*, 261–270.
- Laber, J., Perfler, R., & Haberl, R. (1997). Two strategies for advanced nitrogen removal in vertical flow constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 35(5), 71–77.
- Langergraber, G. (2009). Recent developments in numerical modelling of subsurface flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 407(13), 3931–3943. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.057>
- Langergraber, G., & Haberl, R. (2001). Constructed wetlands for water treatment. *Minerva Biotechnologica*, 13, 123–134.
- Ley Federal de Derechos Artículo 278 - B Fracción III.* (n.d.).
- López, C. M. (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño* (IWA (Ed.)).
- Mandigan, M. T., & Martinko, J. M. (2006). *Brock biology of microorganisms* (11th ed.).
- Matamoras, V. (2008). Behaviour of pharmaceutical products and biodegradation intermediates in horizontal subsurface flow constructed wetland. A microcosm experiment. *Science of the Total Environment*, 394(1), 171–176. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.01.029>
- McCarty, P. L., & Rittman, B. E. (2001). *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*.
- Miranda, M. (2000). *Desarrollo, situacion actual y aplicaciones potenciales de los humedales artificiales de flujo horizontal en Mexico*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Moran, M. . (2015). *Evaluacion Fisicoquimica Del Proceso Anaerobio De La Planta De Tratamiento De Aguas Residuales (PTAR) Cerveceria Del Valle-Bavaria*.
- NMX-AA-003-1980 AGUAS RESIDUALES.- MUESTREO.* (n.d.).
- Onet, C. (2010). Characteristics of the Untreated Wastewater Produced By Food Industry. *Analele Universității Din Oradea, Fascicula: Protecția Mediului*, XV, 709–714.
- ÖNORM. (2009). ÖNORM B 2505: Bepflanzte Bodenfilter (Pflanzenkläranlagen) - Anwendung, Bemessung, Bau und Betrieb (Subsurface flow constructed wetlands - Application, dimensioning, installation, and operation) [in German]. *Österreichisches Normungsinstitut*.
- Palmer, J., & Kaminski, C. (2013). *A comprehensive guide for brewers. Brewers publications*.
- Pentair. (2020). *Pentair chlorine #320*. <https://www.pentair.com/content/dam/extranet/nam/product-related/product-manuals/pool-and-spa-equipment/rainbow/chlorinebromine-feeder-320-installation-guide-english.pdf>

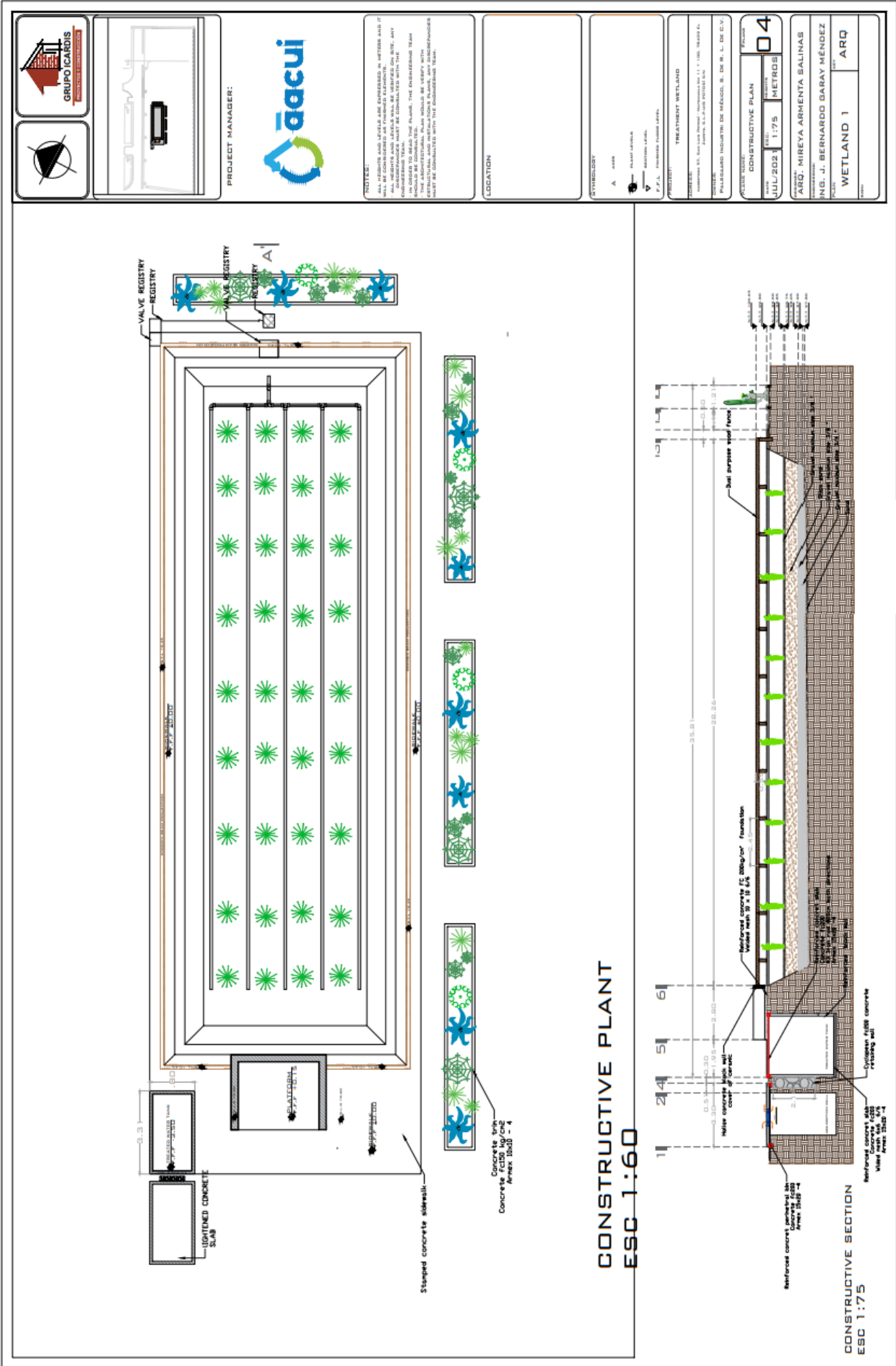
- Prost-Boucle, S., & Molle, P. (2012). Recirculation on a single stage of vertical flow constructed wetland: Treatment limits and operation modes. *Ecological Engineering*, 43(June), 81–84. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.02.022>
- Puigagut, J. (2007). Subsurface-flow constructed wetlands in Spain for the sanitation of small communities: A comparative study. *Ecological Engineering*, 30(4), 312–319. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.04.005>
- Quima. (2018). *Trampa de grasa*. <https://quima.com/blogs/blog/tu-trampa-de-grasa-no-da-su-100-como-darle-mantenimiento-a-mi-trampa-de-grasa>
- Reed, S. C., & Crites, R. W. (1995). *Natural Systems for Waste- management and Treatment*, (M. G. H. Professional (Ed.); 2nd ed).
- Romero, M. (2009). *TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR UN SISTEMA PILOTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES: EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA*.
- S. Kantawanichkul, S., Somprasert, U., & R.B.E., A. (2003). Treatment of agricultural wastewater in two experimental combined constructed wetland systems in a tropical climate. *Water Science & Technology*, 48(5), 199–205.
- Serrano, J. G., & Corzo Hernández, A. (2008). *Depuración con Humedales Construidos*.
- Sherard, J., Dunningan, L., & Talbot, J. (1984). Basic properties of sand and gravel filters. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 110.
- Simate, G. S. (2011). The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art. *Desalination*, 273(2–3), 235–247.
- Sklarz, M. Y., Gross, A., Yakirevich, A., & Soares, M. I. M. (2009). A recirculating vertical flow constructed wetland for the treatment of domestic wastewater. *Desalination*, 246(1–3), 617–624. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.09.002>
- Stefanakis, A., Akrotos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2014). Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. *Elsevier*.
- Stein, O. R., Borden-Stewart, D. J., Hook, P. B., & Jones, W. L. (2007). *Seasonal Influence on Sulfate Reduction and Metal Sequestration in Sub-surface Wetlands*. 3440–3448.
- Sun, G., Gray, K. R., Biddlestone, A. J., Allen, S. J., & Cooper, D. J. (2003). Effect of effluent recirculation on the performance of a reed bed system treating agricultural wastewater. *Process Biochemistry*, 39(3), 351–357. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00075-X](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00075-X)
- Tchobanoglous. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*.
- USEPA. (1999). *Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air* EPA/625/R96/010a. <http://www.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/inorganic/iocompen.pdf>
- Von Sperling, M. (2007). *Volume 2: Basic Principles of Wastewater Treatment* (I. Publishing (Ed.)).

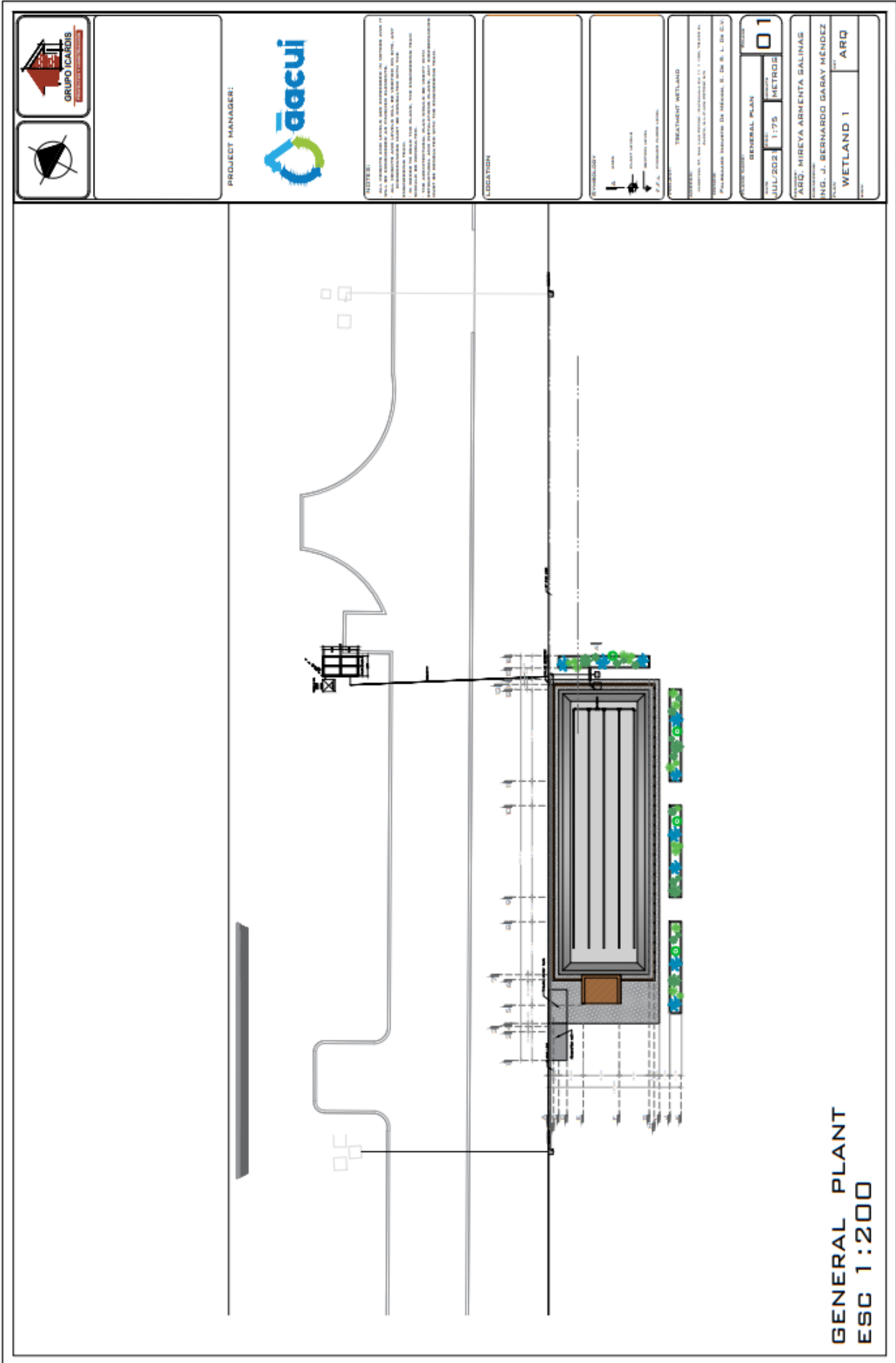
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 380(1–3), 48–65. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>
- Vymazal, J. (2013). Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: A review. *Ecological Engineering*, 61B, 582–592.
- Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2008). Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow. *Springer*.
- Wallace, S. D., & Knight, R. L. (2006). Small-scale constructed wetland treatment systems: Feasibility, design criteria, and O&M requirements. *Water Environment Research Foundation (WERF)*.
- Wiessner, A., Kappelmeyer, U., Kusch, P., & Kästner, M. (2005). Sulphate reduction and the removal of carbon and ammonia in a laboratory-scale constructed wetland. *Water Research*, 39(19), 4643–4650. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.09.017>
- Wu, H., Fan, J., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., & Lv, J. (2016). Optimization of organics and nitrogen removal in intermittently aerated vertical flow constructed wetlands: Effects of aeration time and aeration rate. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 113, 139–145. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.04.031>
- Wu, Y. (2008). Constructed mangrove wetland as secondary treatment system for municipal wastewater. *Ecological Engineering*, 34(2), 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.07.010>
- Ye, F., & Li, Y. (2009). Enhancement of nitrogen removal in towery hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities. *Ecological Engineering*, 35(7), 1043–1050. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.03.009>
- Zapater-Pereyra. (2014). *Effect of aeration on pollutants removal, biofilm activity and protozoan abundance in conventional and hybrid horizontal subsurface-flow constructed wetlands*.
- Zhang. (2016). *Perfomance of hybrid subsurface constructed wetland system for piggery wastewater treatment*.
- Zhang, L. yu, Zhang, L., Liu, Y. ding, Shen, Y. wu, Liu, H., & Xiong, Y. (2010). Effect of limited artificial aeration on constructed wetland treatment of domestic wastewater. *Desalination*, 250(3), 915–920. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.04.062>
- Zhu, W. (2011). Kinetic Adsorption of Ammonium Nitrogen by Substrate Materials for Constructed Wetlands. *Pedosphere*, 21(4), 454–463. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60147-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60147-1)

ANEXOS



ANEXO 1. PLANO ARQUITECTÓNICO.





PROJECT MANAGER:



NOTES:
 1. THIS PLAN IS FOR INFORMATION ONLY AND IS NOT TO BE USED FOR CONSTRUCTION.
 2. ALL DIMENSIONS ARE IN METERS UNLESS OTHERWISE SPECIFIED.
 3. THE CONTRACTOR SHALL VERIFY ALL DIMENSIONS AND LOCATIONS BEFORE COMMENCING WORK.
 4. THE CONTRACTOR SHALL BE RESPONSIBLE FOR OBTAINING ALL NECESSARY PERMITS AND APPROVALS.
 5. THE CONTRACTOR SHALL MAINTAIN ACCESS TO ALL ADJACENT PROPERTIES AND UTILITIES AT ALL TIMES.

LOCATION



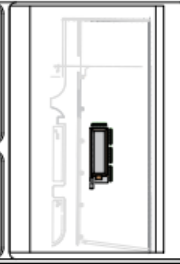
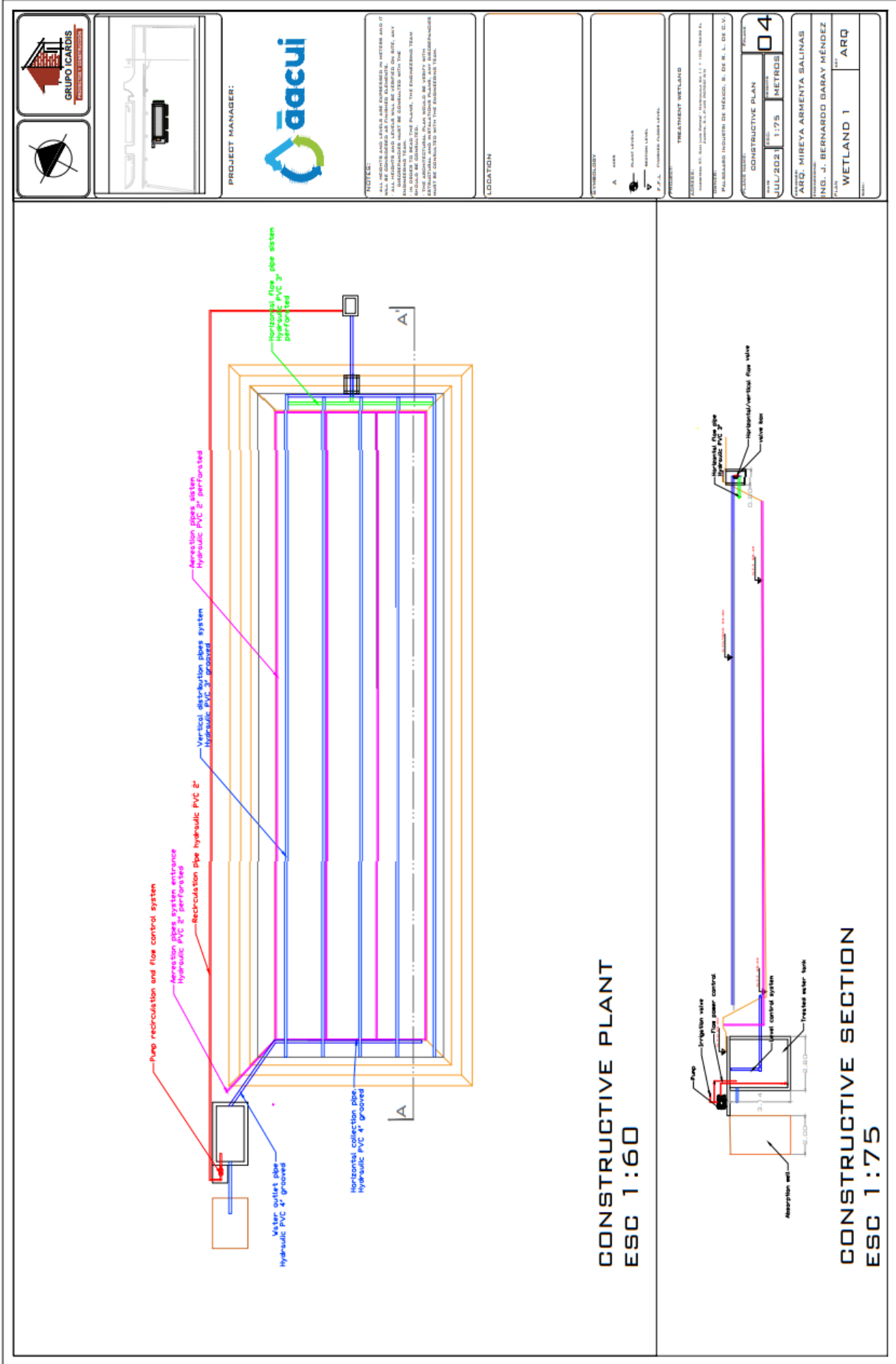
PROJECT: TREATMENT WETLAND
 ADDRESS: No. 1000 Street, Metrosur 111, 1000, Caracas, V.Z.
 CLIENT: MIREYA ARMENTA SALINAS
 PROJECT MANAGER: DR. MARIANO DE MENDOZA, E. DE R. L. DE C.V.

GENERAL PLAN
 JUL/2021 1:75 METROSUR 01

ARQ. MIREYA ARMENTA SALINAS
 ING. J. BERNARDO GARAY MENDOZA
 WETLAND 1 ARQ

GENERAL PLANT
 ESC 1:200

ANEXO 3. PLANO GENERAL.



PROJECT MANAGER:

NOTES:
 ALL HEIGHTS AND LEVELS ARE EXPRESSED IN METERS AND IT
 ALL HEIGHTS AND LEVELS WILL BE CHECKED ON SITE. ANY
 DISCREPANCIES MUST BE CONSULTED WITH THE
 ENGINEERING TEAM.
 ALL DIMENSIONS MUST BE CHECKED WITH THE
 SPECIALIST CONTRACTOR. PLEASE, THE ENGINEERING TEAM
 WILL BE RESPONSIBLE FOR THE DESIGN AND CONSTRUCTION
 OF THE TREATMENT PLANT AND WETLANDS. ALL DIMENSIONS
 MUST BE CHECKED WITH THE ENGINEERING TEAM.

LOCATION

STATIONING
 A 4488
 PLANT LEVELS
 REACTION LEVELS
 P.P.S. FUNDACIÓN CIUDAD LARCA.

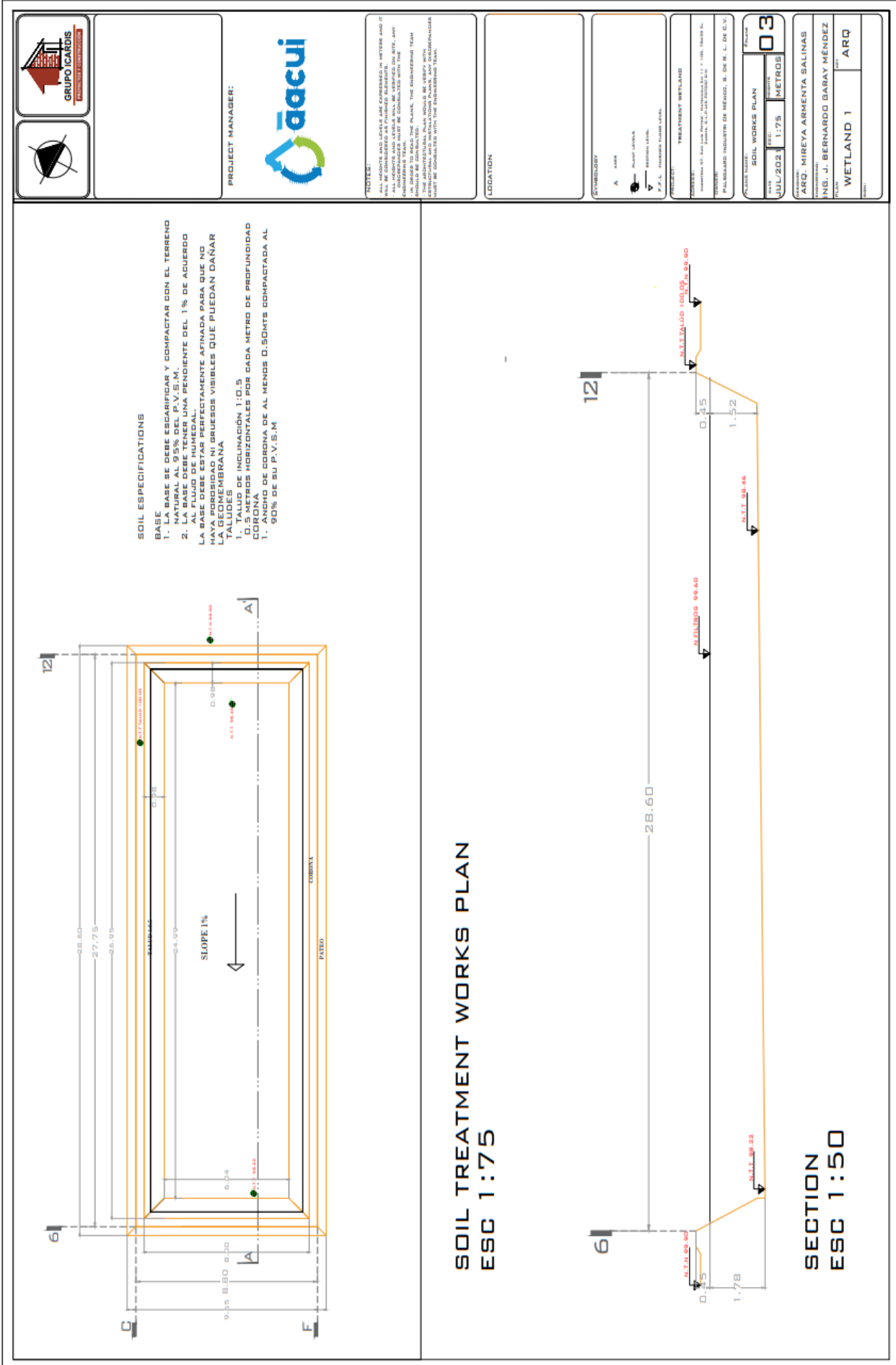
TREATMENT WETLAND
 PROYECTO:
 WETLANDS FOR THE TREATMENT OF WASTEWATER FROM THE
 PULP MILL OF CIUDAD LARCA, P.P.S. FUNDACIÓN CIUDAD LARCA.
 PALESTRA INDUSTRIAL DE MÉXICO, S. DE R. L. DE C.V.
 JULIO 2023

CONSTRUCTIVE PLAN
 JUL/2023 1:75 METROS
 04

ARQ. MIREYA ARMENTA SALINAS
 ING. J. BERNARDO BARAY MÉNDEZ
 WETLAND 1 ARQ

CONSTRUCTIVE PLANT
 ESC 1:60

CONSTRUCTIVE SECTION
 ESC 1:75



ANEXO 5. PLANO DE TERRACERÍAS.