



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

**Optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales
de un parque industrial.**

Presenta:

Ing. Amb. Nancy Estrada Pérez.

Para obtener el título de:

Maestro en Ingeniería, Tecnología y Gestión Ambiental.

Director

Dr. Gaspar López Ocaña.

Codirector

Dr. Raúl German Bautista Margulis.

Villahermosa, Tabasco, Agosto de 2021.



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

AGOSTO 05 DE 2021

**C. NANCY ESTRADA PÉREZ
PAS. DE LA MAESTRIA EN INGENIERÍA, TECNOLOGÍA Y
GESTIÓN AMBIENTAL
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Maestría en Ingeniería, Tecnología y Gestión Ambiental titulado: **"OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UN PARQUE INDUSTRIAL"**, asesorado por el Dr. Gaspar López Ocaña y Dr. Raúl German Bautista Margulis, sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado integrado por el M.I.P.A. Mario José Romellón Cerino, M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar, Dr. Gaspar López Ocaña, Dra. Liliana Pampillón González, Dr. Arturo Valdés Manzanilla.

Por lo cual puede proceder a concluir con los trámites finales para fijar la fecha de examen.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



C.c.p.- Expediente del Alumno.
C.c.p.- Archivo

CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Maestría denominado: **“OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UN PARQUE INDUSTRIAL”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el día 05 de agosto del dos mil veintiuno.

AUTORIZO



NANCY ESTRADA PÉREZ



Villahermosa, Tabasco a 11 de octubre de 2021.

ING. NANCY ESTRADA PÉREZ
EST. MAESTRÍA EN INGENIERÍA, TECNOLOGÍA
Y GESTIÓN AMBIENTAL
PRESENTE

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad, y por instrucciones de la Dirección de Posgrado, se implementó la revisión de los documentos recepcionales (tesis), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad, el Reglamento General de Estudios de Posgrado, el Código Institucional de Ética para la Investigación y con los requerimientos para los posgrados en el PNPC-CONACyT.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones y el reporte de originalidad de su documento de tesis. Con el objetivo de fortalecer y enriquecer el programa de posgrado, el Coordinador Académico de la MITyGA, realizó la revisión del documento en la plataforma iThenticate, obteniendo el reporte de originalidad, el índice de similitud y emitió las siguientes sugerencias y recomendaciones para dar seguimiento en el documento de tesis del proyecto de investigación: "**Optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales de un parque industrial**".

OBSERVACIONES:

1. El índice de similitud obtenido fue de 17%, el cual se considera razonablemente bajo y dentro del estándar (15 - 20%) de tolerancia de acuerdo a las Políticas y Lineamientos para el uso y manejo del Software Antiplagio de la UJAT.
2. Para reducir el índice de similitud, se proponen las siguientes recomendaciones:
 - a. Parfrasear aquellos textos (ver Documento con Observaciones) con número de palabras coincidentes mayores a 50 (ver el número de palabras coincidentes en el informe de resumen, algunas fuentes con las

C.C.P. ARCHIVO



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**División
Académica
de Ciencias
Biológicas**

Jefatura de Posgrado

México
2021
100 años de
Independencia



- que se encontró similitud son SINAT de SEMARNAT, ciba.org, ri.ujat y revista.ccba.uady).
- b. Aunque la sustentante ha hecho un esfuerzo en citar toda fuente empleada en el documento, se recomienda disminuir citas a estudios previos del grupo de investigación/cuerpo académico; por ejemplo, la fuente No. 3 (ver al final de Informe de Similitud) encontró similitud en 122 palabras con un documento del Repositorio Institucional de la UJAT (una tesis previa del mismo Programa de Posgrado). Aunque los aspectos de similitud detectados por el software no demeritan el trabajo de investigación, se sugiere fomentar una redacción propia que disminuya estas coincidencias.
 - c. Las mayores similitudes se encontraron en la Introducción (ver fuentes No. 17 y 24), Antecedentes (No. 3, 10, 11, 18, 21, 22, entre otras fuentes) y Resultados (fuentes No. 7, 9, 14, 28) cuyos textos están apropiadamente citados, pero de manera muy literal, por lo que se recomienda mejorar la síntesis de esa información y presentarla en un lenguaje propio, que difiera o se aleje de las redacciones originales.
3. Se adjunta el informe de originalidad de la tesis de la Ing. Nancy Estrada Pérez a través de la herramienta Turnitin iThenticate.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"


DR. ALLAN KEITH CRUZ RAMÍREZ
JEFATURA DE POSGRADO

UJAT

DIVISION ACADÉMICA
CIENCIAS BIOLÓGICAS
JEFATURA DE POSGRADO

C.C.P. Dr. Gaspar López Ocaña. Director de tesis.

C.C.P. ARCHIVO

Consortio de
Universidades
Mexicanas
UNA ALIANZA DE CALIDAD POR LA EDUCACIÓN SUPERIOR

KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6407. Correo e: posgrado.dacbiol@ujat.mx

Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques

www.ujat.mx



Dedicatorias

A mis padres Arquímedes Estrada Izquierdo y Rosa Angélica Pérez Muñoz, por ser la base fundamental en mis metas, por apoyarme incondicionalmente y siempre estar orgullosos de mí, por todo el amor y cariño, así como cada sacrificio que han hecho a lo largo de mi vida para darme una buena educación. A mi hermana Yessi Estrada Pérez por ser mi mejor amiga y confidente, estar conmigo en los momentos difíciles y enseñarme que todo se puede lograr creyendo en mi misma.

A mis profesores, los cuales me han brindado conocimientos y experiencias principalmente al Dr. Gaspar López Ocaña que desde el primer momento logro ver mi potencial y creyó en mí.

A ti Néstor Adrián Vázquez de la Cruz por ser mi apoyo, por darme ánimos de seguir luchando por mis sueños día con día, por aceptarme tal y como soy y quererme en los buenos y aún más en los difíciles momentos de esta meta.

Agradecimiento

Te doy gracias Dios por llenarme de vida, salud, fortaleza y conocimiento, el cual hoy estoy formando intentando por ello ser siempre mejor ser humano y profesionista.

Agradezco a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco específicamente a la División Académica de Ciencias Biológicas, Laboratorio de Tecnología del Agua, por abrirme las puertas y aceptarme como estudiante de posgrado, así mismo a todos los profesores y compañeros que me acompañaron en esta etapa.

De manera especial a mi comité sinodal, Dr. Gaspar López Ocaña, Dr. Raúl German Bautista Margulis, M.I.P.A. Mario José Remellón Cerino, M. en C. Carlos Alberto Torres Balcázar, Dra. Liliana Pampillón González y Dr. Arturo Valdez Manzanilla, por sus consejos, comentarios y observaciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia Tecnología por otorgarme la beca dentro del periodo comprendido 12 agosto de 2019 al 01 de agosto de 2021. Registro No. 744944.



A mis compañeros y amigos del Laboratorio de Tecnología del Agua por su apoyo en cada etapa del proyecto, Néstor, Alfredo, Luis, Fátima, Elsy, Rosalino, Manuel, Cristina y Samuel.

Agradecida con ustedes amigos, Ana Karen León y Javier Vázquez por brindarme sus conocimientos, amistad y ayudarme múltiples veces a no perder la fe en mí y sobre todo a disfrutar la vida



Contenido

1.	Resumen.....	12
2.	Introducción.....	13
3.	Justificación.....	14
4.	Antecedentes.....	15
4.1.	Tecnologías de tratamiento de aguas residuales.....	15
4.1.1.	Reactor de manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB).....	15
4.1.2.	Biorreactor de membrana (MBR).....	15
4.1.3.	Coagulación-floculación.....	16
4.1.4.	Humedales artificiales.....	17
5.	Objetivo general.....	19
5.1.	Objetivos específicos.....	19
6.	Área de estudio.....	20
7.	Materiales y métodos.....	20
7.1.	Actividades de Campo.....	20
7.1.1.	Toma de muestras.....	20
7.1.2.	Caracterización volumétrica en cárcamo concentrador.....	21
7.1.3.	Levantamiento físico de las unidades del sistema.....	22
7.2.	Actividades de laboratorio.....	22
7.2.1.	Análisis para la evaluación actual del sistema.....	22
7.2.2.	Análisis de parámetros de control de proceso rutinario del sistema.....	22
7.2.3.	Pruebas de tratabilidad, para el tratamiento fisicoquímico.....	22
7.3.	Actividades de gabinete.....	23
7.3.1.	Síntesis de procesos de las propuestas para optimización del sistema.....	23
7.3.2.	Selección de la alternativa y desarrollo de la ingeniería básica.....	23
7.3.3.	Eficiencia del sistema.....	23
7.3.4.	Análisis estadísticos de datos.....	24
8.	Resultados y discusiones.....	24
8.1.	Características de las aguas residuales domésticas generadas en el parque industrial.....	24



8.1.1.	Gastos de operación	24
8.1.2.	Calidad del agua residual.	25
8.2.	Evaluación actual de la PTAR.....	27
8.2.1.	Condiciones actuales del sistema	27
8.2.2.	Eficiencia actual.....	28
8.2.3.	Comportamiento de las unidades de proceso actual.	29
8.3.	Alternativas para la optimización del sistema actual de tratamiento de aguas residuales domésticas.	31
8.3.1.	Optimización de la PTAR con tratamiento fisicoquímico.....	31
8.3.2.	Optimización de la PTAR vía humedales artificiales.....	34
8.3.3.	Ingeniería básica de la alternativa seleccionada en la optimización del proceso del sistema de tratamiento actual.....	36
8.3.4	Comparación del sistema optimizado con otros procesos de tratamiento de aguas industriales. 51	
9.	Conclusiones y Recomendaciones.....	52
10.	Referencias.....	53
11.	Anexos.....	56
11.1.	Memoria fotográfica.	56
11.2.	Vistas de Planos.	60
11.3.	Paper presentados (Academia Journals).....	63



Índice de tablas

Tabla 1.	Calidad del agua residual de la PTAR.	26
Tabla 2.	Condiciones actuales del sistema.	28
Tabla 3.	Eficiencia remoción de parámetros de control en la PTAR en su condición actual.	29
Tabla 4.	Síntesis de procesos de la optimización propuesta al sistema actual de tratamiento de aguas residuales del parque industrial.	34
Tabla 5.	Síntesis de procesos de la optimización propuesta al sistema actual de tratamiento de aguas residuales del parque industrial.	35
Tabla 6.	Datos del proyecto.	36
Tabla 7.	Datos meteorológicos.	36
Tabla 8.	Gasto de diseño.	36
Tabla 9.	Dimensionamiento de unidades.	37
Tabla 10.	Datos del Proyecto.	37
Tabla 11.	Parámetros de entrada.	37
Tabla 12.	Datos de eficiencia de remoción.	38
Tabla 13.	Coeficiente de remoción en base al área.	39
Tabla 14.	Tiempo de retención.	40
Tabla 15.	Determinación de DBO en flujo pistón.	40
Tabla 16.	Ajuste a n.	40
Tabla 17.	Tasa aparente de remoción.	40
Tabla 18.	Modelado de la remoción de DBO.	41
Tabla 19.	Modelo de la remoción de SST.	41
Tabla 20.	Tiempos de remoción sobre las tasas de remoción.	41
Tabla 21.	Temperatura en humedales artificiales.	41
Tabla 22.	DBO máxima residual en el efluente de HAFL.	42
Tabla 23.	Condiciones con un TRH de 0.8 días.	42
Tabla 24.	Determinación del TRH para DBO. Se considera el efecto de dispersión axial y el efecto de las temperaturas.	42
Tabla 25.	Tasa de carga orgánica.	43
Tabla 26.	Área del humedal para remoción de DBO.	43
Tabla 27.	Tasa de carga para remoción de SST.	43
Tabla 28.	Tiempo de retención para la remoción de nitrógeno.	43
Tabla 29.	Área del humedal para remover nitrógeno.	44
Tabla 30.	Velocidad del flujo en la sección del humedal.	44
Tabla 31.	Condiciones con un TRH de 0.8 días.	44
Tabla 32.	Efecto de dispersión axial y efecto de temperaturas.	44
Tabla 33.	Tasa de carga orgánica.	45
Tabla 34.	Área del humedal para remoción de DBO.	45
Tabla 35.	Tasa de carga para remoción de SST.	45
Tabla 36.	Tiempo de retención para la remoción de nitrógeno.	46
Tabla 37.	Área del humedal para remover nitrógeno.	46
Tabla 38.	Velocidad del fluido en la sección del humedal.	46
Tabla 39.	Datos para la eliminación de coliformes totales en el HAFL1.	46



Tabla 40.	Constante de remoción bacteriana.....	47
Tabla 41.	Relación largo y ancho de tanque.....	47
Tabla 42.	Coeficiente de dispersión (¥).....	47
Tabla 43.	Concentración del efluente.....	47
Tabla 44.	Evaluación de azolve en años.....	47
Tabla 45.	Datos para la eliminación de coliformes totales en el HAFL2.....	47
Tabla 46.	Constante de remoción bacteriana.....	48
Tabla 47.	Relación largo y ancho de tanque.....	48
Tabla 48.	Coeficiente de dispersión (¥).....	48
Tabla 49.	Concentración del efluente.....	48
Tabla 50.	Evaluación de azolve en años.....	48
Tabla 51.	Datos para la eliminación de coliformes totales en el HAFL3.....	48
Tabla 52.	Constante de remoción bacteriana.....	49
Tabla 53.	Tabla 67. Relación largo y ancho de tanque.....	49
Tabla 54.	Coeficiente de dispersión (¥).....	49
Tabla 55.	Concentración del efluente.....	49
Tabla 56.	Evaluación de azolve en años.....	49
Tabla 57.	Datos para la eliminación de coliformes totales en el HAFS.....	49
Tabla 58.	Constante de remoción bacteriana.....	50
Tabla 59.	Relación largo y ancho de tanque.....	50
Tabla 60.	Coeficiente de dispersión (¥).....	50
Tabla 61.	Concentración del efluente.....	50
Tabla 62.	Evaluación de azolve en años.....	50
Tabla 63.	Comparación de eficiencias de remoción de DQO en el comportamiento de los humedales artificiales en este estudio y con otros autores.....	51

Índice de figuras

Figura 1.	Localización de la Planta de tratamiento de aguas residuales del parque industrial. Fuente: Google Earth 2020 (INEGI).....	20
Figura 2.	Diagrama de procesos de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Parque Industrial.....	21
Figura 3.	Graduación de la descarga al volumen de control que es el cárcamo.....	21
Figura 4.	Gasto de operación del cárcamo.....	25
Figura 5.	Comportamiento de pH en las unidades de la PTAR.....	29
Figura 6.	Comportamiento de SDT en las secciones de la planta PTAR.....	30
Figura 7.	Eficiencia de remoción de Color en las secciones de la planta PTAR.....	30
Figura 8.	Eficiencia de remoción de Turbiedad en las secciones de la planta la PTAR.....	31
Figura 9.	Remoción de turbiedad promedio del Al ₂ (SO ₄) ₃	32
Figura 10.	Remoción de color promedio del Al ₂ (SO ₄) ₃	32
Figura 11.	Remoción de turbiedad con Al ₂ (SO ₄) ₃ y Ca(OH) ₂	33
Figura 12.	Remoción de color promedio con Al ₂ (SO ₄) ₃ y Ca(OH) ₂	33
Figura 13.	Diagrama de Procesos con la propuesta del tratamiento vía humedales artificiales.....	35



1. Resumen.

Se evaluaron y propusieron dos alternativas de optimización de un sistema de tratamiento de aguas residuales de un parque industrial en Tabasco que consta de un cárcamo, tanque ecualizador, filtro percolador, sedimentador y cloración, para cumplir con la normatividad vigente. Se estimó el caudal, la eficiencia de remoción el comportamiento del proceso mediante la medición turbiedad, color, pH, SDT y posteriormente se realizó una síntesis de procesos de las alternativas seleccionadas. Se analizó a escala laboratorio como primera alternativa la coagulación floculación utilizando sales metálicas como $Al_2(SO_4)_3$ y $Ca(OH)_2$. Como segunda alternativa se analizó el uso de humedales artificiales en serie para el efluente de la planta actual. En el sistema actual el agua tratada presentó una remoción de 56.7% de DQO (afluente $5354.5 \pm 2634.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ -efluente $2317.3 \pm 1218.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 68.09% de turbidez (afluente $47.3 \pm 1.36 \text{ UTN}$ -efluente $13.6 \pm 0.3 \text{ UTN}$), 70.4% de color (afluente $3389 \pm 365.2 \text{ UC}$ -efluente 1002 UC), 63.9% de SDT (afluente $1995 \pm 456.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ -efluente $430 \pm 36.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) y con un pH promedio de 9.62. Las pruebas de tratabilidad muestran que el tratamiento con $Al_2(SO_4)_3$, la dosis óptima fue de $3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ removiendo 95.88% de color y 94.10% de turbiedad, mientras que en el tratamiento con la mezcla de $Al_2(SO_4)_3$ y $Ca(OH)_2$, fue de $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ para ambas sales, removiendo 94.49 % de color y 98.17% de turbiedad. Si se implementara este proceso la planta podría cumplir la NOM-001-SEMARNAT-1996 en su descarga, sin embargo, se incrementaría al tratamiento actual los costos de construcción, mantenimiento y operación. Al analizar la implementación de humedales, la síntesis de proceso muestra que se puede lograr una remoción de $\leq 95\%$ de contaminantes básicos. La optimización del proceso nos permite ver que al tren de tratamiento actual se le agregarán cuatro humedales en serie, el primer humedal de flujo libre con vegetación *Potenderia cordata* (tule), el segundo humedal de flujo libre con vegetación *Sagittaria lancifolia* (cola de pato), el tercer humedal de flujo libre con vegetación *Thypha dominguensis* (espadaño) y el cuarto humedal de flujo subsuperficial con vegetación *Thalia geniculata* (popal). Esta alternativa permite tener una planta que no cuente con sistemas de bombeos pues esta operará por gravead, la materia prima no requiere del uso de químicos o energía, lo cual además de beneficiar la captura de carbono permitirá tener ahorro en los gastos de operación y mantenimiento.



2. Introducción.

Las aguas residuales industriales sin tratamiento provocan la contaminación de los cuerpos receptores afectando las aguas superficiales y subterráneas, poniendo en riesgo la salud de la población y la integridad de los ecosistemas (SEMARNAT, 2015).

Las aguas residuales industriales en México se pueden tratar de tres maneras diferentes, con tratamiento primario, ajustando el pH y removiendo materiales orgánicos e inorgánicos en suspensión. En México existe un total de 1896 plantas tratando $40.88 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Con el tratamiento secundario se remueven materiales orgánicos coloidales y disueltos, para ello existen 2494 plantas a nivel nacional con gasto de operación de $98.17 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ y con tratamiento terciario el que remueven materiales disueltos (gases, sustancias orgánicas naturales y sintética), existen 105 plantas tratando $2.40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, dichos tratamientos alcanzan eficiencias entre 80 y 90% de remoción de DBO_5 (CONAGUA, 2019).

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales más empleados son los lodos activados, lagunas estabilizadoras y tratamientos fisicoquímicos (coagulación-floculación), estos son costosos en construcción y operación. Los humedales actualmente son alternativas viables técnica y ambiental aplicados típicamente en países desarrollados con eficientes resultados (Hernández, Morelos y Sandoval, 2017).

En este proyecto se analiza una propuesta técnica para optimizar el proceso de tratamiento de aguas residuales industriales de un parque industrial de tecnología filtro percolador convencional, de manera tal que cumpla con la NOM-001-SERMARNAT-1996, evaluando el sistema actual de tratamiento de aguas residuales industriales para así poder seleccionar alternativas de tratamiento, y presentar la ingeniería básica de la alternativa seleccionada en la optimización del proceso del sistema de tratamiento actual.



3. Justificación.

Las descargas de efluentes industriales son una amenaza para los ecosistemas acuáticos y el desarrollo humano (De Melo Gurgel, Navoni, Morais Ferreira & do Amaral, 2016), por lo cual es necesario implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales industriales que resulten económicos y de fácil operación.

Uno de los principales generadores de estas aguas son los parques industriales, por ejemplo, el parque industrial ubicado en Tabasco, en donde se encuentran empresas en su mayoría con giros como bodegas, comercios de distribución y empresas de servicios especializados, tales como: estación de servicio de gasolinas, perforadoras, materiales de construcción, cafeterías, tiendas de autoservicio, procesadoras de alimentos y bodegas de tiendas departamentales (INADEM, 2015) por estos en el parque industrial se encuentra una planta de tratamiento con un sistema conocido como filtro percolador convencional que consta de un cárcamo, tanque ecualizador, filtro percolador, sedimentador, y cloración.

Podemos describir los biofiltros sistemas que se basan en mejorar la eficiencia para la remoción de los contaminantes biodegradables por una biomasa adherida que se desarrolla superficialmente en el medio de soporte (Liang, Yamashita, Koike, Matsuura, Honda, Hara-Yamamur, & Yamamoto-Ikemoto, 2020), sin embargo existen ciertas desventajas en el tratamiento de las aguas residuales que genera el parque industrial, por lo que es necesario optimizar el proceso para cumplir la normatividad. La posible acumulación de lodos afecta el rendimiento del sistema, se requiere de constante atención de operación, de flexibilidad y control en estos procesos biológicos (Yang, Li, Liu, Cao, Sheng y Cai, 2019).

Por lo anterior se pretende implementar dos tipos de alternativas (coagulación-floculación y humedales artificiales) que logren de manera eficiente la remoción de pH, SDT, color, turbiedad y DQO en el afluente de la PTAR, para así cumplir con la normatividad vigente y reducir afectaciones al cuerpo de agua receptor.



4. Antecedentes

4.1. Tecnologías de tratamiento de aguas residuales

4.1.1. Reactor de manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB)

Díaz y Vega (2015) en Colombia, evaluaron el efecto de la variación de la carga orgánica en el funcionamiento de un reactor UASB, a escala de laboratorio, tratando efluentes de una planta extractora de aceite de palma bajo condiciones mesofílicas evaluando su operación bajo distintos tiempos de retención hidráulica (TRH) de 24, 18 y 12 h, teniendo en cuenta una concentración promedio de DQO en el efluente de $45000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, siendo la remoción máxima de DQO de 86.88% a una carga de $5904 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de DQO.

Cruz, Meza, Rosales, Ventura y Ríos (2016) efectuaron un estudio cuyo objetivo era reducir concentraciones de DQO en un biorreactor de manto de lodo anaerobio de flujo ascendente (UASB) de 4.4 L durante un periodo de 90 días, el cual se alimentado con vinazas de bebidas fermentadas provenientes de Comitán, Chiapas, se tenían concentraciones iniciales de DQO de $120221 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, removiendo más del 90%, teniendo una concentración final de $12022.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de DQO.

Calderón y Vela (2016) realizaron pruebas experimentales de la biodegradabilidad anaerobia del suero de queso en reactores discontinuos demostrando el desempeño de un rector de flujo ascendente en manto de lodos (UASB) para lograr la disminución de la DQO del suero de queso. Utilizaron como sustrato el suero producido en la elaboración de queso fresco en la Planta Piloto de Leche (PPL) de la Universidad Nacional Agraria La Molina en Perú, teniendo un valor inicial de $82.83 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, después del tratamiento se obtuvieron remociones del 90% de DQO, teniendo como concentraciones finales $75 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$.

4.1.2. Biorreactor de membrana (MBR)

Gonzales, Quesada, Schetrite, Jauregui y Albasi (2020) analizaron un sistema de tratamiento de aguas residuales procedentes de un hospital oncológico en Cuba, en el que se desecha una gran variedad de fármacos. Durante el monitoreo al MBR piloto se pudo constatar que los lodos activados empleados en este estudio lograron adaptarse a la presencia de fármacos, teniendo datos iniciales de $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de DQO y $21.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de N alcanzando una eficiencia



en la remoción de la DQO y del nitrógeno de hasta un 96% y un 80 %, respectivamente, teniendo así resultados finales de $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de DQO y $17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de N.

Vásquez, Trapote y Prats (2020), evaluaron el desempeño de un biorreactor de membrana (MBR), para eliminar pesticidas en agua residual urbana sintética en España. El estudio se llevó a cabo en una planta MBR a escala piloto, operada a tiempos de retención celular (TRC) de 30 y 60 días, con valores iniciales de $3038 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de DQO, reportando remociones de 96% de DQO, teniendo como resultado final una DQO de $122 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

4.1.3. Coagulación-floculación

Miranda, Sandoval, Calvo, Moeller y Sarracino (2017), emplearon la coagulación-floculación como alternativa en el tratamiento de un efluente de la industria textil en una zona industrial en Cuernavaca Morelos que emplea colorantes. La concentración inicial de DQO fue de $9313 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, removiendo 76.2% ($2217 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), utilizando dosis de coagulante $1400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y la dosis baja $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de polímero, con mezcla rápida de 1 min a 200 rpm, floculación de 30 min a 10rpm y 120 min de sedimentación.

Rodríguez, Terregroza, Mejía, Atencia y Villero (2019) utilizaron el Policloruro de Aluminio (PAC) para remover DQO, SST y grasas y aceites (G y A), del efluente del tratamiento biológico de una planta de palma y biodiesel en Colombia. La concentración inicial en DQO, SST y G y A es de: $4111.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $870 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $737.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectivamente. La dosis óptima ($3963 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de PAC removió DQO, SST y (G y A) en 75.79% ($996 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 86.21 ($120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) % y 98.8% ($179 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) respectivamente.

Alatriza, Quiroz y Butron (2015), trataron efluentes textiles en Perú, con coagulación-floculación utilizando Perifloc, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y almidón de *Triticum aestivum* L. La concentraciones iniciales fueron de $1570 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ DQO, de $420 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ en DBO, de $980 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ en SST y pH de 10.8. Con la dosis optima de $12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y $18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Perifloc y almidón), se presentaron, $420 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de DQO, $46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de DBO, $269 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de SST y de 8.1 pH. Con mezcla de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y almidon ($50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) se obtuvieron, $799 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de DQO, $228 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ DBO, $64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ SST y 9.1 de pH.

Briones, Burgos, Rosero y Moreira (2020), realizaron pruebas de coagulación, floculación y sedimentación usando $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y Policloruro de Aluminio, en aguas industriales



de la refinación de aceites y grasas en Ecuador, teniendo valores iniciales de turbiedad de 1707 UTN c y un pH 6.14. Con dosis óptima de $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ se obtuvieron valores de 64.89 UTN y 7.25 de pH. Con dosis optima de $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de policloruro de aluminio se obtuvieron resultados de 84.18 UTN y 6.33 de pH.

4.1.4. Humedales artificiales

Cárdenas y Gonzales (2015), analizaron el tratamiento vía humedales subsuperficiales (HAFS) de aguas residuales con desengrasantes y otros productos textiles (ropa) en Guanajuato. Los parámetros iniciales evaluados fueron DQO ($7742 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), SST ($250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) pH (7.4). Las especies del humedal fueron, *Zantedeschia aethiopica* (alcatraz), *Spathiphyllum* (cuna de moises) y *Canna spp* (coyol). La especie *Zantedeschia aethiopica* se obtuvo en el efluente una DQO de $4385.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. SST de $237.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y pH de 7.50. La especie *Spathiphyllum* obtuvo DQO de $5221.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. SST de $212.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y pH de 7.78. Finalmente la especie *Zantedeschia aethiopica* obtuvo una DQO del $6726 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. SST de $175 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y pH de 7.70.

Arévalo, Ramón y Ramón (2015), estudiaron la cinética de un sistema de tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario en Colombia, por medio de humedales utilizando las especies *Cryspogon zizanioides* y *Typha latifolia*. Se evaluó bajo diferentes tiempos de retención (5, 4, 3, 2, 1 día), con concentraciones iniciales de DQO ($1293.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) y SSV ($0.0295 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), teniendo como resultado que la especie *Cryspogon zizanioides* obtuvo $807.631 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de DQO y $0.094 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de SSV y con la especie *Typha latifolia* $792.63 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de DQO y $0.092 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de SSV.

Cervantes, Londoño, Gutiérrez y Peñuela (2017), estudiaron la remoción del ibuprofeno en aguas sintéticas con HAFS en Costa Rica. Analizaron tres humedales y en dos de ellos plantaron *Cyperus papyrus* y uno sin especie (testigo). Por un mes se presentó el tiempo de estabilización seguido de este tiempo se incorporó al afluente del humedal a tres concentraciones el ibuprofeno. Usaron concentraciones C1 ($2.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) y C2 ($0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), emplearon ibuprofeno disódico en polvo; para la concentración C3 ($1.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), el humedal testigo removi6 el 32% del IBP, mientras que los humedales 2 y 3 alcanzaron 55 y 61%, respectivamente.



Cedeño, Lourerio, Delgado, Delgado y Fajardo (2020) instalaron un humedal artificial aireado utilizando *Chrysopogon zizanioides*, *Saccharomyces cerevisiae* y *Trichoderma harzianum*, en el efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales de la industria atunera en Ecuador, los valores iniciales fueron para DBO ($2058.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) y NTK ($463.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), los tratamientos específicamente fueron; (*C. zizanioides*), P1M1 (*C. zizanioides* + *S. cerevisiae*), P1M2 (*C. zizanioides* + *T. harzianum*) y P1M1M2 (*C. zizanioides* + *S. cerevisiae* + *T. harzianum*), como resultados de remoción se obtuvieron para el P1 99.58% ($8.59 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de DQO y 64.56% ($164.36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de NTK, para el P1M1 99.74% ($5.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de DQO y 71.27% ($133.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de NTK, para el P1M2 99.68% ($6.66 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de DQO y 73.78% ($121.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de NTK y para el P1M1M2 99.72% ($5.82 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de DQO y 73.81% ($121.49 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) de NTK.

Sandoval, Nani, Sandoval, Rivera, Fernández y Alvarado (2020) reportan el desempeño de humedales construidos verticales parcialmente saturados (HC-VPS) a nivel mesocosmo tratando aguas residuales porcinas sembrados por triplicado con *Canna hybrids* e *Iris germánica*. Se instalaron 6 unidades experimentales HC-VPS, las cuales se rellenaron con tezontle rojo con 0.5 m de tirante, con agua residual porcina con dilución al 1:1 y se abastecieron aleatoriamente con 4 litros de agua cada 4 horas. Se encontró que los HC-VPS mejoran la eliminación de los contaminantes DQO (5%), SST (20%), N-NH₄ (25%), NTK (32%) y CF totales (20%) en relación a sistemas de humedales verticales tradicionales.



5. Objetivo general.

Optimizar el proceso de tratamiento de aguas residuales industriales del parque industrial de tecnología filtro percolador convencional de manera tal que cumpla con la NOM-001-SERMARNAT-1996.

5.1. Objetivos específicos.

- Caracterizar fisicoquímica y volumétricamente las aguas residuales del parque industrial.
- Evaluar el sistema actual de tratamiento de aguas residuales del parque industrial.
- Seleccionar alternativas de tratamiento para optimizar el proceso de aguas residuales industriales.
- Presentar la Ingeniería básica de la alternativa seleccionada en la optimización del proceso del sistema de tratamiento actual.

6. Área de estudio.

Como primera actividad se realizó el reconocimiento de la PTAR localizada en la latitud norte $17^{\circ}59'28.75''N$ y longitud oeste $92^{\circ}59'19.02''O$ (Figura 1), para conocer cada una de las unidades de proceso y verificar el funcionamiento funcional y operacional del sistema. Los puntos de muestreo evaluados en la planta fueron el cárcamo, tanque equalizador, filtro percolador, sedimentador secundario, filtro y descarga final, se tomaron muestras de afluente y efluente para verificar el comportamiento de la PTAR.



Figura 1. Localización de la Planta de tratamiento de aguas residuales del parque industrial. Fuente: Google Earth 2020 (INEGI).

7. Materiales y métodos.

7.1. Actividades de Campo.

7.1.1. Toma de muestras.

Se realizaron actividades de reconocimiento en campo para conocer el sistema actual viendo los componentes como son equipos, operaciones y procesos unitarios (Figura 2). Durante la fase de evaluación del proceso del sistema actual, se tomaron muestras de agua en el afluente y efluente de la PTAR durante 7 días tomando una muestra simple diaria (12:00 horas). Para el control de procesos los puntos de muestreo evaluados en la planta fueron el cárcamo, tanque equalizador, filtro percolador, sedimentador secundario, filtro y descarga final, se tomaron muestras de afluente y efluente para verificar el comportamiento de la PTAR para la

determinación de los parámetros de control por 7 días a las 12:00 horas en cada una de las etapas del proceso presentes.

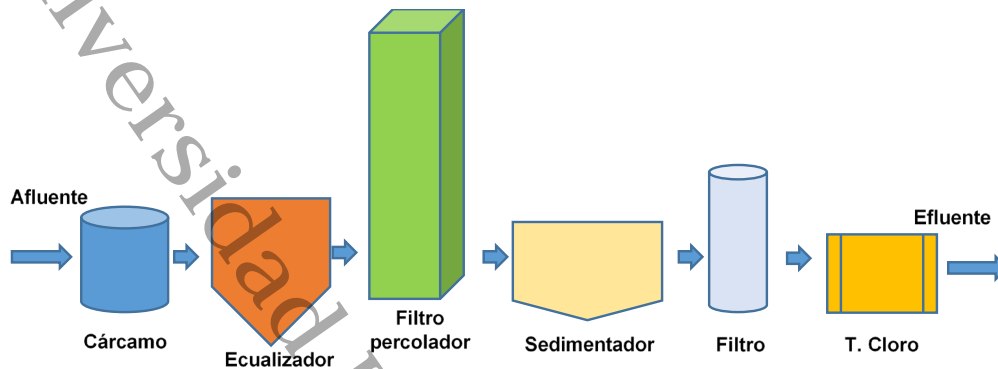


Figura 2. Diagrama de procesos de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Parque Industrial.

7.1.2. Caracterización volumétrica en cárcamo concentrador.

Para la medición del gasto de operación mediante el aforo directo en el cárcamo concentrador bajo los criterios de Briones y García (2014), en la que se determinó el volumen del tanque midiendo el tiempo de llenado, siendo medido durante 7 días alternadamente, con intervalos de 4 horas. Método directo: Este consistió en preparar el cárcamo de volumen conocido (graduándolo). Posteriormente, se determinó el tiempo en que se llena dicho recipiente y se obtiene el caudal con la relación como se muestra en la Figura 3 (Metcalf y Eddy, 1996).

$$Q = V * t \text{ (Ec. 1)}$$

Donde :

- Q = Caudal (m³)
- T = Tiempo (seg)

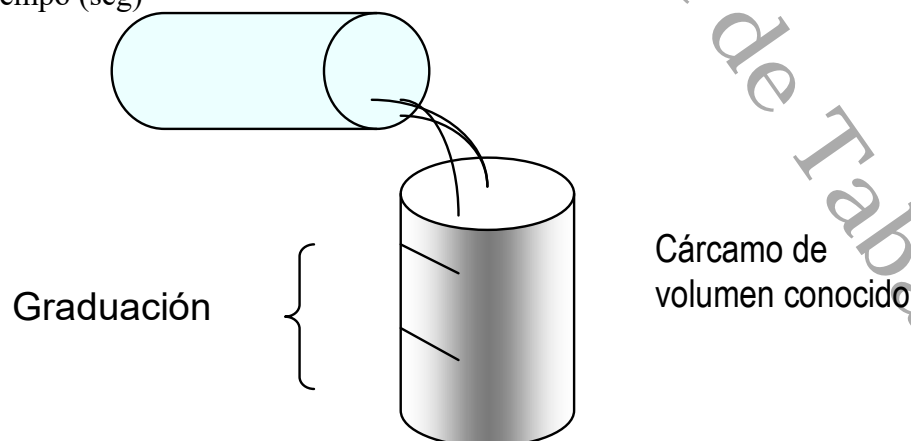


Figura 3. Graduación de la descarga al volumen de control que es el cárcamo.



7.1.3. Levantamiento físico de las unidades del sistema.

El levantamiento físico de las unidades se llevó a cabo mediante la toma de medidas de cada una de las secciones de la planta teniendo así, sus longitudes, alturas, profundidades para poder obtener las áreas correspondientes, así como el volumen, TRH y los tirantes operativos.

7.2. Actividades de laboratorio.

7.2.1. Análisis para la evaluación actual del sistema.

Para la determinación de la eficiencia actual se realizó la caracterización de los parámetros de control de procesos tales como: pH (SM 9040 B), Temperatura (SM 2550), CE (SM 2510 B), SDT (SM 2540), Color (APHA 2120), Turbiedad (SM 2130 B), OD (SM 4500-OG) y DQO (USEPA 410.4) en el cárcamo y el efluente de la PTAR.

7.2.2. Análisis de parámetros de control de proceso rutinario del sistema.

Para este se realizó la caracterización de los parámetros control que se establecieron en la investigación en todas las unidades de proceso y se realizó por procedimientos analíticos señalados en el Standar Methods y EPA. Para reducir los errores experimentales y aplicar las pruebas estadísticas, los experimentos se realizaron por triplicado. Los métodos usados para la medición de los parámetros fueron: SDT (SM 2540) y pH (SM 9040 B) fueron medidos con el equipo Hanna HI98129, la turbiedad se determinó por el método SM 2130 B, utilizando el equipo Hanna® HI 98703 con precisión de 0.01 UNT. El color se determinó mediante el método APHA 2120, con el equipo Lamotte® con una precisión de 0.1 UC modelo LTC.

7.2.3. Pruebas de tratabilidad, para el tratamiento fisicoquímico.

La prueba de tratabilidad (coagulación-floculación) se basó en el método de prueba de jarra, según la Organización Panamericana de la Salud y el Centro Panamericano de Estudios de Ingeniería Sanitaria (OPS / CEPIS) (1992). Para obtener la dosis óptima de sulfato de aluminio se realizó el proceso de coagulación-floculación, con dosificaciones partiendo de 0 a 3000 mg·L⁻¹ tomando como control 0 mg·L⁻¹ para sulfato de aluminio, en un equipo de prueba de jarras Phipps & Bird®, modelo PB700. Se realizaron dos pruebas experimentales dosificando sulfato de aluminio Al₂(SO₄)₃ por triplicado para obtener la dosis óptima de esta sal para el proceso que se realiza en la planta y en la segunda fase de prueba de tratabilidad se dosifico sulfato de aluminio Al₂(SO₄)₃ con hidróxido de calcio Ca(OH)₂ y evaluar el efecto en la PTAR (Ortiz, López, Torres, y Pampillón, 2018). Para la mezcla rápida se utilizó un tiempo de



retención de 2 minutos con 140 rpm, para la floculación un tiempo de retención de 25 minutos y 40 rpm y un tiempo de reposo de 30 minutos, de manera tal que se cumplieran con criterios de diseño del CEPIS-OPS (1992).

7.3. Actividades de gabinete.

7.3.1. Síntesis de procesos de las propuestas para optimización del sistema.

Se sabe que las aguas residuales domésticas y las aguas residuales industriales llegan a tener contaminantes cada vez más difíciles de eliminar con los más comunes tratamientos biológicos convencionales. Esto nos ha llevado al uso de tratamientos fisicoquímicos como la coagulación floculación, proceso en el cual se utilizan sales metálicas como pretratamiento o tratamiento secundario de aguas de difícil degradación, estos en ciertos momentos ocasionan daños al disponerse en cuerpos receptores sin tratamiento previo (Ortiz et al., 2018). Por esto se podría proponer un sistema de coagulación floculación, que consistiría en una unidad de mezcla rápida, floculación mecánica y sedimentación.

7.3.2. Selección de la alternativa y desarrollo de la ingeniería básica.

Para seleccionar la alternativa adecuada se tendrá en cuenta diversos factores, la económica para el mantenimiento y supervisión de la tecnología a aplicar, influyendo mucho la decisión que tomará el parque industrial. Teniendo como alternativa viable la implementación de humedales artificiales, en este contexto, los HA se han considerado una forma económicamente atractiva y energéticamente eficiente de proporcionar altos estándares de tratamiento de aguas residuales (Jiménez, López, Bautista, Castelán, Guerrero, Hernández, Torres, Cruz, Romellón y Solís, 2017). La ingeniería básica se desarrolló mediante el análisis de los resultados obtenidos de los gastos de operación, la calidad del agua residual, la condición actual del sistema, la eficiencia de remoción actual, el comportamiento actual entre las unidades del proceso considerando criterios nacionales de la CONAGUA (2019) y de Crites y Tchobanoglous (2000).

7.3.3. Eficiencia del sistema.

La eficiencia de proceso está dada en función de la concentración promedio de entrada y salida de una sustancia. Para cualquier sustancia dada se puede aplicar el cálculo de eficiencia requerida y eficiencia de proceso de remoción mediante la siguiente ecuación respectivamente (Vázquez y López, 2011).



$$\eta p = \frac{C1-C3}{C1} * 100 \text{ (Ec. 2)}$$

Donde:

- ηp = eficiencia de proceso (remoción de una sustancia dada) (%)
- C1 = Concentración de entrada de la sustancia al sistema ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
- C3 = Concentración de salida de la sustancia del sistema ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

7.3.4. Análisis estadísticos de datos.

Para determinar diferencias estadísticamente significativas entre las unidades de la planta de tratamiento se realizó el análisis estadístico ANOVA simple para las variables de interés como son, pH, SDT, turbiedad y color, ya que estas cumplieron con los postulados de normalidad y homocedasticidad por lo que los gráficos presentan los valores promedio con sus respectivas desviaciones estándar con un nivel del 95% de confianza en la prueba LSD de Fisher utilizando el software Statgraphic Centurion XVI.

8. Resultados y discusiones.

8.1. Características de las aguas residuales domésticas generadas en el parque industrial.

8.1.1. Gastos de operación

La planta de tratamiento de aguas residuales presentó un comportamiento discontinuo de operación en el periodo de monitoreo, el gasto de diseño de la PTAR es de $1.5 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. Se determinó que el Cárcamo opera con un caudal de entrada de $3.3\pm 0.36 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ como se muestra en la Figura 4, superior al gasto de diseño, Por ello esta unidad no cumplen con los criterios de diseño que establece la CONAGUA (2019) y criterios de diseño internacionales (Crites y Tchobanoglous, 2000).

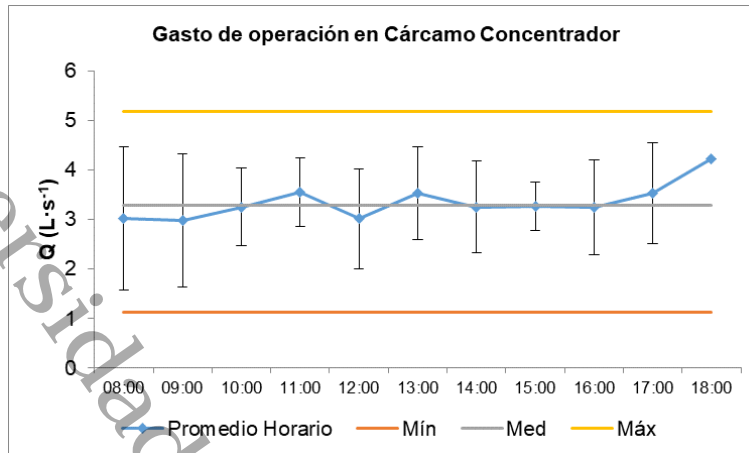


Figura 4. Gasto de operación del cárcamo.

8.1.2. Calidad del agua residual.

El resultado en negativo (pH de -11.08%, T de -0.2% y OD -55%) nos representa que hay un incremento de la concentración de salida del proceso, es decir el valor del efluente está por arriba del valor de entrada; el resultado positivo indica que el valor de concentración del efluente es menor a la concentración de entrada. Estos excedentes son obtenidos mediante la comparación del resultado del efluente de proceso y los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, CE-CCA-001/89 y LFDDAMAN, Lineamientos de Calidad de Agua, 2019, donde se comparan los parámetros de control de procesos físicos y químicos como se muestra en la Tabla 1.



Tabla 1. Calidad del agua residual de la PTAR.

Parámetro	Método	Cárcamo		Desc. final		E.R.(%)	LMP		Referencias
		X	DE	X	DE		P. M.	P. D.	
pH	SM 9040 B	7.6	0.5	8.5	0.8	-11.8	5 – 10	5 – 10	NOM-001-SEMARNAT-1996
Temperatura (°C)	SM 2550	28.5	3.4	28.6	2.4	-0.2	40 °C	40 °C	
CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	SM 2510 B	1688.6	553.4	1527.8	535.5	9.5	1011	1011	CE-CCA-001/89
SDT (ppm)	SM 2540	749.8	591.7	647.9	433.5	13.6	6	6	
OD ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SM 4500-OG	2.6	0.6	4.1	4.5	-55.0	6	6	PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017
DQO ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	USEPA 410.4	5354.5	2634.9	2317.3	1218.7	56.7	100	120	
DBO ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SM 4500-OG	114.3	28.8	53.8	8.9	53.0	75	150	NOM-001-SEMARNAT-1996
NT ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	NMX-AA-026	24.3	6.1	11.4	1.9	53.0	40	60	
PT ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	NMX-AA-029	4.3	1.1	2.0	0.3	53.0	20	30	
SST ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	NMX-AA-034	100.3	25.3	47.2	7.8	53.0	75	125	
G y A ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	NMX-AA-005	40.1	10.1	18.9	3.1	53.0	15	25	
SS ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	NMX-AA-034	10.9	6.9	4.6	2.7	58.0	1	2	
Col. T. (NMP/100)	NMX-AA-042	105416.7	8680.8	50833.3	9637.4	51.8			
Col. F. (NMP/100)	NMX-AA-042	35050.0	9907.4	9000.0	1809.1	74.3	1000	2000	
Cobre ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SM 3500-Cu	2.6	3.1	0.1	0.2	96.1	4	6	
Cromo VI ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	ASTM D1687-92	447.7	257.6	77.1	60.4	82.8	1,000	1,000	
Níquel ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Fotométrico	239.9	556.9	11.7	40.4	95.1	2	4	
Zinc ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SM 3500-Zn	108.6	372.1	0.0	0.0	100.0	10	20	
Aluminio ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SM 3500-Al	0.1	0.0	0.0	0.0	21.6	0.05	0.05	LFDDAMAN, LCA, 2019.
Bromo ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SM 8016	7.9	1.6	6.5	3.9	18.2	50	-	
Color (UC)	APHA 2120	2569.2	692.3	1437.2	277.0	44.1	10	10	
Turbiedad (UNT)	SM 2130 B	37.1	9.4	17.5	2.9	53.0	15	15	
Hierro ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	EPA 315B	132.9	452.6	0.2	0.1	99.9	1.0	1.0	
Manganeso ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	SM 3500-Mn	5.3	3.0	1.4	1.3	73.8	-	-	

X = Promedio, DE = Desviación estándar, LMP = Límite máximo permisible, P.M. =Promedio mensual, P. D. =Promedio diario, E.R. =Eficiencia de remoción.



8.2. Evaluación actual del sistema.

8.2.1. Condiciones del sistema

Actualmente el proceso inicia con la recepción de las aguas residuales, las cuales son almacenadas temporalmente en un cárcamo el cual cuenta con una rejilla para la retención de residuos sólidos urbanos. Posterior el agua residual es bombeada hacia el tanque ecualizador por una bomba de 0.5 HP a través de una línea de 2" de diámetro, en donde se tienen dos flotadores para controlar el flujo del agua. Las aguas residuales son nuevamente almacenadas temporalmente en el tanque ecualizar en donde se logra homogeneizar algunas propiedades fisicoquímicas del agua como el pH, la temperatura, carga orgánica, etc. Después el agua residual es bombeada hacia un filtro percolador por una bomba de 1 HP a través de una línea de 2" de diámetro. En esta unidad el agua residual se hace pasar por caída libre a través de un lecho de placas paralelas en la cual se encuentra adherido un medio microbiano el cual se encarga de reducir la carga orgánica mediante un proceso de degradación, en el cual los microorganismos utilizan la DBO soluble en el agua como fuente de carbono en sus procesos metabólicos. Una vez que el agua fluye a través del filtro percolador es direccionada con ayuda de un flotador hacia una unidad de sedimentación secundaria mediante una tubería de 2". El vertido del agua a esta unidad es por descarga libre sobre la superficie. En esta unidad se separan los sólidos y material suspendido del agua y posteriormente es vertida hacia dos estanques de regulación en donde nuevamente es bombeada a través de una tubería de 2" mediante una bomba de 1 HP. El agua llega a la unidad de filtración compuesta por un lecho empacado de arena sílice de diámetro aproximado de 5 mm. El agua desciende desde la parte superior del filtro hasta el fondo y en direccionada por gravedad mediante una tubería de 2", misma en la cual es inyectado el cloro por una bomba de pulso de 1/8 de HP, finalmente el agua llega a la unidad de contacto con cloración en donde a través de un sistema de mamparas es mezclada y posterior descargada al embalse (Tabla 2), el sistema no es controlado automáticamente, el principal control que tiene en la PTAR es mediante flotadores, los cuales se utilizan cuando existe una mayor caudal.



Tabla 2. Condiciones actuales del sistema.

Proceso	Área (m ²)	Tirante Operativo (m)	Volumen (m ³)	TRH (H) Qdiseño	TRH (H) Qmed	TRH (H) Qmin	TRH (H) Qmax
Cárcamo	1.76	0.25	4.93	0.91	0.41	1.21	0.26
Tanque Ecuilizador	9.61	0.32	25.95	4.81	2.15	6.39	1.39
Filtro percolador	11.88	1.00	11.88	2.20	0.98	2.93	0.64
Sedimentador	16.61	1.65	30.73	5.69	2.55	7.57	1.64
Tanque de Cloración	3.85	0.05	0.77	0.14	0.06	0.19	0.04
	Si cumple con los TRH desde su construcción $Q=1.5 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$						
	NO cumplen con los TRH de Criterios de Diseño con Gastos de Operación Actual						
	NO cumple con los TRH desde su construcción, $Q=1.5 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$						

8.2.2. Eficiencia actual

La PTAR se diseñó y opera con un gasto (Q_{med}) de $1.5 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ y el cárcamo reporta un caudal máximo instantáneo ($Q_{maxinst}$) de entrada de $3.3\pm 0.36 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, superior al gasto de diseño, de manera tal que cuando se rebasa la capacidad de la planta el gasto excedente es vertido al cuerpo receptor sin tratamiento previo, por lo que se presenta un fenómeno de corto circuito que no le permite cumplir con la eficiencia de remoción óptima en el proceso (Metcalf y Eddy, 1996; CONAGUA, 2019). Con los valores obtenidos en la calidad del agua en el cárcamo y el efluente se puede decir que la PTAR opera de manera deficiente (Tabla 3), dándonos como resultados bajas eficiencias de remoción en color, turbiedad y DQO, los cuales son los principales parámetros de control del proceso. De esta manera podemos ver el que las aguas residuales de entrada presentan contaminación industrial y presenta altas cargas químicas, lo cual hace difícil el tratamiento pues el sistema actual está diseñado para tratar aguas residuales biodegradables y estas están en el rango de difícil degradación y tóxicas según lo establece Crites y Tchobanoglous (2000), afectando tanto al proceso biológico del tratamiento como al cuerpo receptor, por lo que no cumple con los límites máximos permisibles de descarga de la normatividad vigente. Bajo este criterio una de las alternativas más viables para optimizar el proceso de tratamiento es implementar un tratamiento fisicoquímico como la coagulación floculación utilizando sulfato de aluminio e hidróxido de calcio, ambas sales utilizadas en sistemas convencionales de la coagulación floculación de aguas residuales (López, Bautista, Méndez, Hernández, Torres, Padrón, De la Cruz, y Ferrer, 2014).

Tabla 3. Eficiencia remoción de parámetros de control en la PTAR en su condición actual.

Parámetro	Cárcamo		Desc. final		ER (%)	LMP		Referencias
	X	±DE	X	±DE		P. M.	P. D.	
pH (UpH)	7.6	0.5	8.5	0.8	-11.8	5 – 10	5 – 10	NOM-001-SEMARNAT-1996
Temperatura (°C)	28.5	3.4	28.6	2.4	-0.2	40 °C	40 °C	
CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	1688.6	553.4	1527.8	535.5	9.5	1011	1011	CE-CCA-001/89
SDT ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	749.8	591.7	647.9	433.5	13.6	6	6	
OD ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	2.6	0.6	4.1	4.5	-55.0	6	6	
Color (UC)	2569.2	692.3	1437.2	277.0	44.1	10	10	LFDDAMAN, LCA, 2019.
Turbiedad (UNT)	37.1	9.4	17.5	2.9	53.0	15	15	
DQO ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	5354.5	2634.9	2317.3	1218.7	56.7	100	120	PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017

8.2.3. Comportamiento de las unidades de proceso actual.

De acuerdo a lo obtenido en el parámetro pH, el comportamiento de este en las unidades de proceso presentaron tendencia a ser base, es decir, los valores se reportaron dentro de un pH neutro rebasando valores de 8.02 en todas las etapas de tratamiento como se muestra en la figura 5. El valor más alto se encontró en el filtro (8.02 ± 0.16 UpH). El valor mediano más bajo se encontró en el tanque equalizador y la descarga final (7.28 ± 0.4 UpH).

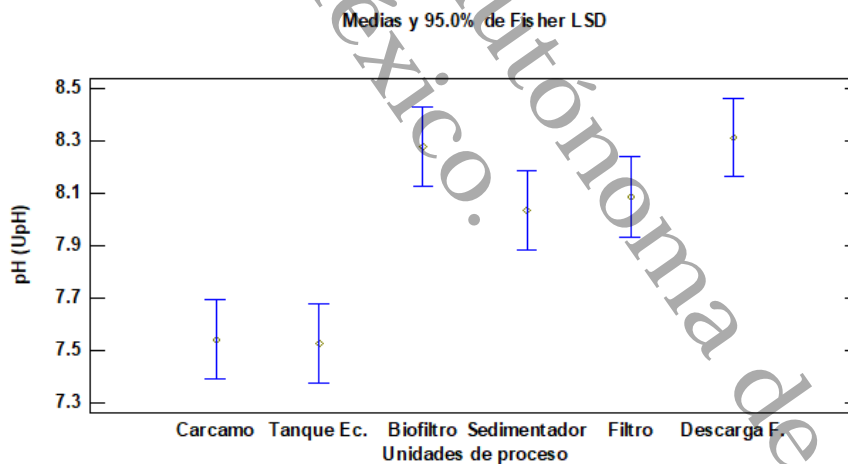


Figura 5. Comportamiento de pH en las unidades de la PTAR.

En la Figura 6 se muestra los SDT, entre las secciones de planta evaluadas no existe diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) en la variable de SDT, con un nivel del 95% de confianza. El valor más alto se encontró en el cárcamo (290 ± 363.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). El valor mediano más bajo se encontró en el sedimentador (217.21 ± 314.12 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

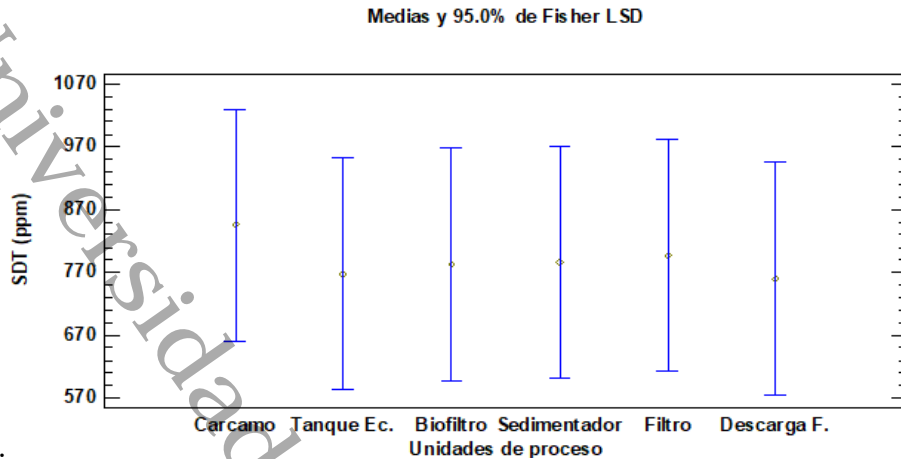


Figura 6. Comportamiento de SDT en las secciones de la planta PTAR.

En la Figura 7 se muestra el contraste entre las unidades de planta evaluadas mostrando que existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en el parámetro de color. El valor más alto se encontró en el cárcamo presentando unidades de $2330.67 \text{ UC} \pm 347.3$ (promedio \pm DE). El valor más bajo se encontró en la descarga final presentando unidades de 1220.0 UC , dándonos a conocer que la planta no tiene una calidad eficiente en el proceso para la remoción de este parámetro, ya que no se tiene una aplicación fisicoquímica como tratamiento que permita aumentar la eficiencia de remoción de dicho parámetro.

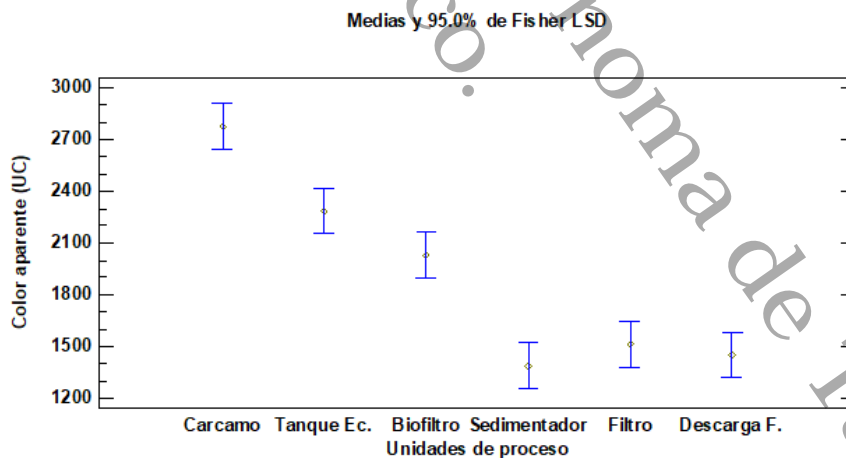


Figura 7. Eficiencia de remoción de Color en las secciones de la planta PTAR.

Al aplicar el análisis de varianza de ANOVA simple a la variable turbiedad se determinó que existe una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) entre los valores de cada proceso unitario de la planta (Figura 8). Los valores de turbiedad presentados muestran que el cárcamo presentó los valores más altos de $38.72 \pm 6.46 \text{ UNT}$, donde la turbiedad muestra eliminación



significativa hasta el sedimentador, siendo un poco superior en la descarga final se obtuvieron valores de 17.77 ± 2.20 UNT.

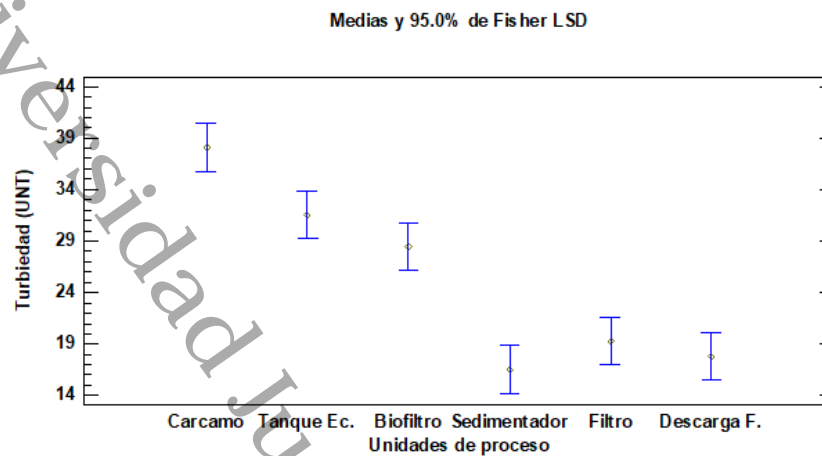


Figura 8. Eficiencia de remoción de Turbiedad en las secciones de la planta la PTAR.

8.3. Alternativas para la optimización del sistema actual de tratamiento de aguas residuales domésticas.

8.3.1. Optimización de la PTAR con tratamiento fisicoquímico.

La eficiencia de tratamiento de las aguas residuales depende de la coagulación y floculación. Este consiste en añadir agua residual aditivos químicos con el objetivo de favorecer la sedimentación de materia coloidal no sedimentable o aumentar la rapidez de sedimentación por la formación de flóculos, la prueba de jarras es el método comúnmente empleado para determinar la dosis óptima de coagulantes. (Toapanta, Roldan, Cisneros, Moreira, 2021). Los coagulantes utilizados en el tratamiento de agua son clasificados como coagulantes inorgánicos como sales de aluminio o hierro (Arias, Hernández, Castro y Sánchez, 2017). Bajo la consideración de aplicar un proceso fisicoquímico se muestran que las sales metálicas utilizadas en la simulación procesos son el $Al_2(SO_4)_3$ y el $Ca(OH)_2$, los cuales se presentan a continuación.

8.3.1.1. Dosis óptimas de las pruebas de tratabilidad.

Con la turbiedad reportada en la concentración inicial, la dosis óptima de $Al_2(SO_4)_3$ es de $3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, logrando remover el 94.10% de turbiedad, considerando que la concentración final es de 24.76 ± 11.07 UNT cuando se tiene concentración inicial de 420 UNT como se muestra en la Figura 9.

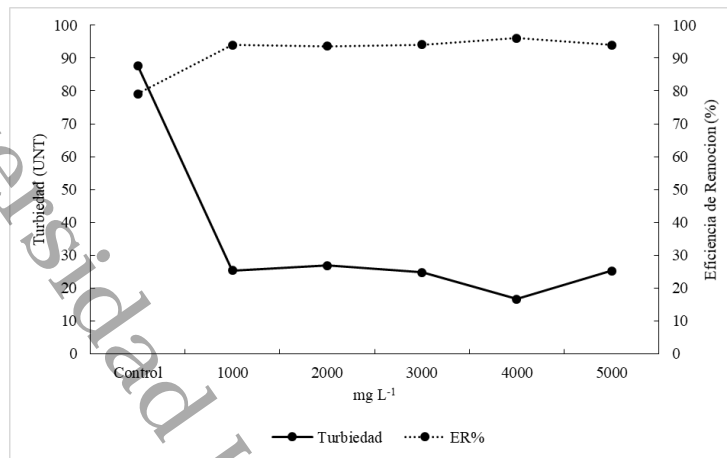


Figura 9. Remoción de turbiedad promedio del $Al_2(SO_4)_3$.

Con el color reportado en el agua inicial se obtuvo una dosis óptima de $Al_2(SO_4)_3$ de 3000 $mg \cdot L^{-1}$ logrando una remoción de 95.88 % de color, es decir la concentración final es de 149.3 UC cuando se tiene concentración inicial de 3633 UC como se muestra en la Figura 10.

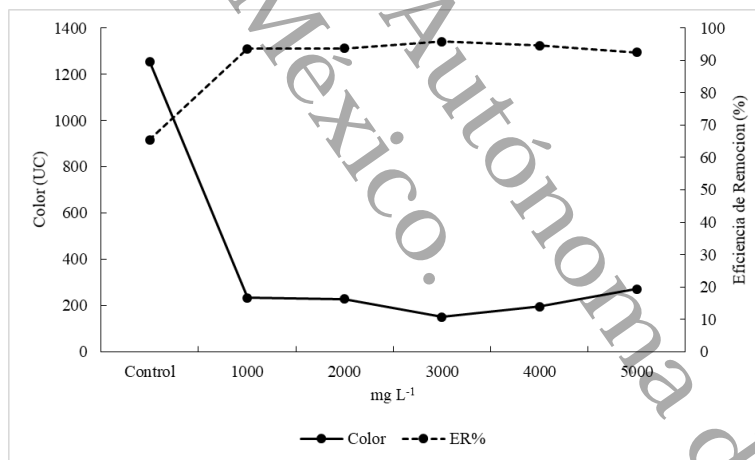


Figura 10. Remoción de color promedio del $Al_2(SO_4)_3$.

Para la mezcla de $Al_2(SO_4)_3$ e $Ca(OH)_2$, las dosis óptimas fueron 2000 $mg \cdot L^{-1}$ para ambas sales, logrando una remoción de 98.17 % de la turbiedad, es decir la concentración final es de 7.6 ± 0.2 UTN cuando se tiene concentración inicial de 420 UNT como se muestra en la Figura 11.

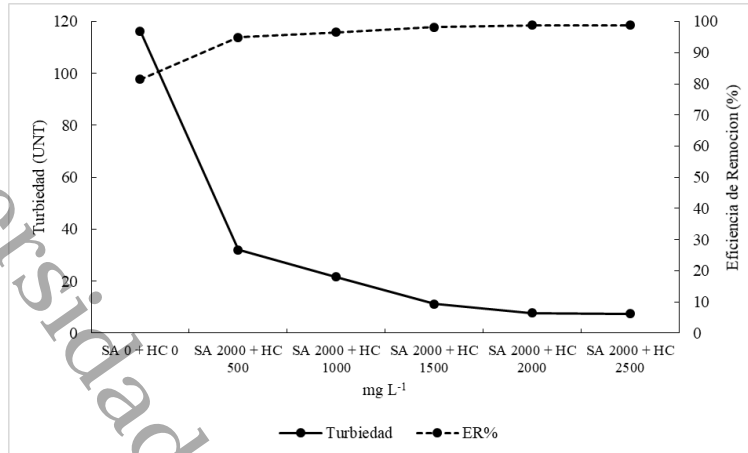


Figura 11. Remoción de turbiedad con $Al_2(SO_4)_3$ y $Ca(OH)_2$.

Con la mezcla de $Al_2(SO_4)_3$ y $Ca(OH)_2$, se encontró que la dosis óptima $2000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para ambas sales, se logró una remoción de 94.49 % de color, es decir la concentración final es de 200 UC cuando se tiene concentración inicial de 3633 UC como se muestra en la Figura 12.

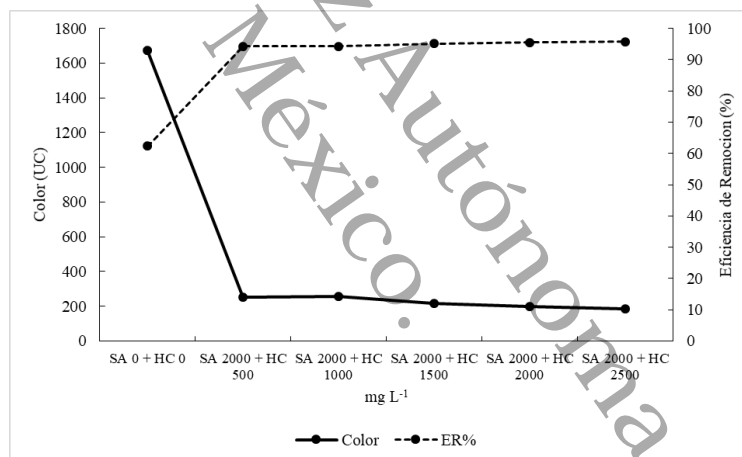


Figura 12. Remoción de color promedio con $Al_2(SO_4)_3$ y $Ca(OH)_2$.

8.3.1.2. Proceso de tratamiento final con el tratamiento fisicoquímico.

La optimización propuesta para la PTAR consiste en agregar al tren de tratamiento un sistema de coagulación floculación, en una unidad de mezcla rápida, floculación mecánica y sedimentación. Del mismo modo se propone cambiar el medio filtrante previo a la cloración para que opere con zeolitas. Sólo podrá utilizarse la cloración cuando las concentraciones de DQO estén bajo los $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y se asegure que no hay materia orgánica ($<20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) para evitar la formación de compuestos organoclorados que puedan afectar a cuerpo receptor. Con estas



adecuaciones el sistema de tratamiento propuesto podrá alcanzar un 98.5% de eficiencia de remoción de DQO permitiéndole cumplir la normatividad ambiental vigente (Tabla 4).

Tabla 4. Síntesis de procesos de la optimización propuesta al sistema actual de tratamiento de aguas residuales del parque industrial.

Unidades de proceso	DQO (mg·L ⁻¹)	ER (%)
Cárcamo	5354.5	
Tanque equalizador		
Coagulación floculación	416.8	92.2
Filtro percolador	233.0	44.1
Sedimentador secundario		
Filtro con zeolita aniónica-catiónica	81.6	65
Cloración		
ERT(%) del sistema.		98.47

8.3.2. Optimización de la PTAR vía humedales artificiales

Los HA pueden ser una alternativa en países en vías de desarrollo, dado sus bajos costos de instalación, operación y mantenimiento. (Amabilis, Siebe, Moeller, y Duran, 2016), ya que no son costosos ni requieren altos consumos energéticos, además la operación y mantenimiento de estos no requieren de personal especializado ni procesos complicados, a nivel mundial se ha extendido cada vez más el uso de los humedales artificiales, los cuales funcionan a partir de los mecanismos propios que usa la naturaleza para la depuración de las aguas residuales, donde se combinan procesos físicos, químicos y biológicos entre el sustrato, las plantas, los microorganismos y la atmósfera (Larriva y González, 2017). Los HA se clasifican típicamente por dos criterios que son: el régimen de flujo de agua, en los que destacan los humedales de flujo libre (HAFL) y de flujo subsuperficial (HAFS); y el tipo de macrófitas instaladas en el humedal (emergentes, flotantes y sumergidas) (Solís, López, Bautista, Hernández y Romellón, 2016).

8.3.2.1. Comportamiento de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial.

El tren de tratamiento que se implantará en el sistema completaría a la PTAR actual será de cuatro humedales en serie, le primero humedal es un HAFL con la especie *Potenderia cordata*, el segundo HAFL con la especie *Sagittaria lancifolia*, el tercer HAFL con especie *Thypa dominguensis* y el cuarto HAFS con *Thalia geniculata* (Tabla 5). El comportamiento de los HAFL con *Potenderia cordata*, llega a ser muy efectivo en el tratamiento de aguas residuales ya que se han obtenido altas eficiencias de remoción, entre 95.3% y 95.44% de DQO y Color (Marín, Solís, López, Bautista y Romellón, 2016), utilizando vegetación *Sagittaria lancifolia*

donde se ha demostrado una remoción alcanzada fue de 96.85% para SST, 95.85% para DBO₅, 96.78% para NT y 96.79% para PT (García, López y Torres, 2019), con la vegetación *Thypha domingensis* ha logrado demostrar una remoción de turbiedad del 97.1%, 83.4% de color, 97.8% de DQO, 97.5% de DBO₅, 97.2% de NT, 91.1% de PT y 97.7% de SST (Solís et al., 2016). En cuanto al comportamiento del humedal de flujo subsuperficial con vegetación *Thalia geniculata*, han demostrado que puede lograr una remoción del 90% de DBO₅, 86.7% de color y 90.3% de turbiedad (López, Bautista, Valdez, Torres, López, Pérez y Pampillón, 2019).

8.3.2.2. Proceso de tratamiento final con los humedales artificiales.

En la Figura 13 podemos observar el diagrama de procesos con la tecnología antes mencionada como propuesta para la optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales y en la Tabla 5 la síntesis de procesos.

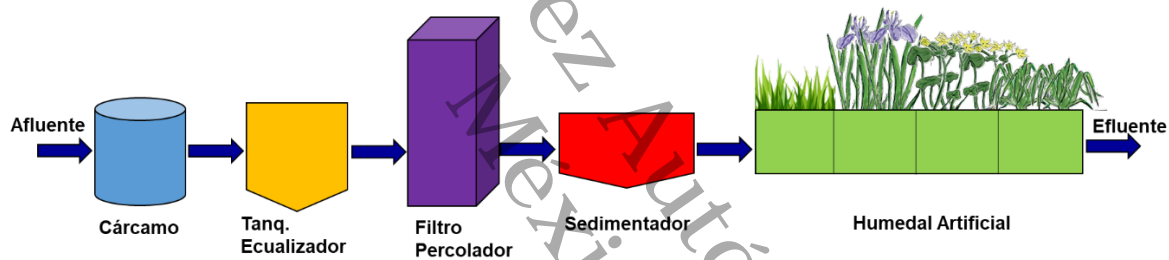


Figura 13. Diagrama de Procesos con la propuesta del tratamiento vía humedales artificiales.

Tabla 5. Síntesis de procesos de la optimización propuesta al sistema actual de tratamiento de aguas residuales del parque industrial.

Unidades de proceso	DQO (mg·L ⁻¹)	ER (%)
Cárcamo	5354.5	0.0
Tanque ecuilizador		
Filtro percolador	2317.3	57
Sedimentador secundario		
HAFL- <i>Pontederia cordata</i> (tule)	1313.03	75
HAFL- <i>Sagittaria lancifolia</i> (cola de golondrina)	980.23	82
HAFL- <i>Typha domingensis</i> (espadaño)	450.84	92
HAFS- <i>Thalia geniculata</i> (popal)	65.25	99
ERT(%) del sistema.		81



8.3.3. Ingeniería básica de la alternativa seleccionada en la optimización del proceso del sistema de tratamiento actual

La alternativa seleccionada en este caso el tren de tratamiento de humedales artificiales tuvo que ver con la decisión económica de la operación en el mantenimiento de la PART del parque industrial. A continuación, se muestra la memoria de cálculo para la construcción del tren de tratamiento.

8.3.3.1 Consideraciones de los humedales artificiales.

Datos del Proyecto.

Tabla 6. Datos del proyecto. Fuente: CONAGUA 2019c.

Parámetros	Valor	Unidad	Formula
Población Proyecto (Pp)=	500	hab	$M = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{\frac{Pp}{1000}}} \text{ (Ec. 3)}$
Dotación (Dot)=	60	l/hab/día	
Aportación= 0.7 Dot=	42	l/hab/día	
Carga Orgánica Unitaria (COU)=	120	gr/hab/día	
No. Módulos=	1		
Coefficiente de Seguridad (Cs)=	1.5		
Coefficiente de Harmon (M)=	3.97		

Datos Meteorológicos.

Tabla 7. Datos meteorológicos. Fuente: CONAGUA 2019c.

Parámetros	Mes cálido (junio)		Mes más frío (diciembre)	
Temperatura Media Mensual	29.6	°C	24.3	°C
Precipitación Media Mensual	227.4	mm / mes	162.0	mm / mes
Evaporación Media Mensual	5.0	mm / mes	2.0	mm / mes
Infiltración	5	mm / día	5	mm / día

Gastos de Diseño.

Tabla 8. Gasto de diseño. Fuente: CONAGUA 2019c.

Caudal	Gasto total de proceso		Gasto por módulo		Formula.
	l / seg	m ³ /día	l / seg	m ³ /día	
Q med =	0.2	21.0	0.2	21.0	$\frac{Ap*Pp}{86400} \text{ (Ec. 4)}$
Q mín =	0.1	10.5	0.1	10.5	$0.5 * Q \text{ med (Ec. 5)}$
Q máx. inst =	1.0	83.5	1.0	83.5	$Q \text{ med} * M \text{ (Ec. 6)}$
Q máx. ext =	1.4	125.2	1.4	125.2	$Q \text{ máx inst} * 1.5 \text{ (Ec. 7)}$



Dimensionamiento preliminar de unidades de tratamiento (Q módulo).

Tabla 9. Dimensionamiento de unidades. Fuente: Crites et al., 2000.

TQ1: flujo libre 1			Formula.	TQ2: flujo libre 2			Formula.
$t_{r1} =$	0.45	d	$VTQ1 = Vd * tr1$ (Ec. 8)	$t_{r2} =$	0.45	d	$VTQ2 = Vd * tr2$ (Ec. 9)
$h_1 =$	0.50	m		$h_2 =$	0.50	m	
$V_{TQ1} =$	9.45	m^3		$V_{TQ2} =$	9.45	m^3	
$A_{TQ1} =$	18.90	m^2	$ATQ1 = VTQ1/h1$ (Ec. 10)	$A_{TQ2} =$	18.90	m^2	$ATQ2 = VTQ2/h2$ (Ec. 11)
TQ3: libre 3			Formula.	TQ4: subsuperficial 1			Formula.
$t_{r1} =$	0.45	d	$VTQ3 = Vd * tr3$ (Ec. 12)	$t_{r1} =$	0.45	d	$VTQ4 = Vd * tr4$ (Ec. 14)
$h_1 =$	0.5	m		$h_1 =$	0.5	m	
$V_{TQ3} =$	9.45	m^3		$V_{TQ4} =$	9.45	m^3	
$A_{TQ3} =$	18.90	m^2	$ATQ3 = VTQ3/h3$ (Ec. 13)	$A_{TQ4} =$	18.90	m^2	$ATQ4 = VTQ4/h4$ (Ec. 15)
$A_T = 75.6 \text{ o } 0.0076 \text{ Ha}$				$AT = (ATQ1 + ATQ2 + ATQ3 + ATQ4)$ (Ec. 16)			

Criterios de diseño de Humedales Artificiales.

Tabla 10. Datos del Proyecto. Fuente: CONAGUA 2019c.

Humedal	Tirante (m)	Tr (días)	S (%)	n	K
HAFL	0.1 - 0.45	6 a 14	0-0.5		0.40-0.65
HAFS	0.45 - 1.0	14	0-0.5	0.3-0.75	0.25-0.40
HAE	0.6-1.2	7 a 14			0.20-0.25

Parámetros de entrada al sistema de tratamiento.

Tabla 11. Parámetros de entrada. Fuente: Metcalf et al., 1996.

Concentración de entrada al sistema			Conc. por modulo	
COT=	20.00	kg/día	20.00	kg/día
FVOL=	21.00	m3/día	21.00	m3/día
CDBO=	952	mg/l	952	mg/l
Eficiencia requerida del sistema (NOM-001-SEMARNAT-1996)				
C LMP DBO=	75			mg/l
C LMP SST=	75			mg/l
ER DBO=	92.1			%
Parámetros de entrada				
T amb	32			°C



Eficiencia requerida del sistema (NOM-001-SEMARNAT-1996)				
T agua	28			°C
C DBO	952			mg/l
CSST	1429			mg/l
C SSED	60			ml/l
Parámetros	g/hab/día	g/hab/día	M (kg/día)	C (mg/l)
DBO ₅	40 a 120	40.0	20	952
DQO	110 a 295	110.0	55	2619
SST	60 a 150	60.0	30	1429
NH ₃	5 a 12	5.0	3	119
N org N	4 a 10	4.0	2	95
NTK	9 a 21.7	9.0	5	214
P ORG COMO P	0.9 a 1.8	0.9	0	21
P INORG COMO P	1.8 a 2.7	1.8	1	43
P TOTAL COMO P	2.7 a 4.5	2.7	1	64
GyA	10 a 40	10.0	5	238

8.3.3.2. Tasas de reacción para la remoción de constituyentes en humedales artificiales.

Coefficiente de remoción en base a volumen.

El principio supone a un único constituyente que es la DBO.

$$r_{DBO} = K_{DBO} \quad (\text{Ec. 17})$$

Tabla 12. Datos de eficiencia de remoción. Fuente: Reed, Crites & Middlebrooks (1995).

r_{DBO} =	Tasa de remoción de DBO por unidad de tiempo por volumen (ML ⁻³ T ⁻¹)			
k =	Coeficiente de la velocidad para la remoción de DBO, (T ⁻¹)			
DBO =	Concentración de DBO carbonácea, ML ⁻³			
	HAFL	HAFS	HAE	Unidad
k=	0.7	0.7	0.7	
Ce DBO=	952	952	952	mg/l
Cs DBO(TC)=	229.8	229.8	229.8	mg/l
Cs DBO(TSC)=	327.9	327.9	327.9	mg/l
η(TC)=	75.9	75.9	75.9	%
η(TSC)=	65.6	65.6	65.6	%
Tren	Ce	Cr	Cs	ER DBO



HAFL	952	624	328	65.6
HAFL	328	215	113	65.6
HAFL	113	74	39	65.6
HAFS	39	29	9	75.9
			ETR	99.0

Coefficiente de remoción en base al área.

$$r_{DBO} = -K \left(\frac{A}{V} \right) DBO = -\left(\frac{K_A}{H} \right) DBO \text{ (Ec. 18)}$$

Tabla 13. Coeficiente de remoción en base al área. Fuente: Kadlec y Knight (1996).

r_{DBO} =	Tasa de remoción de DBO por unidad de tiempo por volumen ($ML^{-3}T^{-1}$)			
k_A =	Coeficiente de la velocidad para la remoción de DBO, (LT^{-1})			
DBO=	Concentración de DBO carbonácea, mg/L			
A=	Área de la superficie, m^2			
V=	Volumen, m^3			
H=	Profundidad, m			
	Flujo Libre		Flujo Subsuperficial	
k_A =	0.7		0.7	
DBO=	952	mg/l		
A=	70	m^2		
V=	32.0	m^3		
H=	0.61	m		
$C_{DBO(TC)}$ =	42.5	mg/l	42.5	mg/l
$C_{DBO(TSC)}$ =	165.6	mg/l	165.6	mg/l
$\eta(TC)$ =	95.54	%	95.54	%
$\eta(TSC)$ =	82.61	%	82.61	%



Tiempo de retención teórico en un humedal artificial.

Tabla 14. Tiempo de retención. Fuente: CONAGUA 2019c.

Área prop	203.4	pie ²				
n = Porosidad del medio (0.35-0.75)	0.75	Diámetro de 1.5 in en la grava				
a = ancho	8.2	pie =	2.5	m		
b = largo	91.8	pie =	28.0	m		
Ti = tirante o profundidad	2.0	pie =	0.6	m		
Q = Gasto (m ³ /día)		pie ³ /día =	21.0	m ³ /día		
Variables	n real		Con hid		Con F. C.	
Tiempo r h=	1.5	días	2.0	días	2.7	días
Volumen =	32.0	m ³	42.7	m ³	57	m ³
Área =	52.47	m ²	69.96	m ²	93.29	m ²
Factor que indica el excedente de corrección			1.33	b=	28.0	m
				a=	2.5	m

Determinación del efluente teórico de DBO en un flujo pistón (ideal).

Tabla 15. Determinación de DBO en flujo pistón. Fuente: Kadlec et al., 1996.

DBO _{inf} =	952	mg/L	Formula.		
k=	0.7	d ⁻¹	$DBO_{efl} = DBO_{efl} e^{-kt}$ (Ec. 19)		
t=	2.0	días			
DBO _{efl} =	230	mg/L	η proceso =	75.9	% R DBO

Ajuste a n reactores de mezcla completa con volúmenes iguales en serie.

Tabla 16. Ajuste a n. Fuente: Kadlec et al., (1996).

C _n = Conc. De DBO en reactor n de la serie (mg/l)	85.2	Formula.
C ₀ = Conc. Del Influyente (mg/l)	571.4	$C_n = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{kV}{nQ}\right)^n}$ (Ec. 20)
K = Cte global de tasa de remoción de DBO = 1.2 d ⁻¹	1.2	
V= Volumen total del Humedal	42.7	
n = Numero de reactores	4.0	
Q = Gasto medio (m ³ /día)	21.0	

Cálculo de la tasa aparente de remoción.

Tabla 17. Tasa aparente de remoción. Fuente: Kadlec et al., (1996).

K _{aparente} =	1.25	d ⁻¹	Formula.	$\frac{\ln\left(\frac{DBO_{eff}}{DBO_{efl}}\right)}{-t} = K$ (Ec. 21)
-------------------------	------	-----------------	-----------------	---



Modelado de la remoción de DBO.

Tabla 18. Modelado de la remoción de DBO. Fuente: Kadlec et al., (1996).

	Diseño	0.96	Formula.
k= Cte de la TR en el tiempo (d ⁻¹)			$k = \frac{K_{global}}{(1 + rt)n}$ (Ec. 22)
k _{global} = Cte inicial TRG en el tiempo (d ⁻¹)		1.25	
r= Coeficiente de retardo, (d ⁻¹)	0.1 - 0.4	0.2	
t = tiempo (dist/vel)		1.5	
n = exponente relacionado con el constituyente removido	0.0 - 1.0	1	
L= longitud			
V = velocidad			

Modelado de la remoción de SST.

Tabla 19. Modelo de la remoción de SST. Fuente: Crites et al., 2000.

		Formula.
SST _n = Conc. De SST en reactor n de la serie (mg/l)	247.0	$SST_n = \frac{C_o}{\left(1 + \left(\frac{ko}{1} + rt \times \frac{V}{nQ}\right)\right)^n}$ $= C_o \left(1 + \left(0.25 \frac{ko}{1} + rt\right)\right)^n$ (Ec. 23)
SST _o = Conc. Del Influyente (mg/l)	857	
K _o = Cte global de tasa de remoción de SST sin retardo = 1.2 d ⁻¹	1.25	
V= Volumen total del Humedal	31.99	
n = Numero de reactores	4.00	
Q = Gasto medio (m ³ /día)	21.00	
r= Coeficiente de retardo, (d ⁻¹)	0.20	
t = tiempo de retención	1.52	
SST _n sin retardo (mg/l)	180.6	
η _{SST} =	71.2 %	

Impacto de los tiempos de retención sobre las tasas de remoción.

Tabla 20. Tiempos de remoción sobre las tasas de remoción. Fuente: Crites et al., 2000.

Condiciones expe. con un TRH= 0.8 d			Condiciones expe. con un TRH=6.4 d			Formula.
C _s =	29	mg/l	C _s =	12		$\ln \frac{(C_5)}{(C_0)} = K$ (Ec. 24)
C _o =	857.14	mg/l	C _o =	857.14	mg/l	
t=	0.8	d	t=	6.4	d	
K=	4.23	d ⁻¹	K=	0.67	d ⁻¹	

Efecto de la temperatura en los humedales artificiales.

Tabla 21. Temperatura en humedales artificiales. Fuente: Crites et al., 2000.

Condiciones expe. con un TRH= 0.8 d			Condiciones expe. con un TRH=6.4 d			Formula.
θ=	1.06		θ=	1.06		$k_2 = K_1 \theta^{(T_2 - T_1)}$
T ₁ =	10	°C	T ₁ =	10	°C	



T2=	26	°C	T2=	26	°C	(Ec. 25)
K1=	4.23	d-1	K1=	0.67	d-1	
K2=	10.75	d-1	K2=	1.69	d-1	
Nuevo t=	0.3	d	Nuevo t=	2.5	d	

8.3.3.3. Humedal artificial de flujo libre (TQ1).

DBO máxima residual en el efluente de HAFL.

Tabla 22. DBO máxima residual en el efluente de HAFL. Fuente: Crites et al, 2000.

DBO inf=	571.4	mg/l	Formula. $DBO_{RARA} = DBO_{EHA} - DBO_{DV}$ (Ec. 26)
DBO dv=	5	mg/l	
DBO eha=	25	mg/l	
DBO rara=	20	mg/l	

Tasa de remoción global de DBO.

Tabla 23. Condiciones con un TRH de 0.8 días. Fuente: Crites et al, 2000.

Condiciones experimentales con un TRH= 0.8 d			Considerando n=1
$\theta=$	1.03		T= 1.92
T1=	20	°C	Formula. $k2 = k1 \phi^{(T2-T1)}$ (Ec. 27)
T2=	34	°C	
K1=	0.70	d ⁻¹	
K2=	1.06	d ⁻¹	

Determinación del tiempo de retención para la DBO.

Tabla 24. Determinación del TRH para DBO. Se considera el efecto de dispersión axial y el efecto de las temperaturas. Fuente: Reed et al., 1995.

T= V/ Q	0.9 días
$\eta=$	0.75
tn=	0.675
FCC=	1.33
t =Tiempo de retención para la remoción de la DBO, d	2.5
V= Volumen total del humedal (m ³)	42.0
Q= Gasto medio (m ³ /d)	10.5
Cn= Conc de DBO en el efluente del reactor n de la serie (mg/l)	75
Co= Conc en el influente (mg/l)	571
n= Numero de reactores de mezcla completa en serie	4
k _o = Cte GTR de DBO, corregida para la temperatura, (d ⁻¹)	1.06



Tasa de la carga orgánica.

Tabla 25. Tasa de carga orgánica. Fuente: CONAGUA 2019.

Límite máximo permisible= 110 kg/had		
tco= tasa de carga orgánica (lb/ac d)		3503
C= Conc en el influente (mg/l)		2619.0
η = porosidad con respecto al no. De plantas (0.65 - 0.75)		0.75
F2= 3,07ac ft /Mgal		3.07
F1= 8.34 lb /(Mgal*(mg/l))		8.34
dw= profundidad del flujo (ft)		1.64
C=	2.6	kg/m ³
mc=	27.5	kg/día
Area=	0.003	ha
tco=	10741	kg/had
		Formula.
		$tco = Cd\eta F / F_{21}$
		(Ec. 28)

Área neta del humedal para remoción de DBO.

Tabla 26. Área del humedal para remoción de DBO. Fuente: Kadlec et al., 1996

Área=	0.01	ha	70.0	m ²	Formula.
No. Módulos=	1				$A = \frac{Qt}{dw \eta}$ (Ec. 29)
		Total	Unidad	Módulo	Unidad
w= ancho del humedal de flujo libre		5.9	m	5.9	m
L= largo del canal		12	m	12	m
RA= relación largo ancho		2			

Tasa de carga para la remoción de SST.

Tabla 27. Tasa de carga para remoción de SST. Fuente: Crites et al., 2000.

Cs=	116	mg/l		Formula.
Co=	1000	mg/l	88.4 %	$Cs = Co[0.1139 + 8.4 \times 10^{-4} (Lw)]$
Cte 1=	0.114			
Cte 2=	0.00084			
Lw=	3	in/día	Tasa de carga hidráulica del agua residual (1-3 in)	
				(Ec. 30)

Tiempo de retención para la remoción de nitrógeno.

Tabla 28. Tiempo de retención para la remoción de nitrógeno. Fuente: Crites et al., 2000.

Ninf= Conc. De NT en el influente (mg/l)	214	Formula.
--	-----	-----------------



Nefl= Conc. De NT en el efluente (mg/l)	5	$\ln \frac{N_{inf}}{N_{efl} - N_N} = t \text{ (Ec. 31)}$
Kn= Cte de remoción de nitrógeno 20°C d ⁻¹	-0.2187	
Tiempo de retención para la remoción de N, días =	17.18	

Calculo del área neta del humedal para remover nitrógeno.

Tabla 29. Área del humedal para remover nitrógeno. Fuente: Crites et al., 2000.

A= Área neta del humedal para remover nitrógeno (ha)	0.0276	275.59 m ²	Formula.
Q= Gasto promedio (m ³ /día)	21.00	21.00	$A = QF/L_w$ (Ec. 32)
F= Factor de conversión (0.1 ha*mm/m ³)	0.1	0.1	
Lw= tasa de carga hidráulica del agua residual (mm/d)	76.2		$n = a/dw^{1/2}$ (Ec. 33)

Calculo de la velocidad del fluido en la sección del humedal.

Tabla 30. Velocidad del flujo en la sección del humedal. Fuente: Crites et al., 2000.

Q Mod=	21.00	m ³ /día	n= cte de maning=	0.297 s* ft ^{1/3}	Formula.
dw=	0.5	m	a= factor de resistencia (s ft ^{1/6})		$V = Q/d_w W$ (Ec. 34)
W Mod=	6	m	a= 0.487	si dw>1.3 ft	
Velocidad=	0.00008	m/s	a= 1.949	si dw=1 ft	$s = \left[\frac{Vn}{2}\right]^2$ dw^3 (Ec. 35)
S=	3.3124E-09		a= 7.795	si dw <1 ft	

8.3.3.4. Humedal artificial de flujo subsuperficial (TQ2).

Tasa de remoción global de DBO.

Tabla 31. Condiciones con un TRH de 0.8 días. Fuente: Crites et al., 2000.

θ=	1.06		Formula.
T1=	20	°C	$k_2 = k_1 \theta^{(T_2 - T_1)}$ (Ec. 36)
T2=	34	°C	
K ₁ =	0.70	d ⁻¹	
K ₂ =	1.6	d ⁻¹	K aparente

Determinación del tiempo de retención para la DBO.

Tabla 32. Efecto de dispersión axial y efecto de temperaturas. Fuente: Crites et al., 2000.

T= V/ Q	0.50	días	Formula.
η=	0.75		$t = -\ln \left(\frac{C_n}{C_0}\right) / k_0$ (Ec.36)
tn=	0.38		
FCC=	1.33		



t =Tiempo de retención para la remoción de la DBO, d	1.3	
V= Volumento total del humedal (m ³)	42	
Q= Gasto medio (m ³ /d)	10.5	
Cn= Conc de DBO en el efluente del reactor n de la serie (mg/l)	75	
Co= Conc en el influente (mg/l)	571	
n= Numero de reactores de mezcla completa en serie	4	
k _o = Cte GTR de DBO, corregida para la temperatura, (d ⁻¹)	1.6	
tco= tasa de carga orgánica (lb/ac d)	794	Formula $tco = (C d_w \eta F_1) / (\frac{t}{F_2})$ (Ec. 37)
C= Conc en el influente (mg/l)	571.43	
η= porosidad con respecto al no. De plantas (0.3 - 0.5)	0.40	
F2= 3,07ac ft /Mgal	3.07	
F1= 8.34 lb /(Mgal*(mg/l))	8.34	
dw= profundidad del flujo (ft)	1.64	

Tasa de la carga orgánica.

Tabla 33. Tasa de carga orgánica. Fuente: Crites et al., 2000.

C=	0.57142857	kg/m ³		
mc=	6	kg/día		
Área=	0.0	ha		
tco=	2343	kg/had	889.8	kg/had

Área neta del humedal para remoción de DBO.

Tabla 34. Área del humedal para remoción de DBO. Fuente: CONAGUA 2019.

Área=	0.01	ha=	67	m ²	Formula. $A = \frac{Qt}{d_w \eta}$ (Ec. 38)	
No. Módulos=			1			
			Total	Unidad	Módulo	Unidad
w= ancho del humedal de flujo libre			6	m	5.8	m
L= largo del canal			12	m	12	m
RA= relación largo ancho			2			

Tasa de carga para la remoción de SST.

Tabla 35. Tasa de carga para remoción de SST. Fuente: Crites et al., 2000.

Cs=	116	mg/l	Formula. $Cs = Co[0.1139 + 8.4 \times 10^{-4}(L_w)]$ (Ec. 39)
Co=	1000	mg/l	
Cte 1=	0.1139		



Cte 2=	0.00084		
Lw=	2	in/día	Tasa de carga hidráulica del agua residual (1-3 in)

Tiempo de retención para la remoción de nitrógeno.

Tabla 36. Tiempo de retención para la remoción de nitrógeno. Fuente: Crites et al., 2000.

Ninf= Conc. De NT en el influente (mg/l)	214	Formula. $\frac{\ln\left(\frac{N_{inf}}{N_{efl}}\right)}{K_N} = t$ (Ec. 40)
Nefl= Conc. De NT en el efluente (mg/l)	5	
Kn= Cte de remoción de nitrógeno 20°C d ⁻¹	-0.2187	
Tiempo de retención para la remoción de N, días =	17.18	

Calculo del área neta del humedal para remover nitrógeno.

Tabla 37. Área del humedal para remover nitrógeno. Fuente: Crites et al., 2000.

A= Área neta del humedal para remover nitrógeno (ha)	0.021	206.7 m ²	Formula. $A = QF/L_w$ (Ec. 41)
Q= Gasto promedio (m ³ /día)	10.50		
F= Factor de conversión (0.1 ha*mm/m ³)	0.1		
Lw= tasa de carga hidráulica del agua residual (mm/d)	50.8		

Calculo de la velocidad del fluido en la sección del humedal.

Tabla 38. Velocidad del fluido en la sección del humedal. Fuente: CONAGUA 2019.

Q Mod=	10.50	m ³ /día	n= cte de maning=	0.297 s* ft ^{1/3}	Formula. $V = Q/d_w W$ (Ec. 42) $n = a/d_w^{1/2}$ (Ec. 43)
dw=	0.5	m	a= factor de resistencia (s ft ^{1/6})		
W Mod=	6	m	a=	0.487 si dw > 1.3 ft	
Velocidad=	0.000	m/s	a=	1.949 si dw = 1 ft	
			a=	7.795 si dw < 1 ft	
La pendiente del canal será=	8.6008E-10		Formula.	$s = [Vn/d_w^{2/3}]^2$ (Ec. 44)	

8.3.3.5. Eliminación de coliformes totales.

Eliminación de Coliformes Totales en el HAFL1.

Tabla 39. Datos para la eliminación de coliformes totales en el HAFL1. Fuente: CONAGUA 2019.

Temperatura del mes más frío	28.0	°C
Concentración del influente	1.82E+06	NMP/100 ml
Tiempo de retención hidráulico	0.45	días
Tirante de la laguna	0.60	m



Tabla 40. Constante de remoción bacteriana. Fuente: Crites et al., 2000.

$K_{CF} =$	1.4	día ⁻¹	Formula.	$K_{CF} = 0.84 (1.07)^{TL-20}$ (E.45)
------------	-----	-------------------	-----------------	---------------------------------------

Tabla 41. Relación largo y ancho de tanque. Fuente: Crites et al., 2000.

Largo =	7.00	m
Ancho =	2.50	m
L/B =	2.8	

Tabla 42. Coeficiente de dispersión (¥). Fuente: Crites et al., 2000.

X =	2.8		
a =	-0.26118		
b =	0.25392		
c =	1.0136		
¥ =	0.333	Formula.	$¥ = x/a + b_x + cx^2$ (Ec. 46)
α =	1.366	Formula.	$α = (1 + 4(k_{CF})(R)(¥))^{1/2}$ (Ec. 47)

Tabla 43. Concentración del efluente. Fuente: Crites et al., 2000.

$C_{FE} =$	891	NMP/100 ml
Formula.	$C_{FE} = (C_{fi})(4x10^{\frac{1}{2¥}})/(1 + α)^{2x10^{\frac{α}{2¥}}} - (1 - α)^{2x10^{\frac{α}{2¥}}}$ (Ec. 48)	

Tabla 44. Evaluación de azolve en años. Fuente: Crites et al., 2000.

$\theta_L = 0.5V / Tac P$
$\theta_L =$ Periodo de desazolve en años
Tac = Tasa de Acumulación de lodos, 0.04 m ³ /hab/año
P = Población
V = Volumen de agua
Periodo de desazolve del TQ1
0.23625 años – 2.8 meses

Eliminación de Coliformes Totales en el HAFL2.

Tabla 45. Datos para la eliminación de coliformes totales en el HAFL2. Fuente: CONAGUA 2019.

Temperatura del mes más frío	28.00	°C
Concentración del influente	4.03E+04	NMP/100 ml
Tiempo de retención hidráulico	0.45	días
Tirante de la laguna	0.60	m



Tabla 46. Constante de remoción bacteriana. Fuente: Crites et al., 2000.

$K_{CF} =$	1.443	día ⁻¹	Formula.	$K_{FL} = 0.84(1.07)^{TL-20}$ (Ec. 45)
------------	-------	-------------------	-----------------	--

Tabla 47. Relación largo y ancho de tanque. Fuente: Crites et al., 2000.

Largo =	7.00	m
Ancho =	2.50	m
L/B =	2.8	

Tabla 48. Coeficiente de dispersión (¥). Fuente: Crites et al., 2000.

$x =$	2.8		
$a =$	-0.26118		
$b =$	0.25392		
$c =$	1.0136		
$¥ =$	0.333	Formula.	$¥ = x/a + b_x + cx^2$ (Ec. 46)
$\alpha =$	1.366	Formula.	$\alpha = (1 + 4(k_{CF})(R)(¥))^{1/2}$ (Ec. 47)

Tabla 49. Concentración del efluente. Fuente: Crites et al., 2000.

$C_{FE} =$	891	NMP/100 ml
Formula.	$C_{FE} = (C_{fi})(4x10^{\frac{1}{2¥}})/(1 + \alpha)^{2x10^{\frac{\alpha}{2¥}}} - (1 - \alpha)^{2x10^{\frac{\alpha}{2¥}}}$ (Ec. 48)	

Tabla 50. Evaluación de azolve en años. Fuente: Crites et al., 2000.

$\theta L = 0.5V / Tac P$
$\theta L =$ Periodo de desazolve en años
$Tac =$ Tasa de Acumulación de lodos, 0.04 m ³ /hab/año
$P =$ Población
$V =$ Volumen de agua
Periodo de desazolve del TQ2
0.23625 años – 2.8 meses

Eliminación de Coliformes Totales en el HAFL3.

Tabla 51. Datos para la eliminación de coliformes totales en el HAFL3. Fuente: CONAGUA 2019.

Temperatura del mes más frío	28.00	°C
Concentración del influente	4.03E+04	NMP/100 ml
Tiempo de retención hidráulico	0.45	días
Tirante de la laguna	0.60	m



Tabla 52. Constante de remoción bacteriana. Fuente: Crites et al., 2000.

$K_{CF} =$	1.443	día ⁻¹	Formula.	$K_{FL} = 0.84(1.07)^{TL-20}$ (Ec. 45)
------------	-------	-------------------	-----------------	--

Tabla 53. Tabla 67. Relación largo y ancho de tanque. Fuente: Crites et al., 2000.

Largo =	7.00	m
Ancho =	2.50	m
L/B =	2.8	

Tabla 54. Coeficiente de dispersión (¥). Fuente: Crites et al., 2000.

$x =$	2.8		
$a =$	-0.26118		
$b =$	0.25392		
$c =$	1.0136		
$¥ =$	0.333	Formula.	$¥ = x/a + b_x + cx^2$ (Ec. 46)
$\alpha =$	1.366	Formula.	$\alpha = (1 + 4(k_{CF})(R)(¥))^{1/2}$ (Ec. 47)

Tabla 55. Concentración del efluente. Fuente: Crites et al., 2000.

$C_{FE} =$	891	NMP/100 ml
Formula.	$C_{FE} = (C_{fi})(4x10^{\frac{1}{2¥}})/(1 + \alpha)^{2x10^{\frac{\alpha}{2¥}}} - (1 - \alpha)^{2x10^{\frac{\alpha}{2¥}}}$ (Ec. 48)	

Tabla 56. Evaluación de azolve en años. Fuente: Crites et al., 2000.

$\theta_L = 0.5V / Tac P$	
$\theta_L =$ Periodo de desazolve en años	
Tac = Tasa de Acumulación de lodos, 0.04 m ³ /hab/año	
P = Población	
V = Volumen de agua	
Periodo de desazolve del TQ3	
0.23625 años – 2.8 meses	

Eliminación de Coliformes Totales en el HAFS1.

Tabla 57. Datos para la eliminación de coliformes totales en el HAFS. Fuente: CONAGUA 2019

Temperatura del mes más frío	28.00	°C
Concentración del influente	4.03E+04	NMP/100 ml
Tiempo de retención hidráulico	0.45	días
Tirante de la laguna	0.60	m



Tabla 58. Constante de remoción bacteriana. Fuente: Crites et al., 2000.

$K_{CF} =$	1.443	día ⁻¹	Formula.	$K_{FL} = 0.84(1.07)^{TL-20}$ (Ec. 45)
------------	-------	-------------------	-----------------	--

Tabla 59. Relación largo y ancho de tanque. Fuente: Crites et al., 2000.

Largo =	7.00	m
Ancho =	2.50	m
L/B =	2.8	

Tabla 60. Coeficiente de dispersión (¥). Fuente: Crites et al., 2000.

$\chi =$	2.8
a=	-0.26118
b=	0.25392
c=	1.0136

$\forall =$	0.333	Formula.	$\forall = x/a + b_x + cx^2$ (Ec. 46)
$\alpha =$	1.366	Formula.	$\alpha = (1 + 4(k_{CF})(R)(\forall))^{1/2}$ (Ec. 47)

Tabla 61. Concentración del efluente. Fuente: Crites et al., 2000.

$C_{FE} =$	891	NMP/100 ml
Formula.	$C_{FE} = (C_{fi})(4x10^{\frac{1}{2\forall}})/(1 + \alpha)^{2x10^{\frac{\alpha}{2\forall}}} - (1 - \alpha)^{2x10^{\frac{\alpha}{2\forall}}}$ (Ec. 48)	

Tabla 62. Evaluación de azolve en años. Fuente: Crites et al., 2000.

$\theta L = 0.5V / Tac P$
$\theta L =$ Periodo de desazolve en años
Tac = Tasa de Acumulación de lodos, 0.04 m ³ /hab/año
P = Población
V = Volumen de agua
Periodo de desazolve del TQ4
0.23625 años – 2.8 meses



8.3.4 Comparación del sistema optimizado con otros procesos de tratamiento de aguas industriales.

En la Tabla 79 se muestran resultados de humedales artificiales con especies y flujos diferentes, comparando con los humedales de esta investigación los cuales son tres humedales de flujo libre con especie *Potenderia cordata*, *Sagittaria lancifolia*, *Thypha domingensis* y un humedal de flujo subsuperficial con especie *Thalia geniculata*, teniendo como parámetro principal la DQO, demostrando ser una tecnología viable para el tratamiento de aguas residuales industriales. Se ha analizado con anterioridad el tratamiento de aguas de difícil degradación como las proveniente de la limpieza y otros productos de la industria textil (litografía en ropa), removiendo DQO ($7742 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de inicio) mediante HAFS con tres tipos de especies, *Zantedeschia aethiopica* (alcatraz), *Spathiphyllum* (cuna de moises) y *Canna spp* (coyol). En cuanto a los resultados utilizando la especie *Zantedeschia aethiopica* se obtuvo una DQO final del $4385.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Cárdenas et al. 2015). Incluso tratando aguas residuales de industria atunera se ha verificado que en humedales artificiales aireado utilizando *Chrysopogon zizanioides*, *Saccharomyces cerevisiae* y *Trichoderma harzianum*, se logran remociones de DQO de 64.56% ($164.36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) (Cedeño, et al. 2020).

Tabla 63. Comparación de eficiencias de remoción de DQO en el comportamiento de los humedales artificiales en este estudio y con otros autores.

Autores	Tipo de Flujo	Especie	Influyente ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Efluente ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Eficiencia de remoción de DQO (%)
Cárdenas et al., 2015.	Subsuperficial	<i>Zantedeschia ethiopica</i>	7742	4385.75	43.35
	Subsuperficial	<i>Spathiphyllum</i>	7742	5221.25	32.55
	Subsuperficial	<i>Canna spp</i>	7742	6726	13.12
Arévalo et al., 2015.	Libre	<i>Chrysopogon izanioides</i>	1293.52	807.631	37.5
	Libre	<i>Typha latifolia</i>	1293.52	792.63	38.72
Cedeño et al., 2020	Libre	<i>Chrysopogon zizanioides</i>	2058.3	8.59	99.58
	Libre	<i>Chrysopogon zizanioides</i> y <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	2058.3	5.35	99.74
	Libre	<i>Chrysopogon zizanioides</i> y <i>Trichoderma harzianum</i>	2058.3	6.66	99.68
	Libre	<i>Chrysopogon zizanioides</i> , <i>Saccharomyces cerevisiae</i> y <i>Trichoderma harzianum</i>	2058.3	5.82	99.72
Estrada Pérez Nancy.	Libre-Libre-Libre-Subsuperficial	<i>Pontederia cordata</i> .	5354.5	1313.03	75
		<i>Sagittaria lancifolia</i> .	1313.03	980.23	82
		<i>Typha domingensis</i> .	980.23	450.84	9
		<i>Thalia geniculata</i> .	450.84	65.25	85.52



9. Conclusiones y Recomendaciones.

Podemos concluir indicando que una de las alternativas adecuadas para implementar es un tratamiento fisicoquímico que consiste en una unidad de mezcla rápida, floculación mecánica y sedimentación. Utilizando sales metálicas como las que se evaluaron: $(Al_2(SO_4)_3)$ e $(Ca(OH)_2)$, lo cual ayudara con mayor frecuencia a la remoción de contaminantes básicos pudiendo lograr que la turbidez y el color se vayan disminuyendo teniendo así una eficiencia del 80 a 99% en el proceso de tratamiento de aguas residuales, y una remoción del 98.43% de DQO.

Ahora bien, para disminuir el uso de las sales metálicas y los gastos económicos de construcción, mantenimiento y supervisión se demostró que se puede emplear otro tipo de tecnología, más económica y de fácil mantenimiento, con esto la decisión del parque industrial fue de optar por la implementación de humedales artificiales ya que se puede lograr una remoción de 95 a 99% de contaminantes básicos y hasta un 81% de remoción de DQO.

Debemos considerar que los humedales artificiales tienen un consumo energético nulo, debido a que el proceso de depuración lo realizan plantas, comprenden una integración ambiental excelente, porque sustituye infraestructura y equipos de alta tecnología con un valor económico alto, por una plantación macrófitas, logrando una disminución de olores.



10. Referencias.

- Alatrística, G., Quiroz, A., & Butrón, M. (2015, Julio). Textile effluent treatment by coagulation-flocculation using starch of *triticum aestivum* l. as aid in the process. *The Biologist* (Lima), 13(2), pp. 297-312.
- Amabilis, L., Siebe, C., Moeller, G., & Durán, M. (2016). Removal of mercury by *Phragmites australis* used as biological barrier in constructed wetlands inoculated with heavy metal-tolerant strains. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 32, p. 1.
- Arévalo, A., Ramón, J., & Ramón, J. (2015, mayo 29). Estimate of kinetic processes in the system of biological leachate treatment, from the landfill through an experimental system constructed wetlands using native species. *Revista de Tecnología*, 14, p. 2.
- Arias, H., Hernández, J., Castro, A. & Sánchez, N. (2017). Tratamiento de aguas residuales de una central de sacrificio: uso del polvo de la semilla de la *M. oleifera* con coagulante natural. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 1, pp. 29-39.
- Briones Sánchez Gregorio & García Casillas Ignacio. 2014. *Aforo del Agua en Canales y Tuberías*. Editorial Trillas-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 100 p. ISBN: 978-968-24-7488-0. Tercera edición, reimpresso 2014.
- Briones, G., Burgos, G., Rosero, R. & Moreira, C. (2020, junio 23). Aplicaciones de sales inorgánicas en el tratamiento de aguas residuales industriales procedente de la refinación de aceites y grasas. *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 7, pp. 55-75.
- Calderón, D., & Vela, R. (2015, septiembre 24). Anaerobic treatment of cheese whey in batch and uasb reactors at laboratory scale. *Anales Científicos*, 777 (2), pp. 147-154.
- Cárdenas, D., & Gonzales, R. (2015, agosto). Uso de humedales artificiales de flujo subsuperficial para postratamiento de aguas residuales de la industria textil. *Jóvenes en la Ciencia*, 1, p. 2.
- CE-CCA-001/89. (1989). Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Aguas. *Diario Oficial de la Federación*.
- Cedeño, D., Loureiro, J., Delgado. M., Delgado, C., & Fajardo, P. (2020, julio 04). Evaluación de un humedal artificial aireado en efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales de la industria atunera, manta, manabí, Ecuador. *Mikarimin.*, 6, p. 1.
- Cervantes, S., Londoño, Y., Gutiérrez, F. & Peñuela, G. (2017, octubre). Evaluación de humedales artificiales de flujo subsuperficial en la remoción de diferentes concentraciones de ibuprofeno empleando *Cyperus papyrus*. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8, p. 5.
- CONAGUA (2019a). *Estadísticas del Agua en México*. 12. D.F., México.
- CONAGUA (2019b). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Zonas Rurales, Periurbanas y Desarrollos Ecoturísticos*. 31. D.F., México.
- CONAGUA (2019c). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales*. 30. D.F., México.
- Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Colombia: McGraw-Hill.
- Cruz, A., Meza, R., Ríos, E., Rosales, A. y Ventura, C. (2016). Evaluación de un biorreactor de manto de lodo anaerobio de flujo ascendente para el tratamiento de vinazas. *Espacio I+D Innovación más Desarrollo* 5 (12) pp.78-89.
- De Melo Gurgel, P., Navoni, JA, de Morais Ferreira, D. y do Amaral, VS (2016). Evaluación ecotoxicológica del agua de un río estuarino del Nordeste brasileño, potencialmente



- afectado por vertidos de aguas residuales industriales. *Science of The Total Environment*, 572, 324–332.
- Díaz, R. & Vega, J. (2015). Effect of variation of organic load in the performance of a reactor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) treating plant effluent palm oil extractor. *Revista ambiental agua, aire y suelo*, 4, p.1.
- García, J. A., López, G., & Torres, C. A. (2019). Evaluation of media of support of artificial wetlands with vegetation *Sagittaria latifolia* in the removal of basics pollutants. *CIBA Revista Iberoamericana De Las Ciencias Biológicas Y Agropecuarias*, 8(15), 16 - 51
- Gonzales, Y., Quesada, I., Schetrite, S., Jauregui-Haza, U., & Albasi, C. (2020, mayo). Utilization of a submerged membrane bioreactor for the treatment of wastewater from an oncological hospital. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 36 (4), pp. 945-956.
- Hernández, A., Moreno, J., & Sandoval, L. (2017). Industrial wastewater treatment in Mexico: An approach to your current situation and challenges to attend. *RINDERESU*, 2, pp. 75-88.
- INADEM (2015). Informe de la unidad de desarrollo productivo de empresas e industrias. México.
- Kadlec, RH y Knight, RL (1996) Tratamiento de humedales. Lewis Publishers, Boca Raton, 893 p.
- Larriva, J., & Gonzales, O. (2017). Hydraulic modelling for horizontal subsurface flow constructed wetlands. *RIHA*, 38, p.1.
- Ley Federal de Derechos. Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales, Coyoacán, Ciudad de México, 2019.
- Liang, Q., Yamashita, T., Koike, K., Matsuura, N., Honda, R., Hara-Yamamura, H. Yamamoto-Ikemoto, R. (2020). Un reactor de filtro percolador basado en un sistema bioelectroquímico para el tratamiento de aguas residuales. *Tecnología de fuentes biológicas*, 315, 123798.
- López, G., Bautista, R., Méndez, S., Hernández, J., Torres, C., Padrón, R., De la Cruz, E. and Ferrer, M. (2014). Optimization and evaluation of a domestic wastewater treatment system by dual combination of metallic salts and zeolites filtration. *Water Pollution XII*, Wessex Institute of Technology, 182, 245-256.
- López, G., Bautista, R., Valdes, A., Torres, C., López, R., Pérez, E., & Pampillón, L. (2019). Spatial distribution behavior of basic pollutants in a subsurface-flow wetland with *Thalia geniculata*. *Int. J. Environ. Impacts*, 2(2), 145-160.
- Marín, C., Solís, R., López, G., Bautista, R., & Romellón, M. (2016). Tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales tropicales en tabasco, México. *CIBA revista iberoamericana de las ciencias biológicas y agropecuarias* (n.d.)
- Metcalf & Eddy. (1996). *Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento y Reutilización* McGraw-Hill: México.
- Miranda, E., Sandoval, L., Moeller, G., & Sarracino, O. (2017). Evaluation of the process of coagulation-flocculation for the treatment of effluent from textile industry. *JEEOS*, 1, p.3.
- NOM-001-SEMARNAT-1996. (1997, enero 6). Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. *Diario Oficial de la Federación*.
- OPS/CEPIS Organización Panamericana de la Salud y el Centro de Estudios Panamericano de Ingeniería Sanitaria, (1992). Effectiveness of traditional flocculants as primary coagulants



and coagulant aids for the treatment of tropical raw water with more than a thousand-fold fluctuation in turbidity.

- Ortiz, V., López, G., Torres, C. A. y Pampillón, L. (2018). Almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) como coadyuvante en la coagulación floculación de aguas residuales domésticas. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 7(13), 18-46.
- PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017, (2018, enero 5). Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. *Diario Oficial de la Federación*.
- Reed, S. C., Crites, R. W., and Middlebrooks, E. J., 1995, *Natural Systems for Waste Management and Treatment*, 2nd edn. McGraw-Hill, Inc, New York, U.S.A.
- Rodríguez, Y., Torregroza, A., Mejía, F., Atencia, J., & Villero, A. (2016, junio 12). Effectiveness of aluminum polychloride on oil palm industrial wastewater post-treatment. *Temas Agrarios*, 24, p. 2.
- Sandoval, M., Nani, G., Sandoval, L., River, S., Fernández, G., & Alvarado, A. (2020). Evaluation of the performance of vertical partially saturated constructed wetlands for sewage treatment swine. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23, p.38.
- SEMARNAT (2015). *Estadísticas del Agua en México*. México, D.F., México.
- Solís, R., López, G., Bautista, R., Hernández, J. & Romellón, M. (2016). evaluación de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita. *interciencia* 41(1), 40-47.
- Toapanta, M., Roldan, M., Cisneros, N., & Moreira, C. (2021). Aplicación de sales inorgánicas en el tratamiento de aguas residuales industriales procedente de la refinación de aceites y grasas. *Dominio de las ciencias*, 7, p. 1.
- Vásquez, E., Trapote, A., & Prats, D. (2020). Eliminación de pesticidas mediante un biorreactor de membrana y dos tiempos diferentes de retención celular. *Tecnología y ciencias del agua*, 9, pp.198-217.
- Vázquez, M. B. y López, G. (2011). Evaluación técnica de un tanque Imhoff para el tratamiento de aguas residuales en centro, Tabasco. *UNACAR Tecnociencia*, 5(1) 32-47.
- Yang, Z., Li, J., Liu, J., Cao, J., Sheng, D. y Cai, T. (2019). Evaluación de un filtro biológico percolador a escala piloto como tecnología de control de COV para la planta de tratamiento de aguas residuales de fibra química. *Journal of Environmental Management*, 246, 71–76.

11. Anexos.

11.1. Memoria fotográfica.

Caracterización Volumétrica.



Figura A1. Levantamiento físico de las secciones de la Planta y Caracterización Volumétrica.

Toma de muestras.



Figura A2. Toma de muestra del sedimentador.



Figura A3. Toma de muestra del Tanque eca..



Figura A4. Toma de muestra Cloración.



Figura A5. Toma de muestra del Carcamo.



Figura A6. Toma de muestra salida de sedimentador..



Figura A7. Muestra recolectadas.



Figura A8. Rotulado de muestras.



Figura A9. Toma de muestra salida de la biorreactor.



Figura A10. Muestra de entrada carcamo..

Caracterización Fisicoquímica.



Figura A11. Digestor de DQO.



Figura A12. Analisis de metales..



Figura A13. Verificacion de resultados.



Figura A14. Solidos sedimentables.



Figura A15. Caracterización de parámetros de control.



Figura A16 Caracterización fisicoquímica en campo..



Figura A17. Caracterización de Color.



Figura A18. Equipos de laboratorio.



Figura A19. Caracterización de Turbiedad..

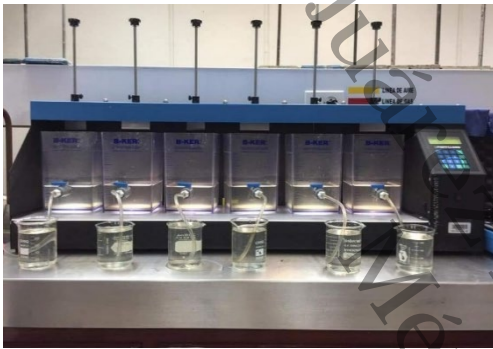


Figura A20. Dosificación de sales metálicas.



Figura A21. Dosis óptimas.



Figura A22. Construcción del tren de HA.

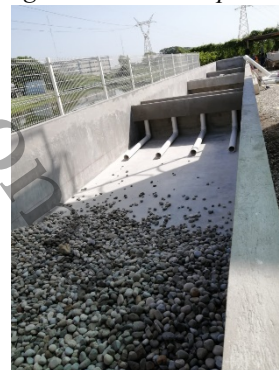


Figura A23. Suministro del medio de soporte.



Figura A24. Siembra de especies..



Figura A25. Tren completo con especies.



Figura A26. Tren de HA en operación..



Figura A27. Muestreo de arranque.



11.2. Vistas de Planos.

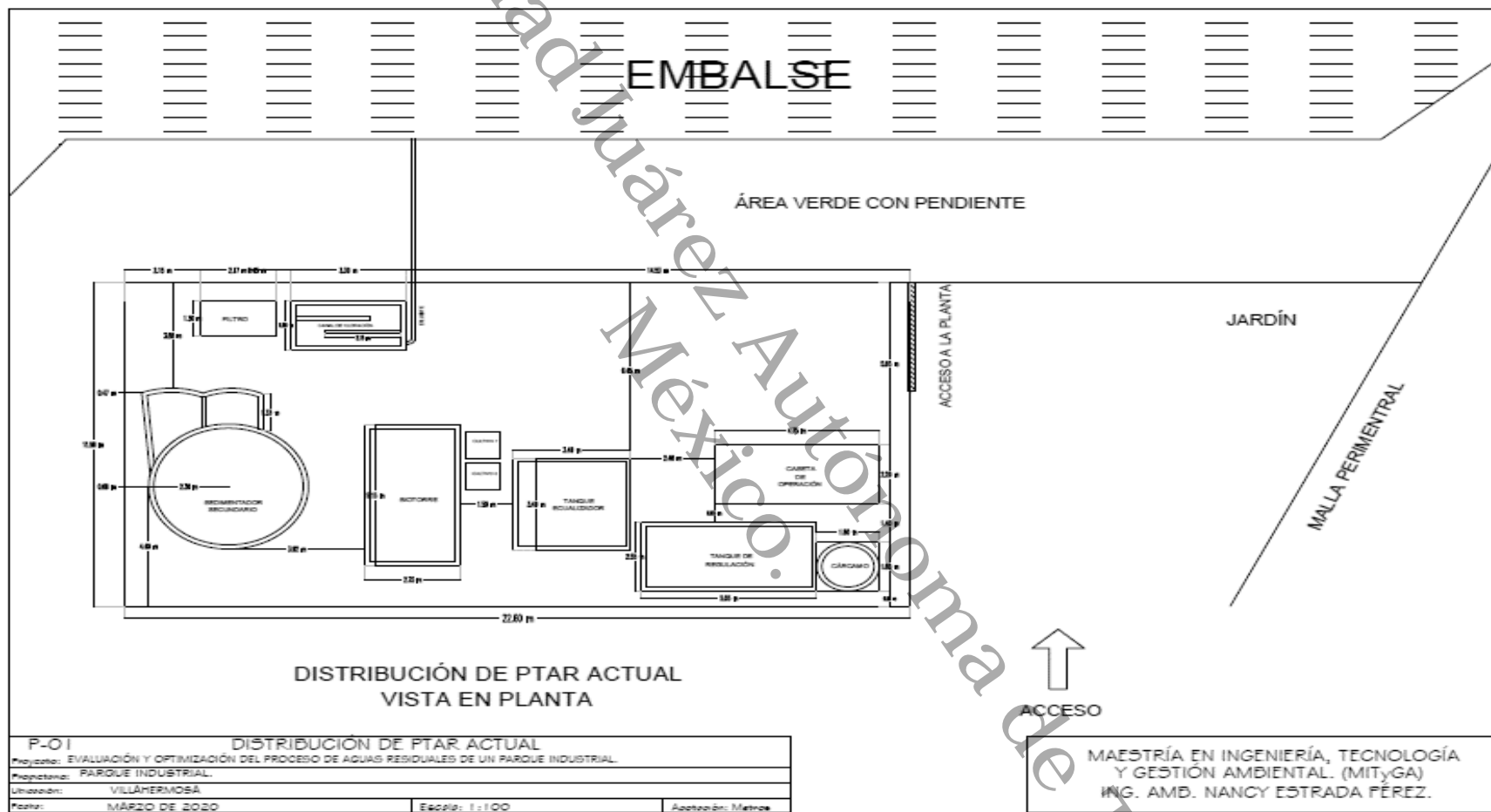


Figura A28. Distribución de la Planta actual (Vista en planta).

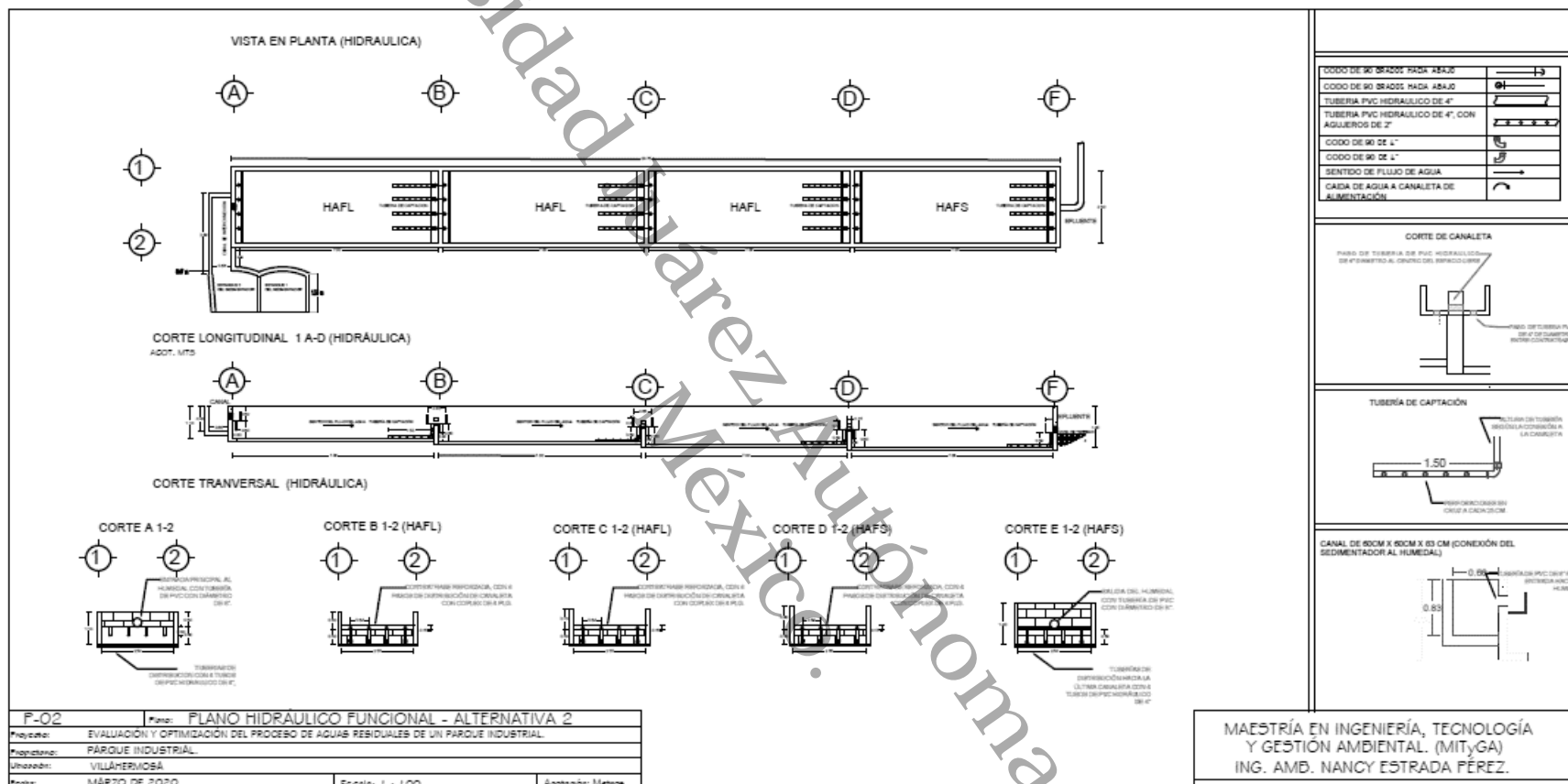


Figura A29. Tren de tratamiento vista en planta (Hidráulica).

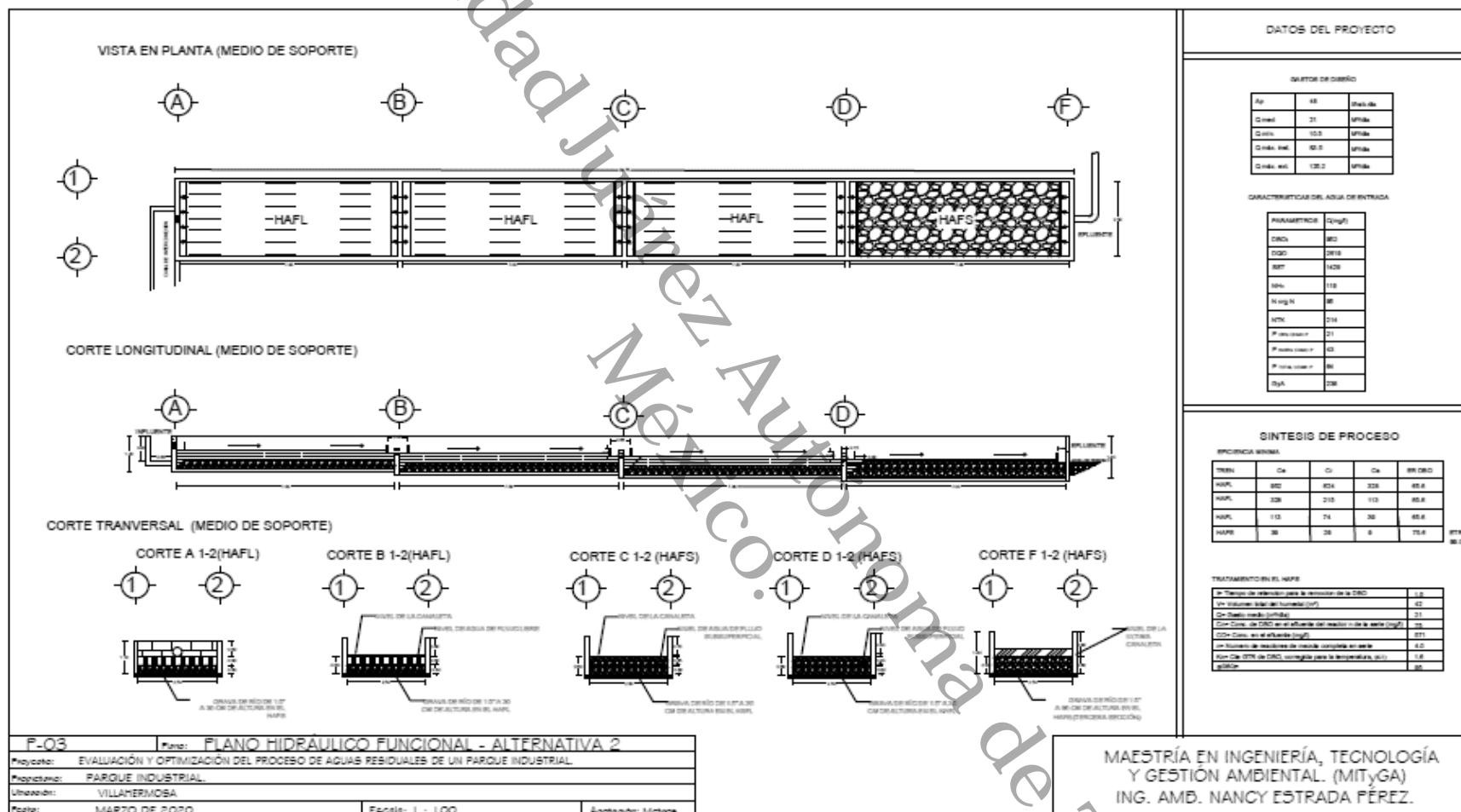


Figura A30. Tren de tratamiento vista en planta (Medio de soporte).

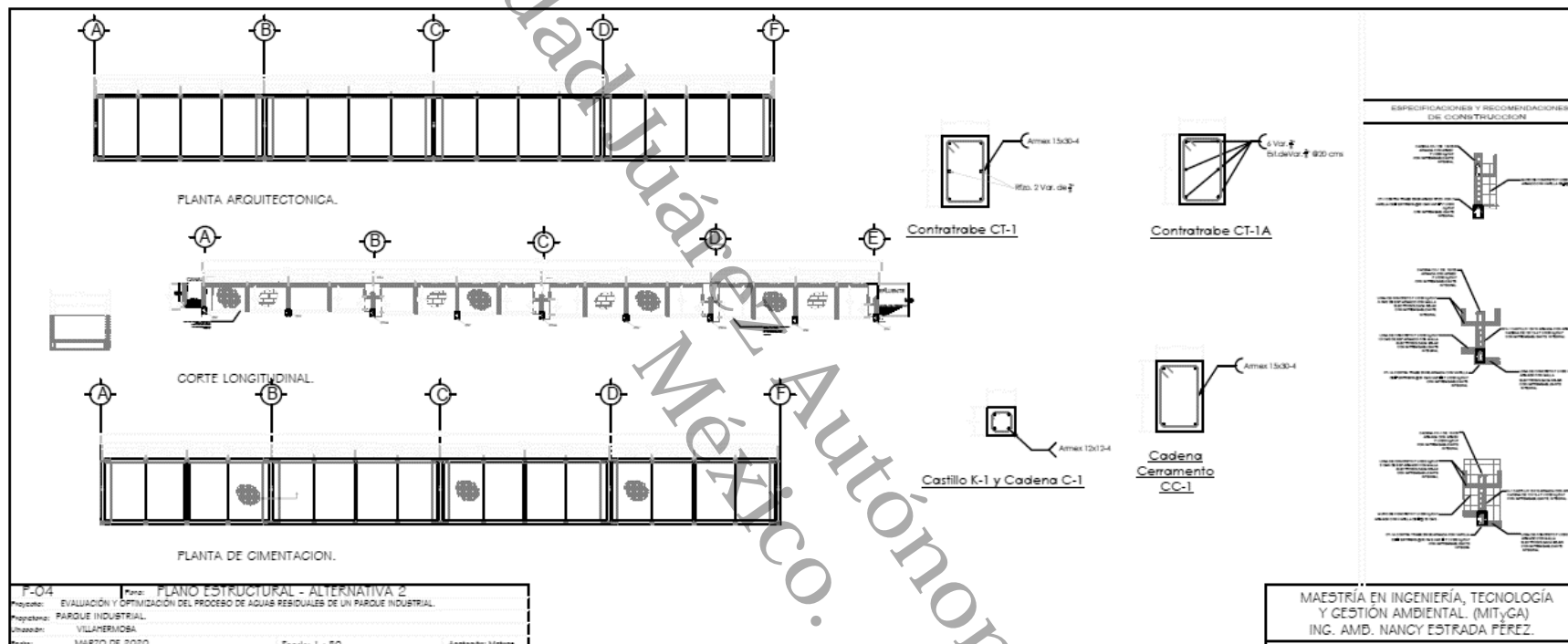


Figura A31. Tren de tratamiento vista de cortes.

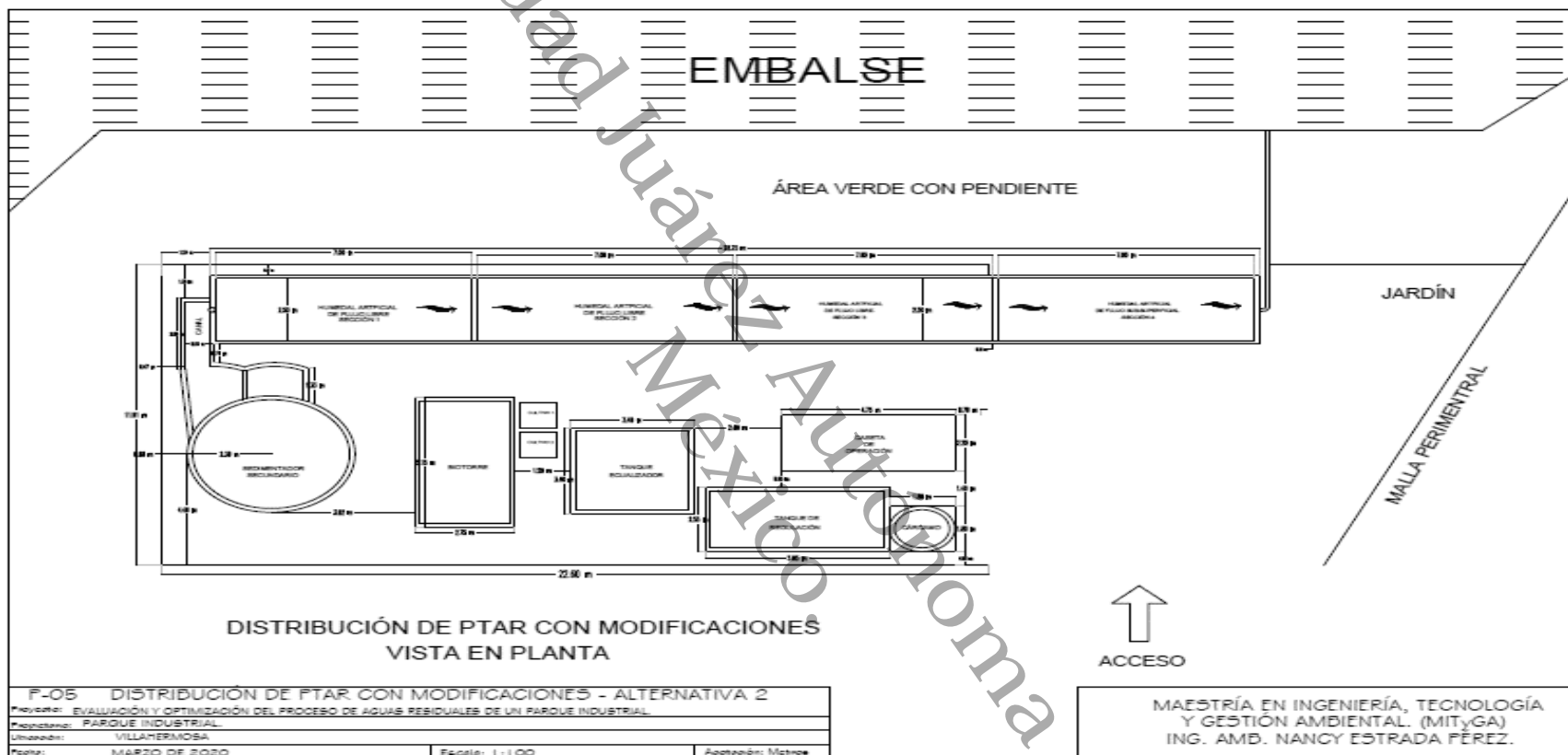


Figura A32. Distribución de la Planta con modificaciones (Vista en planta).



11.3. Paper presentados (Academia Journals)

Resumen del paper: Propuesta de Tratamiento de Aguas Residuales para un Parque Industrial en Tabasco. Chiapas 2020, 24 al 26 junio 2020.

Resumen- La Plata de tratamiento de aguas residuales del PLIT, utiliza un proceso de depuración es conocido como Sistema de Tratamiento de aguas residuales Tipo Biotorre (Película Bacterial Adherida). Cuenta con un cárcamo, tanque ecualizador, biotorre, sedimentador, filtro y una descarga final. Se evaluó la remoción de turbiedad, color, pH y SDT (parámetros de control) y la implementación de dosis óptimas de $Al_2(SO_4)_3$ y $Ca(OH)_2$. El agua tratada en planta presenta una eficiencia de remoción de 68.09% de turbidez (influyente 47.3 ± 1.36 UTN-efluente 13.6 ± 0.3 0UTN), 70.4% de color (influyente 3389 ± 365.2 UC-efluente 1002 UC), 63.9% de SDT (influyente 1995 ± 456.3 mgL⁻¹ -efluente 430 ± 36.5 mgL⁻¹) y con un pH promedio de 9.62. Con base a las pruebas de tratabilidad se puede recomendar que la dosis óptima es de 2000 ppm de $Al_2(SO_4)_3$, con la necesidad de agregar el $Ca(OH)_2$. En concentraciones de 2000 ppm. Esta planta no cumple con los límites máximos permitidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, para estos parámetros de control.

Liga:

<https://static1.squarespace.com/static/55564587e4b0d1d3fb1eda6b/t/60ba23b9c4ba2819f1750bdd/1622811583085/Tomo+02+-+Memorias+del+Congreso+AJ+Chetumal+2021.pdf> (pág. 27).

Resumen de paper: Evaluación de un Sistema de Tratamiento de Agua Residual Industrial que fue Optimizado Vía Humedales Artificiales. Chetumal 2021, 26 al 28 mayo 2021.

Resumen- Los humedales artificiales (HA) son una alternativa de tratamiento de diversos tipos de aguas residuales, dado a sus bajos costos de instalación, operación y mantenimiento. Se evaluó un sistema industrial que cuenta con cárcamo, tanque ecualizador, filtro percolador, sedimentador y que fue optimizado con cuatro humedales en serie, tres humedales de flujo libre con especies *Potentilla cordata* (HAFL1), *Sagittaria lancifolia* (HAFL2), *Thypha dominguensis* (HAFL3) y un cuarto humedal de flujo subsuperficial con *Thalia geniculata* (HAFS1). El flujo de operación fue de 145 m³ /día (Qmed) con una eficiencia de remoción total en el proceso de 49.2% en turbiedad, 93.5% en color, 64.6% en SDT y 98.1% en la DQO, respectivamente. Los resultados muestran una mejora del 56.1% en la remoción de DQO empleando humedales en comparación con el sistema original. Asimismo, el sistema optimizado permite dar cumplimiento a la normatividad vigente (NOM-001-SEMARNAT-2017).

Liga:

<https://static1.squarespace.com/static/55564587e4b0d1d3fb1eda6b/t/60ba23b9c4ba2819f1750bdd/1622811583085/Tomo+02+-+Memorias+del+Congreso+AJ+Chetumal+2021.pdf> (pág. 93).