



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

***IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE
COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN-SEDIMENTACIÓN
PARA LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA
LAVANDERÍA INDUSTRIAL***

TESIS

**QUE PRESENTAN
VLADIMIR CHIGO VILLASECA
MARLENE GONZÁLEZ NAVARRO**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

**DIRECTOR DE TESIS
M. EN I. Q. FRANCISCO JAVIER ALMAZÁN RUIZ**



CIUDAD DE MÉXICO, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Por parte de Marlene González Navarro:

En primer lugar quiero agradecer a nuestro director del presente trabajo, M. en I.Q. Francisco Javier Almazán Ruiz, quien con sus conocimientos y apoyo me llevó a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba, a pesar de las adversidades presentadas a lo largo del desarrollo de este trabajo. Así como a nuestros asesores y sinodales por sus aportaciones y apoyo para la presentación del mismo.

También quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y en especial a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por brindarme todos los recursos y herramientas que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación. No hubiese podido arribar a estos resultados de no haber sido por su incondicional ayuda.

Sin dejar de lado el apoyo recibido por parte de la Universidad Autónoma Metropolitana plantel Iztapalapa (UAM-I) cuando se presentaron situaciones que daban complejidad a la culminación de este proyecto.

En especial, quiero hacer mención de mi madre, que sin ella yo no hubiese llegado hasta aquí, siempre estuvo para mí en todos los aspectos para respaldarme cuando más lo necesité, no solo a lo largo de la elaboración de este trabajo, sino a lo largo de toda mi formación académica, este logro es para ella. Así como también quiero agradecer a mi padre quién a pesar de la distancia, siempre me brindó un gran apoyo y nunca me ha dejado sola, demostrando ser un gran padre. Siempre estaré agradecida con ambos por todo lo que han hecho por mí y quiero que sepan que siempre los voy a amar incondicionalmente por haberme demostrado su amor con tanto apoyo y enseñanzas tanto en mi formación profesional como personal.

Por último, quiero agradecer a todos mis amigos y personas que estuvieron conmigo a lo largo de este recorrido que culmina con la presentación de este trabajo, por el apoyo moral, la compañía y los buenos recuerdos.

Muchas gracias a todos.

Por parte de Vladimir Chigo Villaseca:

A **Dios**, por darme la fuerza y la sabiduría para hacer las cosas, solo él conoce todo lo que hemos pasado.

A **Bruno** y **Zaira** por ser el combustible que este motor necesitaba para llegar hasta este punto.

A **Sugey**, por ser mi compañera en este sendero y por darme la hermosa familia que tengo a su lado.

A mis padres (**Manuel** y **Florentina**), principalmente por brindarme todo su apoyo incondicional y ánimo; esto es el fruto de un esfuerzo constante y que sin ustedes no sería posible.

A mi asesor de tesis y amigo M. en I. Q. **Francisco Javier Almazán Ruiz**, por haberme brindado la oportunidad de participar en este proyecto, así como la paciencia que tuvo para la resolución de dudas hasta el último instante.

A mis amigos con los cuales compartimos gratos momentos durante el camino hacia este logro y que han sido de gran apoyo moral.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (**UNAM**), así como a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, por brindar las bases de este nuevo profesionista que se integra en el mundo laboral.

A la Universidad Autónoma de México (**UAM-I**), por brindar en su momento un espacio para el logro de este proyecto.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
MARCO TEÓRICO	2
1 La contaminación de agua.	2
1.1 Panorama en México.	2
1.2 Panorama global.	3
2 Causas y consecuencias de la contaminación del agua.	3
2.1 Desechos presentes en las aguas residuales.	4
2.1.1 Desechos industriales.	4
2.1.2 Desechos domésticos.	5
3 Legislación ambiental y normativa en México.	5
4 Tratamiento de aguas y tecnologías para el reciclo del agua.	6
4.1 Partículas coloidales y emulsiones.	9
4.2 Potencial Z y punto de carga cero.	9
4.3 Coagulación.	9
4.4 Floculación.	10
4.4.1 Cinética de la floculación.	10
4.4.2 Factores que favorecen en la floculación.	10
4.5 Sedimentación.	11
5 Parámetros de medición de calidad del agua.	11
5.1 Físicoquímicos.	12
5.2 Biológicos.	12
5.2.1 Bacterias.	12
5.2.2 Protozoos.	12
5.2.3 Parásitos.	13
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
JUSTIFICACIÓN.	14
6 OBJETIVOS.	15
6.1 Objetivo general.	15
6.2 Objetivos específicos.	15
7 ESTRATEGIA EXPERIMENTAL.	15
7.1 Análisis físicoquímico.	15
7.1.1 Determinación del pH.	15
7.1.2 Determinación de grasas y aceites.	15
7.1.3 Determinación de la demanda química de oxígeno.	16
7.1.4 Detergencia (sustancias activas al azul de metileno SAAM).	16

7.1.5	Determinación de sólidos totales disueltos, conductividad y salinidad.	16
7.1.6	Determinación de hierro (Fe).	16
7.1.7	Prueba de tubos y jarras.	16
8	RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.	18
8.1	Análisis fisicoquímico del agua residual.	18
8.1.1	Coagulación química.	19
		19
8.2	Prueba de tubos y jarras (selección de la concentración del coagulante y floculante).	20
		20
8.2.1	Prueba de tubos.	20
8.2.2	Prueba de jarras.	21
8.3	Caracterización fisicoquímica después del tratamiento.	23
8.4	Calidad biológica del agua y escalamiento. (Trabajo no realizado por contingencia sanitaria)	24
		24
	CONCLUSIONES.	26
9	REFERENCIAS	27
10	ANEXOS	29
10.1	NOM-001-SEMARNAT-1996.	29
10.2	NOM-002-SEMARNAT-1996.	29
10.3	NOM-003-SEMARNAT-1997.	30
10.4	NOM-004-SEMARNAT-2001.	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales en México, 2009. (CONAGUA)	7
Figura 2. Coagulación química.	19
Figura 3. Prueba en tubos de ensayo.	20
Figura 4. Prueba de jarras.	21
Figura 5. Sedimentación en cono Imhoff.	22
Figura 6. Vertido en vaso de precipitado.	22
Figura 7. Estrategia de tratamiento y diagrama de bloques.	23
Figura 8. Agua resultante después del tratamiento.	24

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Legislación sobre descarga de aguas residuales en México.	6
Tabla 2. Tipos de tratamiento de aguas residuales industriales. (Conagua, 2011).	7
Tabla 3. Análisis fisicoquímicos de agua residual sin ningún tratamiento.	18
Tabla 4. Análisis fisicoquímicos del agua residual después del tratamiento.	23

INTRODUCCIÓN

En años recientes, las políticas de administración y preservación de recursos nacionales se han enfocado al uso eficiente y búsqueda de nuevos yacimientos, donde la participación de los sectores urbanos e industriales se ha unificado, con objeto de preservar recursos no renovables.

El agua es un recurso indispensable y necesario para la mayoría de los procesos productivos y de servicios; en el pasado se había obtenido de forma económica y abundante; sin embargo, se ha convertido en un recurso limitado y valioso ya que cada vez es más escaso y en el que hay que realizar inversiones para su recuperación, replanteándose así el compromiso de hacer un uso eficiente de este recurso.

Hoy en día, existe una relación directa entre el crecimiento de los servicios y la explosión demográfica, en particular existen lavanderías dedicadas al lavado de toallas con un alto contenido en grasas y/o aceites; utilizadas en mantenimientos mecánicos del sector industrial, provocando mayor cantidad de efluentes. Aunado a esto, la mala disposición y/o regulación del efluente (sin tratamiento) que disminuye la eficiencia de la tecnología actual en tratamiento de agua.

Por esta razón, en el presente proyecto se propone un sistema de tratamiento de aguas residuales proveniente del lavado de toallas. El proceso consiste en un tanque de coagulación-floculación-sedimentación (CFS), equipado con sistemas de bombeo, utilizando como agente coagulante una sal inorgánica y como floculante un biopolímero, con la finalidad de disminuir el consumo de agua y la contaminación que se genera al ser descargada.

MARCO TEÓRICO

1 La contaminación de agua.

El agua es indispensable para la vida humana, desde satisfacer las necesidades básicas para subsistir, hasta para producir e intercambiar bienes y servicios. Es el líquido más abundante en la Tierra, representando el recurso natural más importante por ser la base de toda forma de vida, donde aproximadamente el 97.5% del total del agua es salina y el 2.5% es dulce; sin embargo, sólo 0.26% del agua dulce se encuentra en lagos, ríos y otros almacenamientos. (UNESCO, 2003).

Hoy en día se define como contaminación de agua aquella contaminación que tiene lugar en cualquier espacio que alberga agua, ya sean lagos, mares, acuíferos o aguas subterráneas. Las principales causas de la contaminación del agua se estiman en factores humanos cuyos contaminantes y productos químicos afectan directamente al agua. Se sabe que la contaminación del agua es el segundo problema ambiental más urgente detrás de la contaminación del aire.

De acuerdo con el primer informe de Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos del mundo, el 59% del consumo total de agua en los países desarrollados se destina a uso industrial, el 30% a consumo agrícola y un 11% a gasto doméstico. (UNESCO, 2003).

1.1 Panorama en México.

Fuentes de la SEMARNAT/CONAGUA reportan que México ocupa el décimo primer lugar de los países más poblados con 112,336,538 mexicanos, de los cuales el 10% carece de agua potable y el 43% carece de instalaciones sanitarias mínimas.

Los usos del agua se han clasificado en dos grupos: el consumo por parte de los sectores y el uso de la energía motriz del agua para producir electricidad (Hidroeléctricas). Las ciudades del país cuentan con coberturas del 95.4% de agua potable, la cual pierde del 30 al 50% del líquido por fugas en las redes de distribución.

El 90.2% de la población cuenta con alcantarillado, lo cual capta 13.9 mil de hm³ de aguas residuales y solamente se trata el 37.8 por ciento, por lo que la gestión de los recursos hídricos debe asegurar la calidad de vida, conservar el ambiente y el desarrollo de las sociedades.

1.2 Panorama global.

En 2015, el 71% de la población mundial (5200 millones de personas) utilizaba un servicio de suministro de agua potable gestionado de forma segura. Es decir, ubicado en el lugar de uso, disponible cuando se necesita y no contaminado. 844 millones de personas carecen incluso de un servicio básico de suministro de agua potable, cifra que incluye a 159 millones de personas que dependen de aguas superficiales.

En todo el mundo, al menos 2000 millones de personas se abastecen de una fuente de agua potable que está contaminada por heces. El agua contaminada puede transmitir enfermedades como la diarrea, el cólera, la disentería, la fiebre tifoidea y la poliomielitis. Se calcula que la contaminación del agua potable provoca más de 502 000 muertes por diarrea al año. De aquí a 2025, la mitad de la población mundial vivirá en zonas con escasez de agua.

En los países menos desarrollados, el 22% de los centros sanitarios carecen de fuentes de agua, el 21% de servicios de saneamiento, y el 22% de servicios de gestión de desechos. (Fuente: Organización Mundial de la Salud).

2 Causas y consecuencias de la contaminación del agua.

Hay miles de millones de personas en el planeta, por lo que el tratamiento de aguas residuales es de gran prioridad. Un agua residual es aquella proveniente de los hogares domésticos, las industrias y prácticas agrícolas, estas pueden generar contaminación de numerosos lagos, ríos y cuerpos acuíferos. Regularmente el contenido de las aguas residuales se constituye de heces, orina y residuos de lavandería.

Las aguas residuales son tratadas en plantas de tratamiento de agua (tratamiento primario, secundario, terciario y pulimiento) y los residuos se eliminan a menudo en el mar (contaminantes del agua). La eliminación de aguas residuales es un problema importante en los países en desarrollo, ya que muchas personas en estas áreas no tienen acceso a condiciones sanitarias y al agua potable.

Las industrias por otro lado, constituyen una de las principales fuentes de contaminación que surge de la actividad humana y puede entenderse como la emisión de sustancias nocivas, tóxicas o peligrosas, que son liberadas al medio ambiente, y que se van acumulando en el agua, aire, suelo, alimentos, e incluso en nuestros tejidos.

2.1 Desechos presentes en las aguas residuales.

2.1.1 Desechos industriales.

Las industrias son una enorme fuente de contaminación del agua, ya que produce contaminantes que son extremadamente perjudiciales para las personas y para el medio ambiente. Instalaciones de uso industrial de agua dulce suelen verter los residuos de la planta en los ríos, lagos y océanos.

En estas emisiones quedan incluidas las que se derivan de los productos o subproductos que las industrias ponen en el mercado.

La industria química es una de las más contaminantes, ya que utiliza una amplia gama de recursos como combustibles sólidos, gaseosos y líquidos, sales piritas, productos vegetales y animales, etc., desde su inicio esta industria diseminó al ambiente cien mil nuevas sustancias químicas, las cuales son tóxicas para los seres vivos.

Los contaminantes procedentes de fuentes industriales incluyen:

- **Amianto:** Este contaminante es un grave peligro para la salud y cancerígeno. Las fibras de amianto pueden ser inhaladas y provocar enfermedades como la asbestosis, mesotelioma, cáncer de pulmón, intestinal e hígado.
- **Plomo:** Este es un elemento metálico y puede causar problemas de salud y problemas ambientales. El plomo es nocivo para la salud de muchos animales, incluidos los seres humanos, ya que puede inhibir la acción de enzimas corporales.
- **Mercurio:** Este es un elemento metálico y puede causar problemas de salud y problemas ambientales. El mercurio es también perjudicial para la salud de los animales, ya que puede causar enfermedades a través del envenenamiento por mercurio.
- **Nitratos y Fosfatos:** El aumento del uso de fertilizantes significa que los nitratos son a menudo arrastrados hasta ríos y lagos. Esto puede provocar eutrofización, ya que puede ser problemático para el medio marino.
- **Azufre:** Perjudicial para la vida marina.
- **Aceites:** No se disuelven en el agua, sino que forman una capa gruesa sobre la superficie del agua. Esto puede impedir el crecimiento a las plantas marinas que reciben insuficiente luz para la fotosíntesis. También es perjudicial para los peces y las aves marinas.
- **Petroquímicos:** Conformado por gas o gasolina y puede ser tóxicos para la vida marina.

2.1.2 Desechos domésticos.

La mayor parte de la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas proviene de las actividades humanas. Las aguas superficiales están repletas de residuos materiales que son arrojados, sin considerar el impacto que pueden generar en el ecosistema.

Miles de sustancias son vertidas a través de las aguas residuales que proceden de los hogares, dentro de las que se pueden encontrar las siguientes:

- Jabones y detergentes: la mayoría de los detergentes no son biodegradables y contienen químicos agresivos que al entrar en contacto con el agua cambian su composición, dando lugar a otros mucho más tóxicos.

Los detergentes más comunes contienen fosfatos para ablandar el agua y tensoactivos para disolver la grasa.

- Productos de limpieza como lejías, limpiacristales, limpiadores de baño o desengrasantes: contienen elementos como el fósforo, nitrógeno y amoníaco, englobados en la categoría de compuestos orgánicos volátiles. Estos contaminantes no se eliminan durante el tratamiento de residuos, por eso pueden penetrar en acuíferos, ríos o lagos y acelerar el crecimiento de vegetales, como consecuencia perjudicar los cursos del agua, reduciendo el oxígeno y generando la muerte para muchas especies animales o son desplazadas de su hábitat.
- Aceites: crean capas por encima del agua que absorben la radiación solar impidiendo el paso del oxígeno perjudicando la fauna acuática. Además, obstruyendo las tuberías, ya que la grasa se adhiere a las paredes cuando se enfría y se acumula junto con otros residuos.

Por otra parte, el aceite de motor de los automóviles presenta un potencial contaminante mucho mayor por contener metales pesados (plomo, cadmio, etc.) y por ser muy poco biodegradable.

3 Legislación ambiental y normativa en México.

Se han promulgado leyes y elaborado normas con el objetivo de controlar y prevenir la contaminación del agua y proteger los recursos hídricos. Citando la siguiente: ley de aguas nacionales que en su Título primero Capítulo único Artículo 1 tiene como objetivo: “Regular la explotación uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral y sustentable”.

También se cuenta con la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente, que en su Título Primero Capítulo I Artículo 1, se refiere a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección del ambiente, describiendo el aprovechamiento sustentable y preservación del agua; la prevención y control de la contaminación de la misma. En la tabla 1 se muestran normas aplicables en México sobre la descarga de aguas residuales.

Tabla 1. Legislación sobre descarga de aguas residuales en México.

Leyes en México sobre la descarga de aguas residuales	
Ley de Aguas Nacionales	
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.	
Normas Oficiales Mexicanas	
NOM-001-SEMARNAT-1996.	Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales y bienes nacionales.
NOM-002-SEMARNAT-1996.	Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
NOM-003-SEMARNAT-1997.	Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se re-usen en servicios al público.
NOM-004-SEMARNAT-2001.	Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes y bio-sólidos para su aprovechamiento y disposición final.

4 Tratamiento de aguas y tecnologías para el recicle del agua.

Los sistemas de drenaje urbano son los que se encargan de transportar las aguas residuales de las ciudades, a cuerpos de agua receptoras o al suelo.

Estas aguas son generalmente producto de las actividades del hombre, en residencias e instalaciones comerciales (agua residual doméstica) y producto de las actividades industriales (agua residual industrial). Los procesos de tratamiento de aguas residuales van enfocados a eliminar y en su caso, disminuir las partículas ajenas que le dan el carácter de contaminante, con la finalidad de poder reutilizarlas o bien desecharlas, evitando que contaminen los cuerpos receptores. Los principales procesos de tratamiento de aguas residuales utilizados en las plantas tratadoras en México son procesos biológicos, como se muestran en la Figura 1.

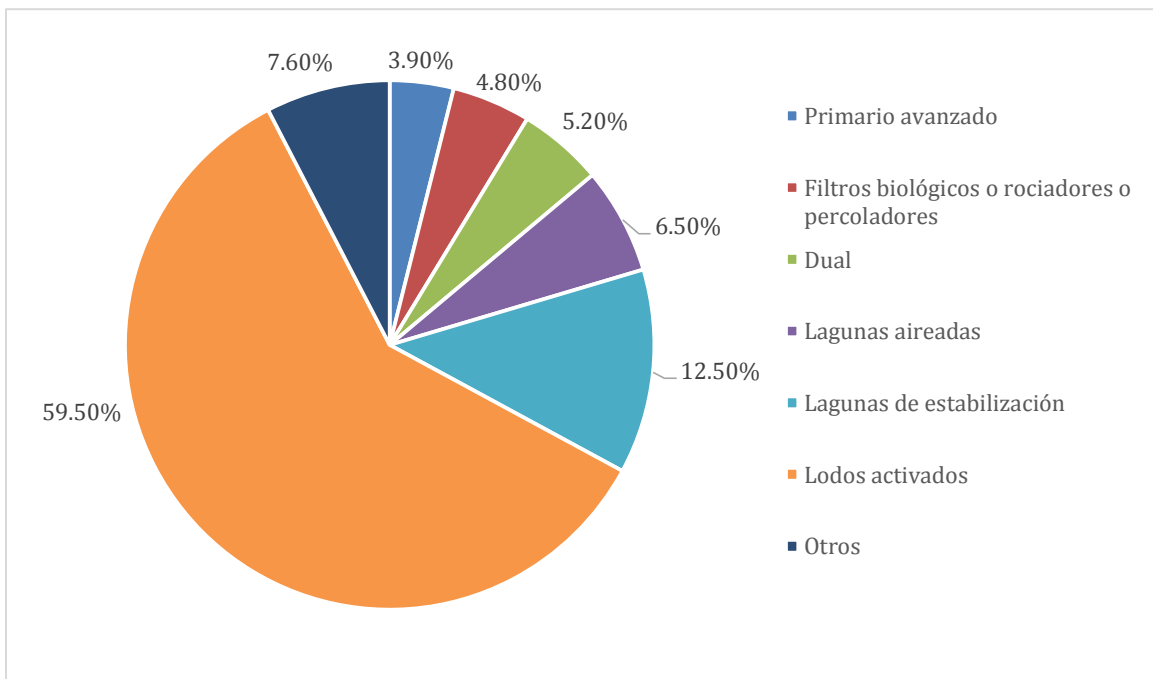


Figura 1. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales en México, 2009. (CONAGUA)

Los tipos de tratamientos de aguas residuales industriales existentes en el país, el propósito o el principio de funcionamiento, el número de plantas, el gasto de operación en m³/s y finalmente el porcentaje que representa cada tratamiento, se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Tipos de tratamiento de aguas residuales industriales. (Conagua, 2011).

Tipo de tratamiento	Propósito	Número de plantas	Porcentaje
Primario	Ajustar pH y remover materiales orgánicos y/o inorgánicos en suspensión con tamaño igual o mayor a 0.1 mm.	731	33.55
Secundario	Remover Materiales orgánicos coloidales y disueltos	1193	55.57
Terciario	Remover materiales disueltos que incluyen gases, sustancias orgánicas naturales y sintéticas, iones, bacterias y virus	88	5.03
No especificado		175	7.96
TOTAL		2186	100

Los tratamientos se pueden clasificar en: a) tratamiento preliminar o pre-tratamiento, b) tratamiento primario, c) tratamiento secundario, d) tratamiento terciario y e) tratamiento especial o de pulimiento.

a) *Tratamiento Preliminar o Pre-Tratamiento*: es el conjunto de unidades que tiene como finalidad eliminar materiales que perjudiquen o puedan obstruir al sistema de conducción, es decir, las redes de tubería permitan un libre flujo de agua, como material flotante, sólidos inorgánicos en suspensión, como arenas. Las principales unidades son las rejillas o cribas de barra y el desarenado.

b) *Tratamiento Primario*: tiene como objetivo la remoción de sólidos suspendidos y esto puede ser por medio de sedimentación, filtración, flotación y precipitación. Las principales unidades para esta fase son: la fosa séptica, el tanque Imhoff, sedimentadores primarios, reactores anaerobios de flujo ascendente, coagulación y precipitación.

c) *Tratamiento Secundario*: la finalidad de éste es la remoción de material coloidal y en suspensión. En este caso, la clarifloculación es el proceso más eficiente, que además de remover las partículas externas permiten remover microorganismos presentes en las aguas residuales.

d) *Tratamiento Terciario*: es el grado de tratamiento necesario para alcanzar una calidad biológica adecuada. La finalidad de los tratamientos terciarios es eliminar la carga orgánica residual y aquellas otras sustancias contaminantes no eliminadas en los tratamientos secundarios; como por ejemplo, los nutrientes, fósforo y nitrógeno.

El agua residual que recibe un tratamiento terciario adecuado no permite un desarrollo microbiano considerable.

e) *Pulimiento*: Este tratamiento consiste en una filtración y/o cloración para disminuir drásticamente los niveles de nutrientes inorgánicos, especialmente los fosfatos y nitratos del efluente final Coagulación-Floculación-Sedimentación.

4.1 Partículas coloidales y emulsiones.

El agua contiene de tres tipos de impurezas: físicas, químicas y biológicas; las partículas pueden variar en origen, concentración, tamaño y superficie. El tamaño de la partícula puede variar en varios ordenes de magnitud; los sólidos que pueden filtrar usando una membrana de 0.55μ de tamaño de poro, se pueden clasificar en partículas filtrables o disueltas y los que no se pueden filtrar corresponde a los coloides. La gravedad tiende a ser insignificante sobre el transporte.

4.2 Potencial Z y punto de carga cero.

El potencial Z es una manera adecuada de optimizar la dosificación de coagulante en el agua y en tratamientos de desagüe por coagulación. Los sólidos suspendidos más difíciles de remover son los coloides, debido a sus diminutos tamaños, ya que escapan fácilmente a la sedimentación y a la filtración.

El método para remover el coloide es mediante la disminución del potencial zeta con coagulantes tales como el alumbre, cloruro férrico y/o polímeros catiónicos. Una vez reducida o eliminada la carga no existirán fuerzas repulsivas (punto de carga cero) y la ligera agitación del estanque de floculación causa numerosos choques entre coloides. Esto resulta primero en la formación de sistemas microfloculados, los cuales crecen hasta llegar a ser sistemas floculados visibles que se acomodan rápidamente y pueden ser filtrados fácilmente.

4.3 Coagulación.

Se entiende por coagulación a la desestabilización de las cargas parciales de partículas en el agua mediante la adición de sustancias químicas (coagulantes). Esta operación se efectúa en unidades o tanques de mezcla rápida, en los cuales el agua se somete a agitación para formar una solución homogénea de los coagulantes con el agua en el menor tiempo posible.

Este proceso se usa para:

- Remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no se puede sedimentar rápidamente.
- Remoción de color verdadero o aparente.
- Eliminación de bacterias y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor, en algunos casos de precipitados químicos suspendidos en otros.

Para la evaluación de este proceso es necesario tener en cuenta las características físicas y químicas del agua, la dosis de coagulante, la concentración de coagulante, el punto de aplicación del coagulante, la intensidad, el tiempo de mezcla y el tipo de dispositivo de mezcla.

4.4 Floculación.

La floculación es la aglomeración, mediante la agitación moderada del agua, de las partículas que se desestabilizaron durante la coagulación, formando otras de mayor tamaño y peso específico.

Los objetivos básicos de la floculación son reunir el micro-floculo para formar partículas con peso específico superior al del agua y compactar el flóculo disminuyendo su grado de hidratación para producir baja concentración volumétrica, lo cual produce una alta eficiencia en los procesos posteriores como sedimentación y filtración.

4.4.1 Cinética de la floculación.

Tan pronto como se agregan los coagulantes a una suspensión coloidal, se inician una serie de reacciones hidrolíticas que adhieren iones a la superficie de las partículas presentes en la suspensión, las cuales tienen así oportunidad de unirse por sucesivas colisiones hasta formar un flóculo que crece con el tiempo.

La rapidez con que esto ocurre depende del tamaño de las partículas con relación al estado de agitación del líquido, de la concentración de las mismas y de su "grado de desestabilización", que es el que permite que las colisiones sean efectivas para producir adherencia.

4.4.2 Factores que favorecen en la floculación.

Los principales factores que promueven una floculación adecuada son: a) La concentración y naturaleza de las partículas. b) La velocidad de formación del floculo es proporcional a la concentración de partículas en el agua y del tamaño inicial de las partículas, c) El tiempo de crecimiento del flóculo y la velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo de crecimiento. Se puede decir que una eficiencia dada, se obtiene en tiempos cada vez menores a medida que se aumenta el número de cámaras de floculación en serie.

4.5 Sedimentación.

La sedimentación es la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido. La sedimentación es en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento de agua residual para conseguir su clarificación. Cuando se produce la sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. A menudo se utilizan para designar la sedimentación, los términos de clarificación y espesamiento.

Se habla de clarificación cuando el interés está puesto en la suspensión concentrada. Las partículas en suspensión sedimentan en diferente forma, dependiendo de las características de las partículas discretas, refiriéndose a la sedimentación de partículas por caída libre e interferida y sedimentación de flóculos.

5 Parámetros de medición de calidad del agua.

La calidad del agua es un factor que incide directamente en los ecosistemas y el bienestar humano (de ella depende la biodiversidad, la calidad de los alimentos, las actividades económicas, etc).

Desde la perspectiva de su gestión, la calidad del agua se define por su uso final. Así, el agua para el recreo, la pesca, la bebida o como hábitat para organismos acuáticos requiere mayores niveles de pureza; sin embargo, debemos tener en cuenta que después de su uso, el agua suele volver de nuevo al sistema hidrológico de manera que si se deja sin tratamiento puede acabar afectando gravemente el medio.

Para dar a conocer la calidad del agua de manera accesible a la población, se desarrolló un sistema estimativo de calidad del agua que requirió la medición física de los parámetros de contaminación del agua y el uso de una escala estandarizada de medición para expresar la relación entre la existencia de varios contaminantes en el agua y el grado de impacto en los diferentes usos de la misma.

5.1 Fisicoquímicos.

Son los que definen las características del agua que responden a los sentidos de la vista, del tacto, gusto, y olfato como son:

- Sólidos suspendidos
- Sólidos disueltos
- Turbidez
- Color
- Conductividad
- Dureza
- pH
- Contaminación orgánica de las aguas como son
- Demanda biológica de oxígeno
- Demanda química de oxígeno
- Carbón orgánico total

5.2 Biológicos.

Tienen una alta importancia en el control de enfermedades que sean causadas por organismos patógenos de origen humano y por la proliferación o desarrollo de bacterias y otros microorganismos dentro de la descomposición y estabilización de la materia orgánica tanto en el medio natural como en una planta de tratamiento de aguas residuales.

5.2.1 Bacterias.

Muchas bacterias son inofensivas en el tracto intestinal, pero al estar un individuo infectado al momento de excretar, en las heces se encuentran una gran cantidad de bacterias patógenas, contaminando de esta manera las aguas residuales domésticas.

Los grupos de bacterias más comunes que se pueden encontrar en las aguas residuales son del género *Salmonella*, *Shigella* y *Escherichia coli*, *Vibrio colerae*.

5.2.2 Protozoos.

Entre los organismos causantes de enfermedades los protozoarios *Cryptosporidium parvum*, *Cyclospora* y *Giardia lamblia*, son de gran interés ya que tienen un alto impacto sobre la población especialmente en personas con deficiencia en el sistema inmunológico y de este tipo de microorganismos son los más comunes en las aguas residuales.

5.2.3 Parásitos.

Los parásitos que pueden encontrarse en aguas residuales son las lombrices intestinales, como son: *Acaris lumbricoides*, la *Taenia solitaria* *Taenis saginata* y *Taenia solium*. La etapa infecciosa de estos varia, en algunos se presentan en el estado mayor adulto o de la larva y en otros su etapa infecciosa se presenta en el estado de huevo, muchas especies resisten condiciones ambientales adversas y llegan a sobrevivir a distintos tipos de tratamientos convencionales.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a que el agua con altas concentraciones de grasas afecta de manera considerable las zonas donde desemboca el manto, e indirectamente la rívera, en el presente proyecto se propone técnica de Coagulación-Floculación-Sedimentación como alternativa tecnológica en la recuperación de agua proveniente de la industria de lavado de toallas industriales.

JUSTIFICACIÓN.

En años recientes, las políticas de administración y preservación de recursos nacionales se han enfocado al uso eficiente y búsqueda de nuevos yacimientos, donde la participación de los sectores urbanos e industriales se ha unificado, con objeto de preservar recursos no renovables para las generaciones actuales y futuras.

El agua es un recurso indispensable y necesario para la mayoría de los procesos productivos y de servicios; en el pasado se había obtenido de forma barata y abundante; sin embargo, se ha convertido en un recurso limitado y valioso en el que hay que realizar inversiones para su recuperación, replanteándose así el compromiso de hacer un uso eficiente de este recurso, su conservación y reúso en aquellos casos donde no se requiera una calidad de agua potable.

Hoy en día, existe una relación directa entre el crecimiento de los servicios y la mancha urbana, en particular la existencia de lavanderías industriales dedicadas al lavado de toallas con un alto contenido en grasas y/o aceites; que son utilizadas en mantenimientos mecánicos del sector industrial, provocando el incremento de los contaminantes en los efluentes. Aunado a esto, la mala disposición y/o regulación del efluente (sin tratamiento) disminuye la eficiencia de la tecnología actual en tratamiento de agua.

Por esta razón, en el presente proyecto se propone un sistema de tratamiento de agua residual proveniente del lavado de toallas. El proceso consiste en un tanque de Coagulación-Floculación-Sedimentación (CFS), equipado con sistemas de bombeo, utilizando como agente coagulante una sal inorgánica y como floculante un biopolímero. Con la finalidad de disminuir el consumo de agua y la contaminación que se genera al ser descargada.

6 OBJETIVOS.

6.1 Objetivo general.

Establecer las condiciones de operación de un sistema de tratamiento de Coagulación-Floculación-Sedimentación, para las aguas residuales de una lavandería industrial.

6.2 Objetivos específicos.

- I. Caracterizar fisicoquímicamente el agua residual proveniente del proceso de lavado de toallas con alto contenido en grasas y aceites.
- II. Estudiar y determinar las condiciones de Coagulación-Floculación-Sedimentación, en la cual se analice el fenómeno de la clarifloculación obtenida en el efluente.

7 ESTRATEGIA EXPERIMENTAL.

La estrategia experimental consistió de tres partes: a) análisis fisicoquímico del agua proveniente del lavado de toallas, b) prueba de tubos y jarras para determinar las cantidades de sal inorgánica y a su vez del biopolímero, en donde se obtiene la máxima remoción de contaminantes, c) escalamiento a reactor (escala laboratorio).

7.1 Análisis fisicoquímico.

7.1.1 Determinación del pH.

Se analizaron las muestras antes y después del tratamiento CFS, con ayuda de un potenciómetro Orión 210A previamente calibrado con soluciones buffer 4, 7 y 10.

Para la obtención de este parámetro se realizó de acuerdo a la norma NMX-AA-008-SCFI-2016.

7.1.2 Determinación de grasas y aceites.

A través de la determinación de grasas y aceites se obtiene un parámetro indicativo del grado de contaminación del agua por usos industriales y humanos. La norma NMX-AA-005-SCFI-2013, que define como: “Los compuestos orgánicos constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal y vegetal, así como de hidrocarburos del petróleo que son extraídos de la muestra utilizando hexano como disolvente”. Para la obtención de dicho parámetro se utilizó el método Soxhlet, debido a que la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-002-SEMARNAT-1996 lo piden como requisito para sus descargas.

7.1.3 Determinación de la demanda química de oxígeno.

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida (NOM-001). Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro ($\text{mg O}_2/\text{L}$).

Este parámetro fue obtenido con ayuda de la norma NMX-AA-030/2-SCFI-2011.

7.1.4 Detergencia (sustancias activas al azul de metileno SAAM).

Los tensoactivos entran en las aguas limpias y residuales principalmente por descarga de residuos acuosos del lavado doméstico e industrial de ropa y otras operaciones de limpieza. Un alto contenido de detergentes en agua puede provocar formación de espuma, toxicidad para la vida acuática y crecimiento desmesurado de la flora acuática por el aporte de fosfatos. La técnica empleada se basa en la norma NMX-AA-039-SCFI-2001.

7.1.5 Determinación de sólidos totales disueltos, conductividad y salinidad.

Los sólidos totales disueltos por sus siglas en inglés (TDS) son la suma de los minerales, sales, cationes o aniones disueltos en el agua. Esto incluye cualquier elemento presente en el agua que no sea (H_2O) molécula de agua pura y sólidos en suspensión. Es el material soluble constituido por materia inorgánica y orgánica que permanece como residuo después de evaporar y secar una muestra previamente filtrada a través de un filtro de fibra de vidrio con un tamaño de poro de $1.5 \mu\text{m}$ a una temperatura de $105^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Estos parámetros fueron determinados con la ayuda de un potenciómetro de mesa SANXIN modelo MP551 previamente calibrado.

La determinación fue basada en las normas NMX-AA-034-SCFI-2015 y NMX-AA-093-SCFI-2000.

7.1.6 Determinación de hierro (Fe).

La determinación de concentración de hierro (Fe), se realizó con ayuda de un espectrofotómetro de absorción atómica marca VarianTM Modelo 220 FS.

Esta determinación se realizó de acuerdo a la norma NMX-AA-051-SCFI-2001.

7.1.7 Prueba de tubos y jarras.

Los experimentos de coagulación química se realizaron en primera instancia por medio de una prueba de tubos en donde el objetivo principal fue encontrar la relación de coagulante ($\text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y floculante; en donde se removiera la mayor cantidad de aceites y grasas.

Una vez obtenida la relación coagulante y floculante por medio de la prueba de tubos, se realizó la prueba de jarras, la cual consistió en la separación de grasas y aceites del efluente por medio de clarifloculación. La coagulación se llevó a cabo; utilizando un motor de revolución variable marca Caframo® como sistema de mezclado, en conjunto con una propela compuesta de seis alabes en un volumen de 1 L, a 150 rpm durante un lapso de 5 minutos y posteriormente transcurrido este tiempo se agregó el biopolímero y se disminuyó la velocidad angular a 50 rpm durante un lapso de 5 minutos, con la finalidad de homogenizar toda la mezcla. Transcurrido el tiempo la muestra se vertió en un cono Imhoff.

8 RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.

8.1 Análisis fisicoquímico del agua residual.

Los resultados experimentales obtenidos en cada uno de los parámetros fisicoquímicos utilizada en la caracterización del efluente de la industria del lavado de toallas se encuentran distribuido en la siguiente tabla.

Tabla 3. Análisis fisicoquímicos de agua residual sin ningún tratamiento.

DETERMINACIÓN	NORMA	LÍMITE DE ACEPTACIÓN	AGUA ANTES DE TRATAMIENTO
<i>pH</i>	NMX-AA-008-SCFI-2016	5.5 – 10	12
<i>Grasas y aceites</i>	NMX-AA-005-SCFI-2013	15 ppm	3275.5 ppm
<i>Demanda química de oxígeno (DQO).</i>	NMX-AA-030/2-SCFI-2011.	200 g/L	133.66 g/L
<i>Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM, Detergencia)</i>	NMX-AA-039-SCFI-2001.	No especificado.	3303.38 ppm
<i>Sólidos totales disueltos, conductividad y salinidad.</i>	NMX-AA-034-SCFI-2015 NMX-AA-093-SCFI-2000 NMX-AA-073-SCFI-2001	20 ppm	9.59 ppm
<i>Hierro (Fe)</i>	NMX-AA-051-SCFI-2001	No especificado	0 ppm
<i>Coliformes totales</i>	NOM-092-SSA1-1994	2 UFC/mL	392 UFC/mL

Con la determinación de estos parámetros se obtuvo suficiente información sobre los compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en el efluente, el mismo que para ser reutilizado en el lavado de toallas industriales debe ser sometida a un tratamiento que reduzca efectivamente las concentraciones de las sustancias cuantificadas y disminuya hasta niveles aceptables, aquellas características fisicoquímicas que lo hacen indeseable como agua para lavado de toallas industriales.

8.1.1 Coagulación química.

Como sal inorgánica (coagulante) se utilizó $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 6H_2O$ y biopolímero (floculante).

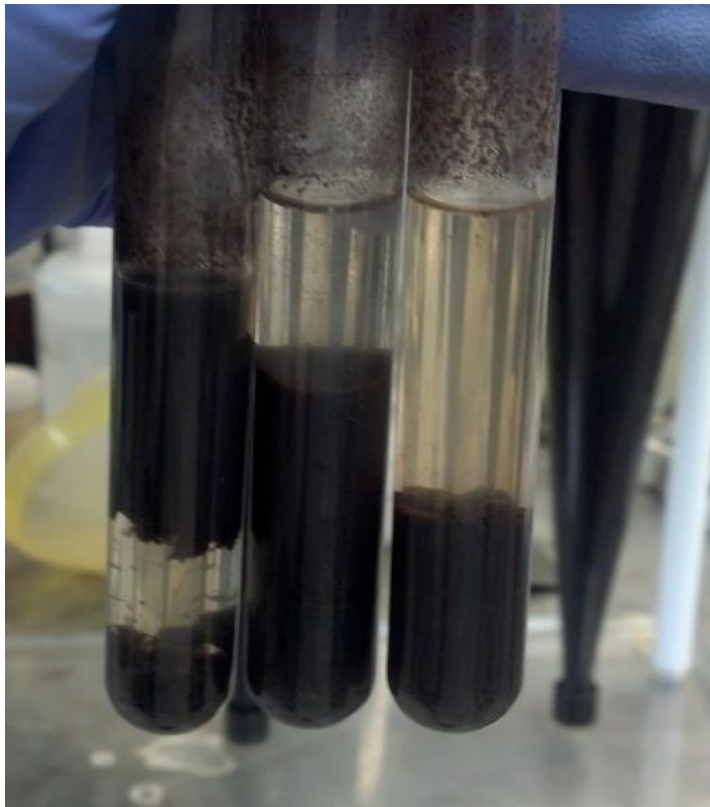


Figura 2. Coagulación química.

8.2 Prueba de tubos y jarras (selección de la concentración del coagulante y floculante).

8.2.1 Prueba de tubos.

Esta etapa consistió en realizar varios ensayos para lograr encontrar la relación que debe existir entre la sal inorgánica y el biopolímero en conjunto para reducir la carga parcial de las partículas en en el agua.

Para el estudio en esta etapa se realizaron pruebas en relaciones sal inorgánica-biopolímero de: 1:1,2:1,2:2,3:1,3:2 y 3:3.



Figura 3. Prueba en tubos de ensayo.

Obtenida la caracterización fisicoquímica del efluente se llevó a cabo la determinación de la relación de coagulante y floculante por medio de la ayuda de la prueba de jarras.

8.2.2 Prueba de jarras.

Para llevar a cabo esta prueba se midieron 500mL de agua residual generada en el proceso del lavado de toallas industriales, la cual fue vertida en un vaso de precipitado y se adicionó el coagulante (sal inorgánica) dejándose agitar por cinco minutos con una velocidad de agitación de 150 rpm. Pasado el tiempo se procedió a disminuir la velocidad de agitación a 50 rpm y se adicionó el floculante (biopolímero), durante un lapso de cinco minutos y transcurrido el tiempo se vertió la mezcla a un cono Imhoff, en donde se siguió la cinética de sedimentación del sólido clarifloculado.



Figura 4. Prueba de jarras.



Figura 5. Sedimentación en cono Imhoff.



Figura 6. Vertido en vaso de precipitado.

Por último, una vez encontrada la concentración para el tratamiento, se procedió a la caracterización fisicoquímica del clarificado. En la Figura 8 se encuentra la estrategia de tratamiento del efluente del lavado de toallas con alto contenido en grasas y aceites.

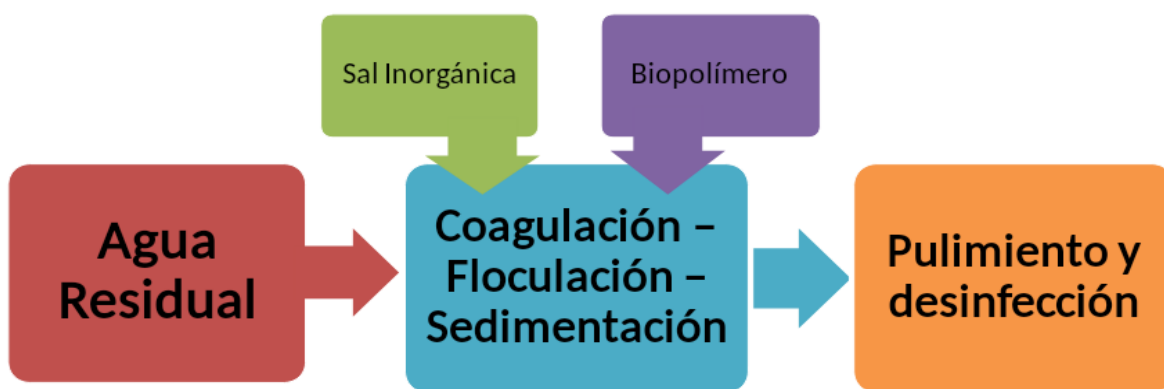


Figura 7. Estrategia de tratamiento y diagrama de bloques.

8.3 Caracterización fisicoquímica después del tratamiento.

Una vez que se le dio tratamiento de clarifloculación al agua residual, se realizaron los análisis para conocer el cambio en los resultados, los cuales se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Análisis fisicoquímicos del agua residual después del tratamiento.

DETERMINACIÓN	NORMA	LÍMITE DE ACEPTACIÓN	AGUA DESPUÉS DE TRATAMIENTO
<i>pH</i>	NMX-AA-008-SCFI-2016	5.5 – 10	4.03*
<i>Grasas y aceites</i>	NMX-AA-005-SCFI-2013	15 g/L	0.3 g/L
<i>Demanda química de oxígeno (DQO).</i>	NMX-AA-030/2-SCFI-2011.	200 g/L	133.66 g/L
<i>Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM, Detergencia)</i>	NMX-AA-039-SCFI-2001.	No especificado.	27.13 mg/L
<i>Sólidos totales disueltos, conductividad y salinidad.</i>	NMX-AA-034-SCFI-2015 NMX-AA-093-SCFI-2000 NMX-AA-073-SCFI-2001	20 mg/L	2.36 mg/L
<i>Hierro (Fe)</i>	NMX-AA-051-SCFI-2001	No especificado	**
<i>Coliformes totales</i>	NOM-092-SSA1-1994	2 UFC/mL	< 1 UFC/mL

*Hace falta ajuste de pH.

** No se realizó determinación de hierro (Fe) en agua tratada.

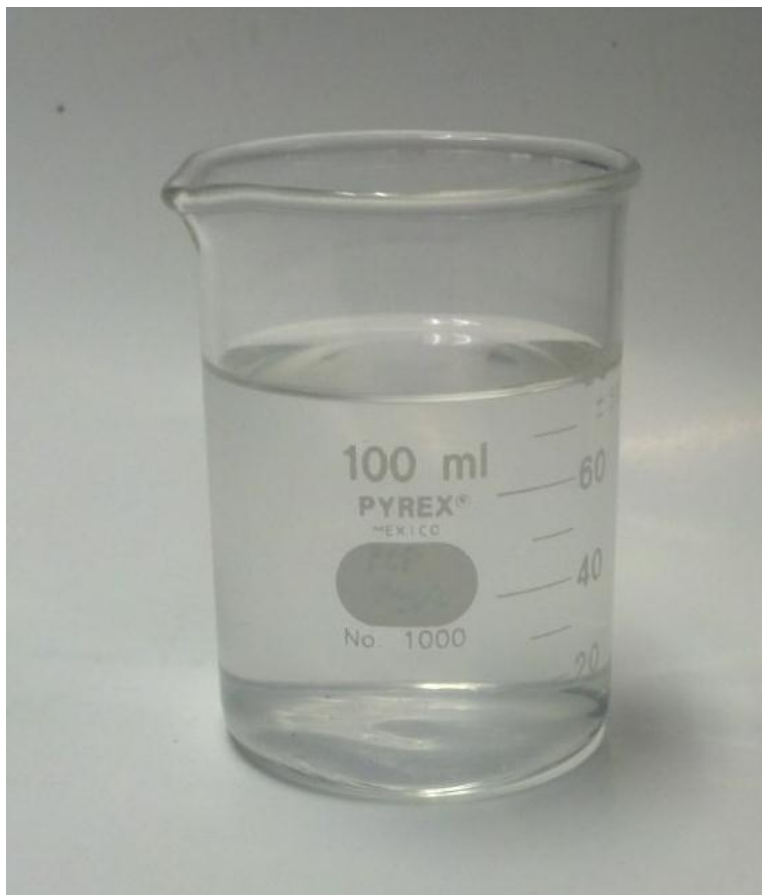


Figura 8. Agua resultante después del tratamiento.

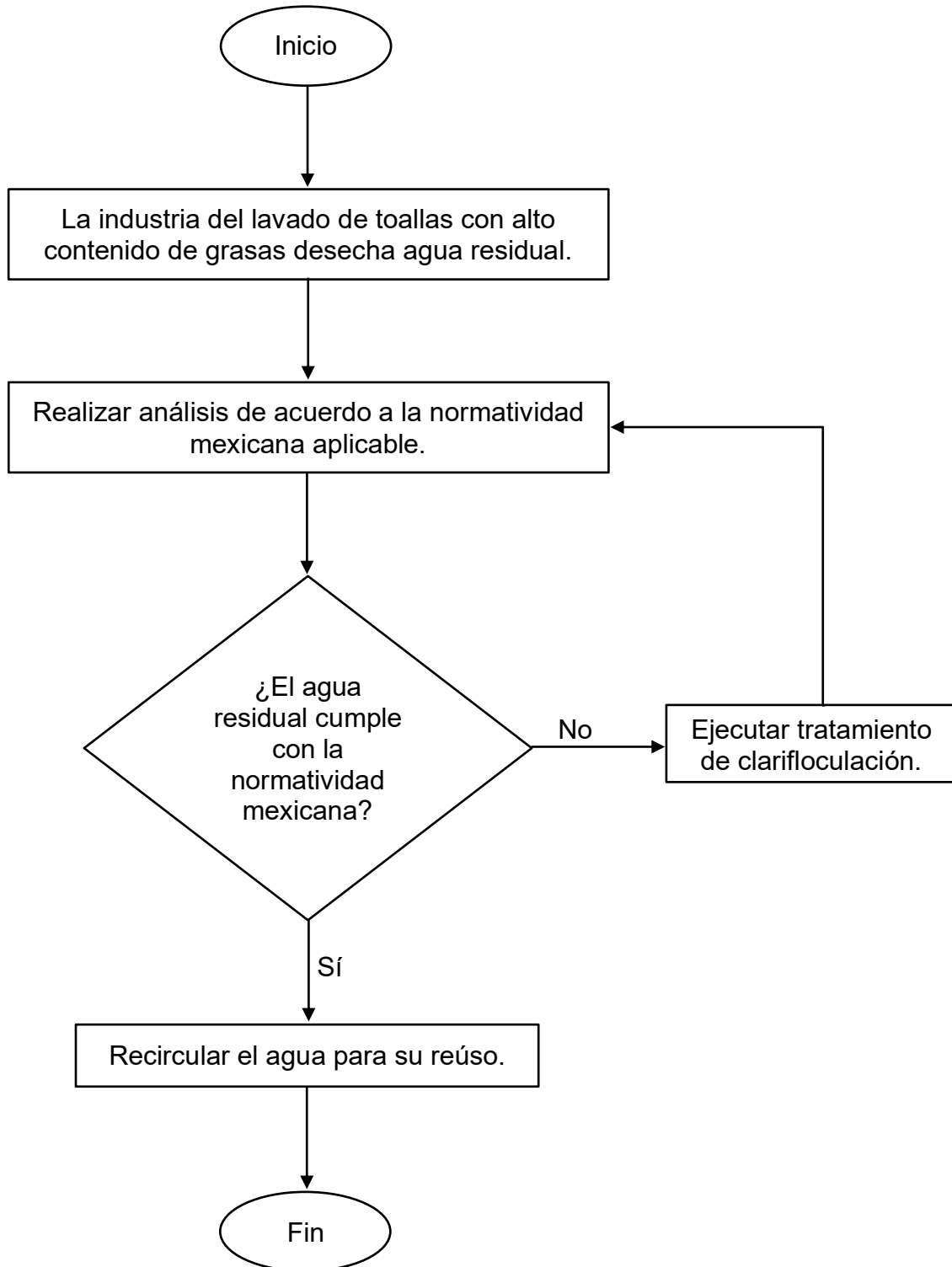
8.4 Calidad biológica del agua y escalamiento. (Trabajo no realizado por contingencia sanitaria)

Debido a la contingencia sanitaria generada por la pandemia de SARS-COV2 (COVID 19), no se lograron concretar la mayoría de los análisis microbiológicos (coliformes totales, coliformes fecales y helmintos).

Para el escalamiento a un reactor de 5L es muy importante contemplar la cantidad requerida de coagulante y floculante de acuerdo al flujo de agua residual proveniente de la industria de lavado de toallas con alto contenido de grasas, así como el sistema de bombeo. El tiempo de sedimentación utilizado será el obtenido a través de la prueba de jarras.

Una vez que se logre tener un clarificado y un lodo sedimentado, pasar el clarificado por un sistema de filtrado que tiene como resultado remover el excedente de partículas que por medio de la coagulación-floculación-sedimentación no fueron removidas, ya pasada dicha etapa se logra tener un efluente incoloro. Capaz de ser utilizado nuevamente en el proceso del lavado de toallas.

Para apoyo de la misma metodología se proporciona el siguiente diagrama de flujo:



CONCLUSIONES.

Este proyecto propone una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, para lograr de esta manera su reúso dentro del lavado de toallas de uso industrial para apoyar las condiciones del medio ambiente.

El proyecto propone una tecnología compacta, accesible y eficiente, ya que con dicha propuesta se logra cumplir con el objetivo principal, ya que se logra de esta manera remover el 90% de grasas y aceites, el cual es el principal problema del efluente que generan las lavanderías industriales.

Del proyecto Coagulación-Floculación-Sedimentación investigado se puede concluir que, mediante el tratamiento fisicoquímico propuesto y de acuerdo con los resultados obtenidos, los efluentes generados dentro de las lavanderías industriales del lavado de toallas, se puede reutilizar para más ciclos dentro del proceso de lavado de toallas, debido a que se cumplen con las características fisicoquímicas establecidas por la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Por otro lado, queda pendiente el análisis microbiológico del agua después del tratamiento debido a la contingencia sanitaria se dificultó la ejecución del análisis para culminar y asegurar la calidad necesaria según la NOM-003 y la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Finalmente, con los resultados del tratamiento fisicoquímico propuesto y el proceso para la remoción de las grasas y aceites podemos asegurar que se tiene una alternativa para el reúso de aguas residuales, el cual es uno de los principales problemas en la actualidad.

9 REFERENCIAS

- Acuña, R. (14 de Agosto de 2008). *Adimensionamiento y escalamiento de bioprocesos*. Obtenido de <https://bioreactorcrc.wordpress.com/2008/08/14/adimensionamiento-y-escalamiento-de-bioprosos/>
- Agua.org.mx. (s.f.). *Contaminación del agua*. Recuperado el Julio de 2020, de <https://agua.org.mx/contaminacion-del-agua/>
- Agua.org.mx. (s.f.). *Visión general del agua en México*. Recuperado el Agosto de 2020, de <https://agua.org.mx/cuanta-agua-tiene-mexico/>
- Aguas.org.mx. (s.f.). *Panorama del agua*. Recuperado el Septiembre de 2020, de <http://www.aguas.org.mx/sitio/index.php/panorama-del-agua/agua-en-el-mundo>
- Alasino, N. (2009). *Síntesis y diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Obtenido de <http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/tesis/bitstream/handle/11185/119/tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ascencio, M. T. (s.f.). *Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones*. Recuperado el Diciembre de 2020, de https://www.psa.es/es/projects/solarsafewater/documents/libro/04_Capitulo_04.pdf
- Bonsai Menorca. (s.f.). *Parámetros de calidad de las aguas de riego*. Recuperado el Febrero de 2019, de <http://www.bonsaimenorca.com/articulos/articulos-tecnicos/parametros-de-calidad-de-las-aguas-de-riego/>
- Caceres, E. W. (Febrero de 1994). *Proyecto de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas para reuso del agua en la agricultura*. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/4660/1/1080063779.PDF>
- Coagulación-Floculación-Sedimentación convencionales*. (s.f.). Recuperado el Junio de 2020, de El agua potable es esencial: <https://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/Treatment/Coagulation-Flocculation-technologies.html>
- Comisión Nacional del Agua. (2015). *Estadísticas del agua en México*. Ciudad de México.
- Comisión Nacional del Agua. (Abril de 2019). *Normas Oficiales Mexicanas*. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105139/Normas_Oficiales_Mexicanas.pdf
- Contaminación-agua.org. (s.f.). *Contaminantes del agua*. Recuperado el Marzo de 2020, de <https://contaminacion-agua.org/>
- Dropson team. (15 de 09 de 2016). *La contaminación de los ríos, lagos y acuíferos empieza en tu desagüe*. Obtenido de <https://www.dropson.es/blog-descalcificador/contaminacion-rios-lagos-acuiferos-empieza-en-desague/>
- Fan del agua. (10 de Mayo de 2017). *¿Cuáles son las principales fuentes contaminantes del agua?*
- Inc, Z.-M. (s.f.). *Potencial zeta: un curso completo en 5 minutos*. Recuperado el Enero de 2020, de http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/PotencialZeta_1246.pdf
- Loné, P. P. (28 de 09 de 2016). *Indicadores de calidad del agua*. Obtenido de <https://www.iagua.es/blogs/pedro-pablo-lone/indicadores-calidad-agua>
- Mendoza, E. J. (2018). *Humedales artificiales como sistema de tratamiento de aguas residuales*. Obtenido de <http://132.248.9.195/ptd2018/agosto/0778524/Index.html>
- Oocities.org. (s.f.). *Parámetros y características de las aguas naturales*. Recuperado el Marzo de 2019, de <http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/parametros1.pdf>

- Organización Mundial de la Salud. (s.f.). *Guías para la calidad del agua potable* (Tercera ed., Vol. 1). Recuperado el Enero de 2020, de https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowresres.pdf
- R.M. Camarillo-Escobedo, F.-P. y.-C. (11 de Diciembre de 2011). Desarrollo de un sistema hidrodinámico para sistemas de análisis en flujos miniaturizados. *Revista mexicana de ingeniería química*, 9. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/620/62026895009.pdf>
- Romero, M. (s.f.). Tratamientos utilizados en potabilización del agua. *Boletín electrónico - Universidad Rafael Landívar*, pág. 12. Recuperado el Noviembre de 2020, de <http://www.ozonoalbacete.es/wp-content/uploads/2011/08/estudio-agua-ozono.pdf>
- Ruíz, R. D. (2013). *Causas y soluciones del problema de olores en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/4144/Tesis.pdf.pdf?sequence=1>
- UNESCO. (2003). *Agua para todos agua para la vida*. Paris, Francia: UNESCO.
- Villanueva, Z. J. (2019). *Calidad fisicoquímica y microbiológica del agua*. Cajamarca, Perú.
- Villela, D. J. (Noviembre de 2014). *Diseño de planta de tratamiento de aguas residuales para el municipio de San Juan Chamelco, Alta Verapaz*. Obtenido de <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjcem/2014/06/14/Moran-Diego.pdf>

10 ANEXOS

10.1 NOM-001-SEMARNAT-1996.

TABLA 2

LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BASICOS																				
PARAMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS				SUELO		HUMEDALES NATURALES (B)			
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano(C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)				Uso en riego agrícola (A)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Temperatura	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40
°C (1)																				
Grasas y Aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25
Materia Flotante (3)	au- sen- te	au- sen- te	au- sen- te	au- sen- te	au- sen- te	au- sen- te	au- sen- te	au- sen- te	au- sen- te	au- sen- te	au- sen- te	au- sen- te	au- sen- te	au- sen- te	au- sen- te	au- sen- te	au- sen- te	au- sen- te	au- sen- te	au- sen- te
Sólidos Sedimentables (m/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2
Sólidos Suspendedos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A.	N.A.	75	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno5	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

10.2 NOM-002-SEMARNAT-1996.

TABLA 1

LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES			
PARAMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra)	Promedio	Promedio	Instantáneo
	Mensual	Diario	
Grasas y aceites	50	75	100
Sólidos sedimentables (mililitros por litro)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

10.3 NOM-003-SEMARNAT-1997.

TABLA 1

LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES

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

10.4 NOM-004-SEMARNAT-2001.

TABLA 1 LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS EN BIOSOLIDOS

CONTAMINANTE (determinados en forma total)	Excelente mg/kg en base seca	Bueno mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1 200	3 000
Cobre	1 500	4 300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2 800	7 500

4.7 Los límites máximos permisibles de patógenos y parásitos en los biosólidos se establecen en la Tabla 2.

TABLA 2 LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES PARA PATOGENOS Y PARASITOS EN BIOSOLIDOS

CLASE	PATOGENOS		PARASITOS
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella sp</i> NMP/g en base seca	Huevos de helminto/g en base seca
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
B	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35