

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“PROPUESTA DE UN SISTEMA PARA TRATAR EL AGUA
RESIDUAL DE LAS EMPRESAS DE ÁCIDOS GRASOS”**

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUÍMICO

P r e s e n t a :

ANDREA FABIÁN SÁNCHEZ

Asesor de Tesis:

GABRIEL MARTÍNEZ HERRERA

Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Morelia, Mich.

Junio 2013



AGRADECIMIENTOS

Al personal de la empresa productora de ácidos grasos por permitirme elaborar este proyecto en su planta: Ing. Miguel A. Calderón, Gerente de Planta; Ing. Eulises Saviñón, Jefe MASH; Ing. Tiburcio Liñán, Sptte. MASH; Ing. Celso N. Bucio, Supervisor Mto.

Al personal del OOAPAS por instruirme en tratamiento de aguas residuales y por darme acceso a sus instalaciones: QFB. Sergio López, QFB. Israel Melgarejo, Ing. Nicanor Ruíz.

Al CECTI (*Consejo Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación de Michoacán*). Por brindarme el apoyo con su programa: *BECAS – TESIS PARA LA TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍAS*. “Tesis apoyada por el Consejo Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán”.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y a la Facultad de Ingeniería Química, en especial a los sinodales: Dra. María Ilya Espitia Cabrera, M. en C. Gabriel Martínez Herrera y M en C. Virgilio Ledesma Yturry. Por su tiempo y dedicación a la realización de este proyecto.

Y a mi familia, a Alan J. Casias y a mis amigos por su apoyo incondicional en la realización y culminación de la carrera de Ingeniería Química.

DEDICATORIAS

A MIS PADRES:

MARÍA DEL CARMEN SÁNCHEZ MARTÍNEZ Y
JUVENTINO FABIÁN ARREDONDO

A MI HERMANO:

EDGAR FABIÁN SÁNCHEZ

POR EL ESFUERZO Y APOYO QUE SIGNIFICA TENER UNA HIJA Y UNA
HERMANA, POR SU CARÍÑO, SU COMPRENSIÓN, SUS CONSEJOS, POR TODO.

GRACIAS POR CADA DÍA.

ÍNDICE GENERAL

TEMA	PÁGINA
RESUMEN	1
GLOSARIO DE TÉRMINOS	2
CAPITULO 1.- INTRODUCCIÓN	5
1.1 El agua y su importancia en la sociedad.....	5
1.1.1 El agua.....	6
1.1.2 Química del agua.....	7
1.1.3 Propiedades.....	9
1.2 Generalidades	12
1.2.1 Ácidos grasos.....	13
1.2.2 Contaminación del agua	16
1.2.3 Coagulación-floculación.....	16
1.3 Justificación	17
1.4 Objetivos.....	18
1.4.1 Objetivo general	18
1.4.2 Objetivos particulares	18
1.5 Hipótesis	18
1.6 Alcance	18
CAPITULO 2.- MARCO TEÓRICO	19
2.1 Características del agua residual industrial empleada	19
2.1.1 Contaminantes principales.....	21
2.1.2 Influencia del agua residual industrial en el agua residual municipal.....	22
2.1.2.1 Fuentes principales de aguas residuales	23
2.1.2.2 Efectos de la contaminación del agua en el medio ambiente	24
CAPITULO 3.- MATERIALES Y MÉTODOS	26
3.1 Introducción.....	26
3.2 Materiales, equipo y reactivos utilizados.	27
3.3 Metodología general.....	29

3.4	Parámetros a medir	30
3.5	Pruebas	30
3.5.1	Pruebas exploratorias.....	31
3.5.2	Pruebas finales.....	36
CAPITULO 4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN		40
4.1	Resultados de la caracterización del agua residual industrial.....	40
4.2	Resultados de las pruebas exploratorias	41
4.3	Resultados de las pruebas finales	47
4.4	Análisis de resultados para las variables Flujo, Grasas y aceites, DBO ₅ , pH y Conductividad.....	51
4.4.1	Flujo.....	51
4.4.2	Grasas y aceites	53
4.4.3	DBO ₅	54
4.4.4	pH y conductividad.....	55
CAPITULO 5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		57
5.1	CONCLUSIONES	57
5.2	RECOMENDACIONES	59
CAPITULO 6.- SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS		60
APÉNDICES		61
	Apéndice 1. Técnicas para la determinación de parámetros	61
BIBLIOGRAFÍA		84

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
Fig. 1 - Gotas de agua en forma esférica sobre una hoja ^[20]	10
Fig. 2 - Concentración de SST, DBO ₅ y GyA en la empresa en el período comprendido de enero de 2010 a enero de 2012.	22
Fig. 3 - Curvas de oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno ^[18]	25
Fig. 4 - Primera prueba exploratoria. Prueba con cal + sulfato de aluminio una vez filtrada.	41
Fig. 5 - Segunda prueba exploratoria. Prueba con cal + carbón activado + sulfato de aluminio una vez filtrada.	42
Fig. 6 - Quinta prueba exploratoria. Pruebas con hipoclorito de sodio + cal + polímero aniónico una vez filtradas.	46
Fig. 7 - Prueba final 1. Comparación de agua cruda (a la izquierda de la foto) y agua tratada (a la derecha de la foto).	48
Fig. 8 - Prueba final 2. Comparación de agua cruda (a la izquierda de la foto) y agua tratada (a la derecha de la foto).	50
Fig. 9 - Comportamiento de descarga promedio de enero 2012 a abril 2013.	52
Fig. 10 - Comportamiento de descarga máxima de enero 2012 a abril 2013.	52
Fig. 11 - Diagrama de proceso del sistema de tratamiento propuesto.	58

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	PÁGINA
Tabla 1 - Parámetros de descarga.	19
Tabla 2 - Tabla 1 del Reglamento Para Controlar Las Descargas de Aguas Residuales al Alcantarillado Municipal de Morelia, límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales al sistema de alcantarillado municipal ^[17]	20
Tabla 3 - Materiales, equipo y reactivos utilizados.	28
Tabla 4 - Parámetros medidos.	30
Tabla 5 - Dosis añadida de reactivos, conductividad eléctrica y pH finales de la tercera prueba exploratoria.	33
Tabla 6 - Dosis añadida de reactivos y resultado de pH final en la cuarta prueba exploratoria.	34
Tabla 7 - Dosis añadida de reactivos, resultados de conductividad eléctrica y pH final de la quinta prueba exploratoria.	35
Tabla 8 - Prueba final 3. Dosis añadida de reactivos y resultados de pH final de la tercera prueba final.	39
Tabla 9 - Caracterización del agua residual industrial.	40
Tabla 10 - Resultados de la primera prueba exploratoria.	41
Tabla 11 - Resultados de conductividad eléctrica y pH de la segunda prueba exploratoria.	42
Tabla 12 - Resultados de prueba de grasas y aceites de la tercera prueba exploratoria.	44
Tabla 13 - Resultados de prueba de grasas y aceites de la cuarta prueba exploratoria.	45
Tabla 14 - Quinta prueba exploratoria. Resultados de grasas y aceites, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y sólidos suspendidos totales en el laboratorio del OOAPAS.	46
Tabla 15 - Prueba final 1. Resultados de pH y conductividad eléctrica en la empresa de ácidos grasos.	47

Tabla 16 - Prueba final 1. Resultados de grasas y aceites, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos totales, pH y conductividad eléctrica del laboratorio acreditado (CEMA).....	48
Tabla 17 - Prueba final 2. Resultados de pH y conductividad eléctrica en la empresa de ácidos grasos.....	49
Tabla 18 - Prueba final 2. Resultados de grasas y aceites, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos totales, pH y conductividad eléctrica.....	49
Tabla 19 - Prueba final 3. Resultados de grasas y aceites, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, sólidos totales, y conductividad eléctrica del laboratorio OOAPAS.	51
Tabla 20 - Comparación de resultados del parámetro Grasas y aceites entre tratamientos..	53
Tabla 21 - Comparación de resultados del parámetro DBO ₅ entre tratamientos.....	54
Tabla 22 - Comparación de resultados de pH entre tratamientos.....	55
Tabla 23 - Comparación de resultados de Conductividad eléctrica entre tratamientos.....	56

RESUMEN

El agua es un recurso natural que desafortunadamente está siendo contaminado más rápido de lo que se regenera. El mal uso del agua, el crecimiento de la población, la destrucción de fuentes naturales de agua limpia y la contaminación están poniendo la provisión de agua del planeta en peligro. Es por ello que se necesita de la acción rápida y oportuna tanto de las autoridades competentes como de los profesionales en la materia. Siendo además de gran utilidad, el fomento de una cultura en el cuidado del agua por parte de toda la sociedad en general. Es por ello que, este proyecto de investigación consistió en atacar el problema de la contaminación del agua de una empresa productora de ácidos grasos, causada por el vertimiento y arrastre de contaminantes provenientes tanto de la materia prima, lavados de las áreas de producción, exposición a la intemperie así como por el contacto con algunos equipos.

En el presente trabajo se propone un sistema de tratamiento de agua residual con alto contenido de grasas y aceites a base de clarifloculación físico-química el cual consiste en la coagulación, proceso donde se realiza una desestabilización de las partículas suspendidas de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas y; floculación, proceso de aglomeración de partículas desestabilizadas primero en microflóculos, y más tarde en aglomerados voluminosos llamados flóculos. Éste es el método propuesto para la remoción de la mayor parte de contaminantes que posee el agua residual a tratar, los cuales se encuentran normados en el Reglamento Para Controlar Las Descargas de Aguas Residuales al Alcantarillado Municipal de Morelia ^[17].

Como resultado de la investigación se encontró que el sistema de tratamiento propuesto logró controlar los parámetros problema (grasas y aceites, sólidos suspendidos totales) para que estos parámetros cumplan los límites máximos permisibles (LMP) que exige la normatividad, a excepción del pH que está por arriba del LMP al igual que la DBO₅ la cual luego del tratamiento se remueve alrededor de un 90% quedando cerca del LMP.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Aceites: Sustancia inflamable que es líquida a temperatura ambiente y que es característicamente soluble en solventes relativamente no polares pero sólo escasamente soluble en solventes acuosos. Hay tres grupos distintivos: 1) aceites animales y vegetales, los cuales usualmente consisten predominantemente de triacilgliceroles pero pueden contener cantidades variables de ésteres de ácidos grasos u otros alcoholes; 2) aceites minerales, derivados del petróleo, carbón, esquisto, etc., los cuales consisten predominantemente de hidrocarburos; y 3) aceites esenciales.

Ácidos graso: Ácido monocarboxílico alifático que se puede liberar por hidrólisis de grasas y aceites naturales.

Ácidos graso poliinsaturado: Un ácido graso que contiene más de un enlace doble.

Aguas residuales: Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarias, domésticos y similares, así como la mezcla de ellas.

Antropogénico: Antropógeno. Acción o efecto producido directa o indirectamente por las actividades humanas.

Capilaridad: Calidad de capilar, término que designa un conjunto de fenómenos debidos al balance de las fuerzas de atracción entre las moléculas de un líquido y las de las superficies circundantes. Se presenta en las zonas de contacto del líquido con un gas, sólido u otro líquido, y se manifiesta en el ascenso y descenso del nivel del líquido en tubos delgados, formación de películas, burbujas, etc. Fenómeno por el que la superficie de un líquido en contacto con un sólido se eleva o deprime según el líquido moje o no al sólido.

Coagulación: Formación de agregados a partir de soles coloidalmente inestables. Depende de la temperatura. Llamada también floculación.

Compuesto dipolar: Molécula eléctricamente neutra portadora de una carga eléctrica positiva y una negativa, en general localizadas, pero no necesariamente.

Conductividad eléctrica: El recíproco de la resistencia, medida bajo condiciones específicas, entre las caras opuestas de una unidad de cubo de dimensiones definidas de una

disolución acuosa. Para el análisis de la calidad del agua, ésta se expresa a menudo como "conductividad eléctrica" y puede ser utilizada como una medida de la concentración de solutos ionizables presentes en la muestra. Se expresa en siemens por metro (S/m) o unidades equivalentes

DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno): Es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días.

Floculación: Proceso en el que las pequeñas partículas distribuidas en un fluido se adhieren para dar agregados relativamente flojos y sueltos, que pueden estar o no separados macroscópicamente. Llamada también *aglomeración* y *coagulación*.

Flóculo: Agregado poco compacto de sólidos en suspensión, compuesto por partículas con tamaños de hasta unos pocos milímetros.

Grasas: Cualquier triglicérido o mezcla de triglicéridos que son sólidos por debajo de 20 ° C; aquéllos que son líquidos a estas temperaturas son usualmente referidos como aceites.

Hidrólisis: Reacción de doble descomposición que dan muchas sustancias con el agua. Por ejemplo, las sales. Se puede escribir $\text{sal} + \text{agua} \leftrightarrow \text{ácido} + \text{base}$. Los iones de las sales se comportan en función de su tendencia a ceder o captar protones en disolución acuosa. En consecuencia, la hidrólisis puede ser ácida o básica en más o menos extensión, según las constantes de ionización de los iones presentes en el equilibrio.

Ósmosis inversa: Separación del disolvente de una disolución a través de una membrana semipermeable aplicando a la disolución una presión superior a la presión osmótica. La presión obliga al disolvente a pasar a través de la membrana, mientras que las moléculas grandes quedan retenidas, con lo cual aumenta su concentración. Este procedimiento se emplea para concentrar disoluciones.

Oxígeno disuelto (OD): Oxígeno en el agua. Oxígeno libremente disponible en el agua, es la concentración de oxígeno existente a determinadas condiciones de presión y temperatura, en una muestra líquida proveniente de líquidos residuales o de un cuerpo de agua. Cantidad de oxígeno en forma de gas presente en el agua o en las aguas negras. Las bajas concentraciones de oxígeno disuelto se deben a la descarga de sólidos orgánicos en exceso. El oxígeno disuelto en los líquidos asegura la degradación de la materia orgánica. Su

concentración en el líquido es función de la presión, la temperatura y la calidad del líquido y es expresada normalmente en ppm. La solubilidad del oxígeno en el agua depende de la temperatura ya que a mayor temperatura menos oxígeno se disuelve. Por otra parte si el agua está contaminada tiene muchos microorganismos y materia orgánica y la gran actividad respiratoria disminuye el oxígeno disuelto. Un nivel alto de OD indica que el agua es de buena calidad.

Presión osmótica: Exceso de presión hidrostática que se debe aplicar a una disolución, separada del disolvente puro por una membrana semipermeable, para evitar la ósmosis, es decir, el flujo de disolvente de dicha membrana desde el disolvente a la solución. Viene dada por: $\Pi = c_B RT$ donde R es la constante de los gases, T es la temperatura termodinámica y c_B la concentración de especies de soluto, sin tener en cuenta su naturaleza.

Puente de hidrógeno: Tipo especial de interacción dipolo – dipolo entre un átomo de hidrógeno unido a un átomo de un elemento muy electronegativo (F, N, O) y otro átomo de uno de los otros tres elementos electronegativos.

Sedimentación: Proceso de acumulación de materiales transportados en disolución o por suspensión, saltación, tracción, etc., por corrientes de agua, de aire o de hielo. En tratamiento de aguas es la acción de permitir el establecimiento o estancamiento de las aguas por algún tiempo, para facilitar que los sólidos de mayor densidad que el agua, se depositen en el fondo por gravedad, facilitando así su manejo y extracción.

Suspensión coloidal: Suspensión de partículas cuyo tamaño está dentro del intervalo coloidal.

Triacilgliceroles: Lípidos, como los que se encuentran en la grasa animal y el aceite vegetal, esto es, un triéster de glicerol con ácidos grasos de cadena larga.

Viscosidad: Propiedad de los líquidos y gases newtonianos que caracteriza su resistencia a fluir.

CAPITULO 1.- INTRODUCCIÓN

La escasez del agua es un problema que aqueja, técnicos, científicos, estudiantes, docentes, políticos y en general, a la población. Es un problema que actualmente existe en las ciudades más pobladas del mundo, el abasto de tan preciado líquido es insuficiente causando desde riesgos sanitarios, pasando por el descontento de la población, provocando roces políticos hasta lamentablemente terminar en tragedias.

En los últimos años, el desabasto de agua potable ha llevado a los profesionistas en el ámbito de la Ingeniería Química a buscar alternativas de mejoramiento de la calidad del agua. Debido a esto, en cierta empresa productora de ácidos grasos se ha contemplado diseñar y construir un sistema de tratamiento de **aguas residuales** para, de esta manera, contribuir a la remoción de agentes contaminantes de sus aguas de proceso.

1.1 El agua y su importancia en la sociedad

Basta realizar una revisión a las dimensiones del recurso, cuantificar la disponibilidad del mismo y proyectar las necesidades que de él tiene la humanidad para su supervivencia y se tendrá una primera aproximación a la realidad que se debe afrontar por las generaciones actuales, o se maneja cuidadosamente para poder entregar a las futuras generaciones la posibilidad de una calidad de vida acorde con el desarrollo del hombre o nos veremos enfrentados a manejar problemas de supervivencia cuyas consecuencias estamos lejos de pensar.

También es importante analizar el agua desde el punto de vista científico para conocer sus singularidades y las propiedades que hacen de ella una sustancia poco común, distinta a los compuestos que con su misma conformación molecular se pueden encontrar en la química.

Su importancia para la vida, hace de este compuesto un objeto permanente de estudio que seguramente no terminará mientras la humanidad continúe su uso indiscriminado en la industria, en la agricultura, como fuente de energía y mientras no se tenga una cultura sobre su uso y cuidados, que a manera de políticas ambientales y para ordenar el recurso, se consignan mediante la legislación.

1.1.1 El agua

Tres cuartas partes de la Tierra están cubiertas de agua, dato impresionante además que es bien sabido que el agua es vida. Un buen estudio del agua se inicia analizando la molécula de este compuesto, el cual se encuentra formado por dos átomos de hidrógeno por uno de oxígeno siendo H_2O su fórmula química. Líquido incoloro, inodoro e insaboro. Los dos átomos de hidrógeno se encuentran separados entre sí por 105° adyacentes al átomo de oxígeno, por lo que es una molécula asimétrica; está cargada positivamente del lado del hidrógeno y negativamente del lado del oxígeno por lo que se conoce al agua como “**compuesto dipolar**”. Es por ello que se aglomeran más moléculas, el hidrógeno de la molécula atrae el oxígeno de otra molécula vecina. A la unión entre moléculas resultado de estas fuerzas de atracción se le llama “puente de hidrógeno” [5].

Los **puentes de hidrógeno** ocasionan una dificultad mayor en las moléculas de agua que en otras moléculas para alejarse de la superficie, es decir, convertirse en vapor. Esto se debe a que la energía requerida para romper el enlace de hidrógeno es mucho mayor que en otros compuestos comunes por lo cual se produce un alto contenido energético en el vapor de agua y resulta un medio efectivo en la transferencia de energía en la industria [5].

La Tierra y la atmósfera que la envuelve contienen grandes cantidades de agua. Sin embargo, aunque resulte paradójico, el agua es un recurso natural escaso. De la totalidad de agua que existe en la Tierra únicamente el 3% es agua dulce y de ella el 79% se encuentra almacenada en forma de hielo en los casquetes polares y en los glaciares, un 20% está constituida por aguas subterráneas y el resto son aguas superficiales ^[7].

Los recursos de agua son limitados y se calcula que, al ritmo actual de consumo, en el año 2025 un tercio de la población mundial se enfrentará a las drásticas repercusiones de la falta de agua ^[7].

El agua de mar contiene 35 gramos de sal en cada litro de agua, los casquetes polares son muy alejados de las poblaciones, el volumen de agua realmente disponible en la tierra se estima en 7 millones de kilómetros cúbicos existentes en:

Lagos: 123.000 km^3 ; corrientes: 1230 km^3 ; mantos acuíferos hasta 800 metros de profundidad: $3 \times 10^6 \text{ km}^3$; aguas profundas: $4 \times 10^6 \text{ km}^3$; atmósfera: 12.700 km^3 ^[22].

El agua es un elemento esencial e insustituible en todos los órdenes de la vida. En ella viven y se multiplican casi todos los organismos: bacterias, virus, animales superiores y plantas. Para todos los seres vivos el agua contribuye a la formación de todos los distintos líquidos biológicos necesarios para los procesos metabólicos, en especial la asimilación y digestión de alimentos. La sangre contiene agua en una proporción de 9/10 partes. El 70 % del peso de nuestro cuerpo es aportado por el agua ^[22].

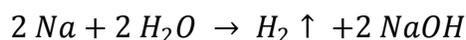
1.1.2 Química del agua

Su estructura molecular es análoga a la de las sustancias cuyas fórmulas moleculares son: H_2Te , H_2Se , H_2S , H_2O y sin embargo se aleja de los valores esperados para sus temperaturas de fusión y ebullición.

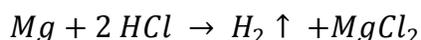
Reacciona con algunos metales como el sodio, el potasio (produciendo una reacción violenta) y el calcio dando el hidróxido del metal correspondiente e hidrógeno que se desprende en forma de gas. Se combina con los anhídridos formando ácidos (oxiácidos). Reacciona con los metales produciendo óxidos (corrosión).

El agua se denomina el disolvente universal. Cuando disuelve a un mineral, se producen nuevos materiales a partir de los átomos liberados del mineral. Estas partículas fundamentales se llaman iones. La ruptura de un compuesto químico mediante su disolución en agua forma cationes, cargados positivamente, y aniones, cargados negativamente. En general, un aumento en la temperatura del agua provoca un aumento en la solubilidad de la mayor parte de las sales. Excepciones importantes y notables son CaCO_3 , CaSO_4 , MgCO_3 y Mg(OH)_2 , todas las cuales se vuelven menos solubles al aumentar la temperatura ^[5].

Los iones que están formados por diferentes átomos se llaman radicales. Los radicales comunes en la química del agua incluyen al amonio, NH_4^{+1} , un catión; y nitrato, NO_3^{-1} , sulfato, SO_4^{-2} , y fosfato, PO_4^{-3} , los cuales son aniones. Los elementos que forman cationes en solución acuosa se pueden clasificar de forma amplia como metales alcalinos (e.g. Na, K), metales alcalinotérreos (e.g. Mg, Ca), y metales pesados (e.g. Fe, Mn). En su forma elemental, cada uno de ellos puede desplazar al hidrógeno de las soluciones acuosas. El sodio y el potasio son tan activos que reaccionan con el agua para liberar hidrógeno ^[5]:



El magnesio no reacciona con agua fría, pero reacciona con ácido, que es una solución del ión hidrógeno ^[5]:



Algunos tipos de materia pueden dispersarse en agua aun cuando no sean realmente solubles. Esta dispersión se realiza mediante la ruptura del material en pedazos extremadamente pequeños, en el límite superior del rango de tamaño para los iones y moléculas. Las partículas de este tamaño se llaman coloides. La superficie de casi toda la materia tiene un residuo de cargas eléctricas. Esto lleva a la creación de un voltaje superficial elevado, como se demuestra en pequeña escala mediante la descarga de una

chispa de electricidad estática en un día frío y seco, y a gran escala por los rayos. Esta carga superficial elevada, que es negativa en el caso de los ácidos grasos, hace que las partículas coloidales se repelan entre sí, manteniendo de esta forma la estabilidad de la dispersión ^[5].

La tabla periódica muestra que cierto número de elementos tienen más de una valencia. Un ejemplo es el hierro, cuyo óxido es bastante soluble en agua cuando su valencia es +2 y casi insoluble cuando su valencia es +3. Si la valencia de un material se vuelve más positiva o menos negativa, se dice que se ha oxidado. La reducción ocurre cuando la valencia se vuelve más negativa o menos positiva; por ejemplo, en el cambio de hierro +3 a hierro +2, se dice que el hierro se ha reducido. Otro ejemplo de esto, es el radical cromato, CrO_4^{-2} , en donde el cromato tiene una valencia de +6; cuando se reduce el cromo cambia a la valencia de +3. En este ejemplo, un inhibidor efectivo de la corrosión, el cromato, se vuelve un catión metálico pesado sin propiedades útiles, y precipita como $\text{Cr}(\text{OH})_3$ para producir materia en suspensión ^[5].

Ciertas sustancias químicas para el tratamiento del agua, como el cloro gaseoso, son efectivos debido a que son agentes fuertemente oxidantes. Cuando el cloro está presente en su forma elemental, tiene valencia cero. Si el cloro ataca al carbono en su estado elemental, el carbono cambia de valencia cero a +4 y forma CO_2 gaseoso, y el cloro se reduce del estado de valencia cero hasta el anión cloruro, Cl^{-1} . En las reacciones de este tipo, un material se oxida y el otro se reduce, con un cambio neto de cero en el balance eléctrico del sistema, puesto que hay el mismo número de cargas positivas que negativas ^[5].

1.1.3 Propiedades

Como compuesto químico, el agua presenta propiedades que se alejan de los compuestos que tienen una conformación molecular similar y sus características la hacen "especial" en su estudio porque:

Es la única sustancia en estado natural que se presenta sobre la tierra, al mismo tiempo, bajo los tres estados: Sólido en los casquetes polares y nevados, líquido en los mares lagos y ríos, gaseoso como parte del aire se encuentra el vapor de agua.

El volumen de las sustancias disminuye al enfriarse, pero el agua al llegar a 4°C se empieza a dilatar y a disminuir su densidad. A 0 °C ocurre una dilatación abrupta. Su volumen aumenta en una onceava parte al formar hielo. La liberación de calor en la congelación del agua es mayor que en otros compuestos. Los puentes de hidrógeno producen rearrreglos cristalinos que hacen que el hielo se expanda más que el volumen del líquido original, con lo que se da una disminución de su densidad. A causa de este fenómeno el hielo flota en el agua, de lo contrario los lagos se congelarían desde el fondo impidiendo la vida marina que conocemos hoy día ^[5].

El agua tiene además de sus excepcionales propiedades caloríficas, propiedades físicas diferentes a las de otros líquidos. El agua tiene la tensión superficial más alta de todos los líquidos comunes. Por lo tanto tiene una gran capacidad erosiva. Su alta tensión superficial se verifica fácilmente al colocar una aguja en un vaso de agua, viendo caminar a los mosquitos en la superficie de una charca o en una gotita de agua de forma esférica rodando sobre una hoja (Fig. 1) ^[5].



Fig. 1 - Gotas de agua en forma esférica sobre una hoja ^[20].

Además de esta elevada **tensión superficial** ocasionada por los puentes de hidrógeno, también provoca que el agua suba en un tubo capilar. Tiene una gran capacidad de cohesión y se adhiere a la mayoría de las sustancias sólidas con que entra en contacto.

La combinación de la tensión superficial y la adherencia puede levantar una columna de agua, comportamiento que se conoce como **capilaridad**. Dicha capilaridad es medio de circulación desarrollada en plantas a través de sus raíces y sistemas tisulares (tejidos) ^[5].

Frecuentemente al agua se le llama disolvente universal. El sobrenombre de disolvente universal fue dado al agua por los alquimistas. Tiene la capacidad de disolver a una gran cantidad de sustancias sólidas, líquidas e incluso gaseosas debido a su alto momento dipolar y a una alta constante dieléctrica. El agua en la Tierra en su mayoría se encuentra en forma de disolución, no es pura. Disuelve más solutos que cualquier otro disolvente, más no quiere decir que todas las sustancias sean solubles en agua. Las aguas naturales como los ríos y lagos, contienen gases disueltos como el oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono. Igualmente, las aguas subterráneas contienen sólidos disueltos en forma de sales minerales que va absorbiendo desde la superficie hasta llegar al subsuelo ^[15].

El agua es ionizada muy ligeramente, dando sólo 10^{-7} moles de iones hidrógeno y 10^{-7} moles de iones hidroxilo por litro, y actúan como aislante, ya que no puede conducir la corriente eléctrica. La **conductividad eléctrica** se genera al momento de disolver sales o sustancias ionizantes en el agua. Incluso esta conductividad eléctrica se utiliza en aguas naturales para determinar el contenido de minerales disueltos ^[5].

La **presión osmótica** es otro fenómeno interesante que sucede en las soluciones acuosas. Cuando dos soluciones están separadas por una membrana, el agua pasará del lado más diluido al más concentrado para tratar de diluir. Dicho proceso está en funcionamiento constante en las células de los seres vivos controlando la concentración de solutos. Además, se utiliza en productos alimenticios para su preservación mediante el salado haciendo que el agua de los microorganismos encargados de la descomposición salga de sus cuerpos para intentar diluir la solución salina externa. Existen celdas de membranas que trabajan con una presión mayor a la presión osmótica que invierten el flujo del agua que va desde lo más diluido a lo más concentrado, este procedimiento se conoce como **ósmosis inversa** el cual es utilizado efectivamente en la desalinización del agua ^[5].

Otra propiedad importante del agua que afecta su tratamiento y empleo es la **viscosidad**, la cual es una medida de la fricción interna que existe entre el movimiento de capas de moléculas una sobre otra. Esta fricción disminuye al aumentar la temperatura del agua y con ello las sales y gases disueltos se difunden más rápido acelerando el tratamiento químico, la sedimentación y la desgasificación [5].

La propuesta del presente trabajo, es estudiar método de clarifloculación fisico-química, para hacer uso de este proceso, son necesarios los procesos de coagulación y floculación siendo el primero donde sufren una desestabilizan los componentes de una suspensión y el segundo donde esas partículas desestabilizadas se unen para formar partículas estables o aglomerados.

1.2 Generalidades

El agua residual es el agua que, habiendo sido usada, constituye un residuo y se convierte en algo que ya no sirve para el usuario directo. Las concentraciones de sus contaminantes, como lo son metales pesados, grasas y aceites, coliformes, etc., se encuentran fuera de los límites máximos permisibles según las normas que apliquen y es entonces que se busca hacer uso de un sistema de tratamiento para estas aguas.

El método más eficaz para controlar la contaminación del agua es propiamente evitándolo. El hecho de contaminar la menor cantidad posible de agua, es la forma más barata en que se puede operar una planta de tratamiento de agua residual debido a que éstas se diseñan en base al flujo máximo a tratar. Es por ello que mientras más conscientes estemos de la dificultad y el costo invertidos para limpiar el agua contaminada, menor será la proporción de agua residual vertida en bienes, municipales, estatales y nacionales.

Existen varios tipos de tratamientos para el agua residual, desde los que son amigables con el medio ambiente, ya que no requieren de instalación ni operación de equipos, como lo son los humedales; hasta macro plantas que utilizan tratamientos primario, secundario y terciario, filtración, desinfección y digestión de lodos y secado.

La clarifloculación fisico-química es un proceso donde se realiza una desestabilización de un coloide y posteriormente se aglomeran esas partículas desestabilizadas para formar flóculos de mayor tamaño que luego de cierto tiempo sedimentarán.

1.2.1 Ácidos grasos

Las **grasas** animales y **aceites** vegetales son los lípidos que se encuentran distribuidos ampliamente en la naturaleza. Aparentemente son diferentes (las grasas animales como la mantquilla y la manteca son sólidos, mientras que los aceites vegetales como el aceite de maíz y el de cacahuete son líquidos), pero sus estructuras están estrechamente relacionadas. Químicamente, las grasas y los aceites son triglicéridos o **triacilgliceroles** (triésteres de glicerol con tres ácidos carboxílicos de cadena larga llamados **ácidos grasos**). Los animales utilizan las grasas como almacenamiento de energía a largo plazo, debido a que están mucho menos oxidadas que los carbohidratos y proveen casi seis veces tanta energía que una masa equivalente del glucógeno hidratado almacenado ^[16].

La **hidrólisis** de una grasa o de un aceite con NaOH acuoso produce glicerol y tres ácidos grasos. Por lo general, los ácidos grasos no están ramificados y contienen un número par de átomos de carbono entre 12 y 20. Los tres ácidos grasos de una molécula de un triglicerol específico no son necesariamente los mismos, y es probable que el aceite o la grasa de una fuente dada sea una mezcla compleja de varios triacilgliceroles distintos ^[16].

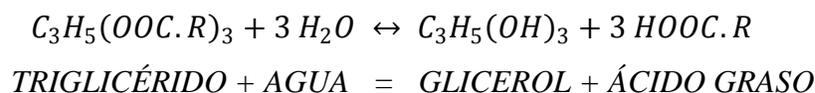
Se conocen más de 100 ácidos grasos diferentes, y casi 40 se encuentran distribuidos ampliamente en la naturaleza. El ácido palmítico (C_{16}) y el ácido estéarico (C_{18}) son los ácidos grasos más abundantes.; los ácidos oleico y linoleico (ambos C_{18}) son los ácidos grasos insaturados que abundan más. El ácido oleico es monoinsaturado dado que sólo tiene un enlace doble, mientras que los ácidos linoleico, linolénico, y araquidónico son **ácidos grasos poliinsaturados** porque tienen más de un enlace doble. Los ácidos linoleico y linolénico se encuentran en la crema y son esenciales en la dieta humana; los bebés crecen poco y desarrollan lesiones cutáneas si se alimentan por períodos largos con una dieta de leche sin grasa ^[16].

Los ácidos grasos insaturados tienen por lo general puntos de fusión menores que sus contrapartes saturados, una tendencia que también es cierta para los triacilglicérols. Dado que los aceites vegetales tienen una proporción generalmente más alta de ácidos grasos insaturados que saturados, que las grasas animales, tienen puntos de fusión bajos. La diferencia es una consecuencia de la estructura. Las grasas saturadas tienen una forma uniforme que les permite ordenarse eficientemente en un retículo; sin embargo, en los aceites vegetales insaturados los enlaces $C=C$ introducen doblamientos y deformaciones en las cadenas de hidrocarburo, lo que hace más difícil la formación cristalina. Mientras más dobles enlaces haya, es más difícil para las moléculas cristalizarse y es más bajo el punto de fusión del aceite ^[16].

Los enlaces $C=C$ en los aceites vegetales pueden reducirse por una hidrogenación catalítica, realizada típicamente a temperatura alta utilizando un catalizador de níquel, para producir grasas saturadas sólidas o semisólidas. La margarina y algunas especies de manteca se producen hidrogenando aceite de soya, cacahuete o semilla de algodón hasta que se obtiene la consistencia apropiada. Desafortunadamente, la reacción de hidrogenación se acompaña por alguna isomerización cis-trans de los enlaces dobles restantes, lo que produce grasas con alrededor de 10% al 15% de ácidos grasos insaturados trans. La ingesta de ácidos grasos trans aumenta los niveles de colesterol en la sangre, por lo que incrementan el riesgo de problemas cardíacos. Un ejemplo es la conversión de ácido linoleico en ácido elaídico ^[16].

El principal interés que ofrece, en la actualidad, la hidrólisis de grasas a alta presión se centra en los procesos continuos. En este proceso de hidrólisis, se incorporan los flujos a contracorriente de agua y la grasa, en una torre de hidrólisis o desdoblamiento. No se suelen emplear catalizadores y es suficiente un tiempo de contacto de 3.5 horas o menos, para hidrolizar del 97 al 99% de la grasa. Se emplean temperaturas superiores a los 260 °C y presiones de 50 kg/cm²; se ha comprobado que las temperaturas a partir de los 275 °C descomponen considerablemente el glicerol ^[1].

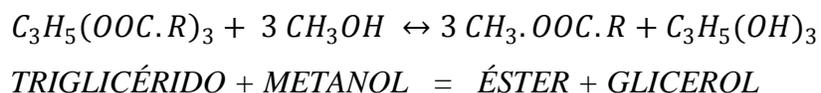
En condiciones apropiadas, los triglicéridos de las grasas se pueden hidrolizar, para dar ácidos grasos y glicerol ^[1]:



La reacción es reversible, de manera que, si no se separan los cuerpos reaccionantes y los productos de la reacción del medio en que ésta se realiza, se llega a un equilibrio, que se asegura un alto grado de hidrólisis, por la adición de una gran exceso de agua y por las sucesivas extracciones de la fase acuosa, rica en glicerina, que se reemplaza con agua fresca ^[1].

Si la reacción que se desea producir es la inversa de la indicada anteriormente, puede alcanzarse completamente por una continua separación del agua de la zona de la reacción. Si a continuación de la reacción hidrolítica se sustituye el glicerol por otro alcohol y se provoca la esterificación, se pueden obtener fácilmente ésteres de los ácidos grasos con alcoholes mono y polivalentes. En el caso de que, al efectuar la reacción de esterificación, el alcohol polivalente esté en exceso, se formarán ésteres parciales; por ejemplo, los mono y diglicéridos ^[1].

Los ésteres de los alcoholes más sencillos (etílico y metílico), se pueden preparar por reacción directa entre el alcohol y la grasa, de la que desplazan al glicerol ^[1]:



1.2.2 Contaminación del agua

La contaminación de carácter **antropogénico** da lugar a vertidos de composición y características muy variadas. La contaminación del agua se conoce como la acción y efecto de introducir materias o formas de energía, o inducir condiciones en el agua que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores, con la salud humana, o con los ecosistemas acuáticos o terrestres directamente asociados a los acuáticos ^[7].

1.2.3 Coagulación-floculación

Procesos como la **coagulación** y **floculación** son utilizados para la eliminación de sólidos suspendidos en el agua, cuando la velocidad de sedimentación natural es muy lenta como para proporcionar una clarificación eficaz.

El agua cruda contiene sólidos de gran tamaño, que logran asentarse en períodos cortos de tiempo. Sin embargo, también contiene sólidos de menor tamaño, que prolongan el tiempo de **sedimentación** y una gran parte de ellos pueden ser coloides. Cada partícula en su superficie, se encuentra estabilizada con cargas eléctricas negativas, que repelen a otra partícula, semejante a los polos iguales de un imán se repelen. Esto impide que choquen las partículas entre sí, evitando la formación de masas más grandes, conocidas como flóculos y, por lo tanto, no sedimentan ^[5].

La coagulación se encarga de desestabilizar a los coloides, al ser neutralizadas las fuerzas que los mantienen separados, mediante la adición de coagulantes químicos y energía de mezclado. Usualmente, se utilizan sales de aluminio, de hierro y polielectrolitos. Las cargas eléctricas se anulan al agregar el coagulante químico y, de esta manera, se juntan partículas coloidales y forman flóculos. Los flóculos al principio son pequeños pero al irse añadiendo uno con otro, forman aglomerados mayores con la capacidad de asentamiento. A la formación de flóculos, se le denomina floculación ^[5].

Puede ser que el flóculo que se forma por la aglomeración de varios coloides no sea lo bastante grande como para asentarse o desecarse con la rapidez deseada. Un floculante reúne partículas floculadas en una red, formando puentes de una superficie a otra y enlazando las partículas individuales en aglomerados. El alumbre, las sales de hierro y los polímeros de peso molecular alto son floculantes comunes. La floculación es estimulada por un mezclado lento que junta poco a poco los flóculos; un mezclado demasiado intenso los rompe y raramente se vuelve a formar en su tamaño y fuerza óptimos. La floculación no sólo aumenta el tamaño de las partículas del flóculo; sino que también afecta su naturaleza física ^[5].

1.3 Justificación

El agua es un recurso de gran importancia para la vida en nuestro planeta. Con el crecimiento de la población la demanda de bienes económicos aumenta, por lo que la industria crece de manera importante, generando problemas ambientales. Las normas son cada vez más estrictas, por lo que es necesario vincular a las Universidades con las Empresas, para desarrollar proyectos que en un futuro resuelvan los problemas actuales. La industria química genera una gran cantidad de agua residual, que al no ser tratada bajo NOM's (Normas Oficiales Mexicanas), presenta un gran problema para los ecosistemas.

Con el presente proyecto se buscará que las empresas productoras de ácidos grasos viertan sus aguas residuales dentro de los LMP del Reglamento Municipal con el fin de que la empresa cumpla con la legislación vigente y no se haga acreedora de sanciones económicas; además se tratan las aguas residuales para evitar la contaminación y así mejorar la calidad del agua con lo que queda plenamente justificado este trabajo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es proponer un sistema que permita tratar el agua residual en una empresa productora de ácidos grasos utilizando el método de clarifloculación físico-química.

1.4.2 Objetivos particulares

- Caracterizar las aguas residuales de una empresa productora de ácidos grasos siguiendo las NOM's.
- Encontrar las mejores condiciones de operación para el sistema propuesto, clarifloculación físico-química, para tratar las aguas residuales de la empresa.

1.5 Hipótesis

A través del sistema de tratamiento de clarifloculación físico-química, se obtendrá la reducción de contaminantes presentes en las aguas residuales de la empresa de ácidos grasos; principalmente grasas y aceites, DBO₅ y sólidos suspendidos totales.

1.6 Alcance

El alcance del presente trabajo de investigación vinculado con la industria, es el de reducir los contaminantes: grasas y aceites, sólidos suspendidos totales y DBO₅ hasta que estos parámetros cumplan los límites máximos permitidos por el Reglamento para Controlar las Descargas de Aguas Residuales al Alcantarillado Municipal de Morelia y las NOM's.

Los resultados se verifican a través de los análisis de laboratorio correspondientes a las pruebas más representativas.

CAPITULO 2.- MARCO TEÓRICO

2.1 Características del agua residual industrial empleada

Dentro de la industria manufacturera de ácidos grasos, se encuentran ciertos procesos y actividades donde es necesaria la utilización de agua como lo son:

1. Procesos de enfriamiento (torres de enfriamiento);
2. Calentamiento;
3. Destilación;
4. Vacío en eyectores;
5. Proceso de desdoblamiento (hidrólisis del triglicérido);
6. Lavados, entre otros.

Dado que estos procesos utilizan agua cruda provista por el sistema de distribución de agua local, no es posible recuperar el agua en las condiciones en las que fue provista. Ésta es la principal fuente de agua residual que se genera en estas plantas.

Los valores de los parámetros problema, en los últimos dos años, se encuentran reportados en la Tabla 1:

Tabla 1 - Parámetros de descarga.

Parámetros	VALORES		
	Mínimo	Promedio	Máximo
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)	1290	2112	4248
Grasas y aceites (mg/l)	125	805	2128
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	287	1041	2771
pH (Unidades)	4.0	5.4	8.2

De acuerdo al Reglamento Para Controlar Las Descargas de Aguas Residuales al Alcantarillado Municipal de Morelia, en su Tabla 1, los LMP para sus diferentes parámetros son los siguientes:

Tabla 2 - Tabla 1 del Reglamento Para Controlar Las Descargas de Aguas Residuales al Alcantarillado Municipal de Morelia, límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales al sistema de alcantarillado municipal ^[17].

TABLA DE PARÁMETROS	
PARÁMETROS	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES
Sólidos sedimentables	5 ml/l
Sólidos suspendidos totales	100 mg/l
Grasas y aceites	50 mg/l
Unidades de pH	5.5 a 10
Temperatura	40 °C
Materia flotante	Ausente
Coliformes totales	5000 NMP/100ml
Demanda bioquímica de oxígeno	150 mg/l
Sustancias activas al azul de Metileno (SAAM)	30 mg/l
Arsénico total	0.5 mg/l
Cadmio total	0.5 mg/l
Cianuro total	1.0 mg/l
Cobre total	10.0 mg/l

Cromo hexavalente	0.5 mg/l
Mercurio total	0.01 mg/l
Níquel total	4.0 mg/l
Plomo total	1.0 mg/l
Zinc total	6.0 mg/l

2.1.1 Contaminantes principales

Las principales tecnologías utilizadas para la producción de ácidos grasos y sus derivados son las siguientes:

1. **Desdoblamiento (hidrólisis):** Separación del triglicérido en tres ácidos grasos (iguales o diferentes) y glicerina.
2. **Destilación simple:** Separación líquido-líquido para extraer impurezas a los ácidos grasos.
3. **Hidrogenación:** Añade hidrógeno a la cadena de ácido graso para pasar de ácidos grasos insaturados a saturados.
4. **Esterificación:** El ácido graso reacciona con un alcohol para producir el éster deseado, en este caso, monoestearato de glicerilo.

La producción de ácidos grasos provee principalmente de partículas coloidales formando una emulsión, que son producto de la mezcla del agua y la grasa (sebo de res y algunos aceites vegetales). Ésta **suspensión coloidal** se ve reflejada en las altas concentraciones de los siguientes parámetros:

- Grasas y aceites
- Sólidos suspendidos totales
- Demanda bioquímica de oxígeno

Las empresas productoras de ácidos grasos dan seguimiento a estos parámetros, con la finalidad de controlarlos en los procesos de producción, las pruebas realizadas en el presente trabajo han demostrado que, atacando uno de estos tres parámetros, inmediatamente los otros dos también disminuyen. Esto debido a que mantienen un comportamiento ligeramente similar como se muestra en la siguiente gráfica (Fig. 2):

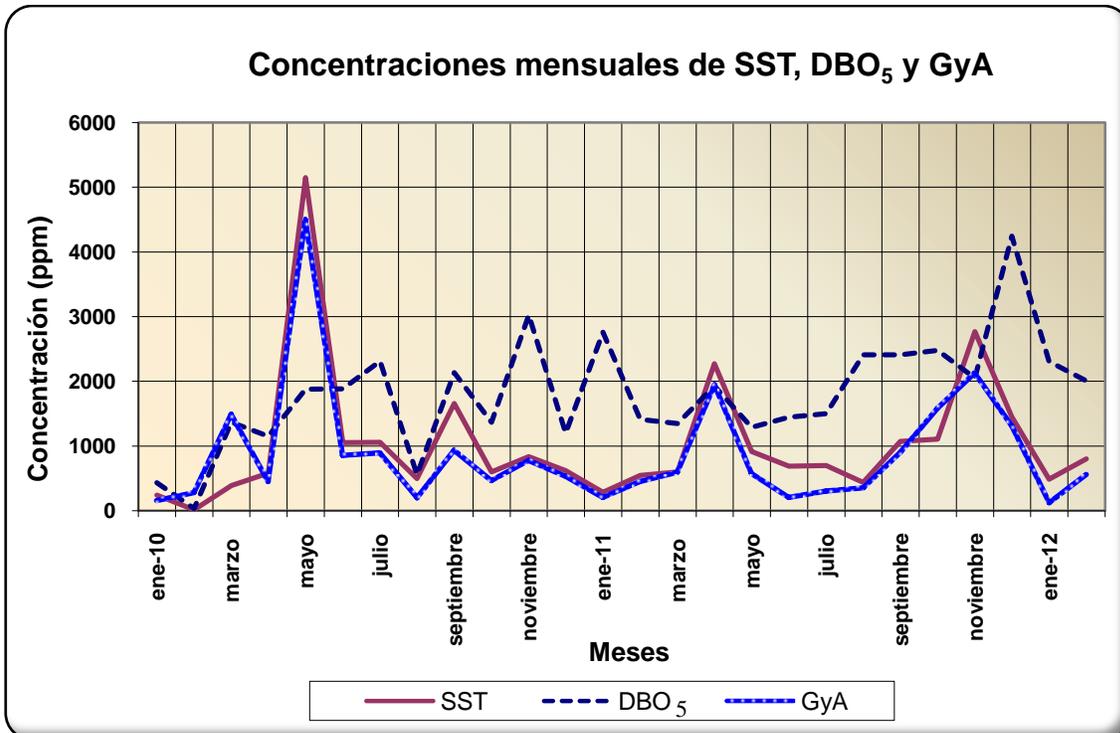


Fig. 2 - Concentración de SST, DBO₅ y GyA en la empresa en el período comprendido de enero de 2010 a enero de 2012.

2.1.2 Influencia del agua residual industrial en el agua residual municipal

En la industria es bien sabido que se manejan grandes cantidades de sustancias químicas, muchas de las cuales presentan riesgos a la salud, riesgo de inflamabilidad, riesgo de reactividad y riesgos combinados que se conocen como riesgos especiales. Algunas sustancias simplemente no presentan ningún riesgo o fungen como inertes en determinadas reacciones. Sin embargo, la mezcla de dichas sustancias en las aguas residuales de las

empresas puede ocasionar grandes o pequeños estragos en sus instalaciones dependiendo de su manejo y tratamiento. El hecho de que causen daños menores en sus instalaciones, no garantiza que en el momento que dicha descarga llega a las aguas residuales municipales, no provocará consecuencia alguna. Inclusive, es bien sabido que generalmente afecta flora y fauna a los alrededores de los canales de aguas municipales (de ser el caso), o puede afectar el propio sistema de drenaje al producir explosiones, desprender vapores inflamables, contener fluidos corrosivos, etc.

Las grasas, la cal, el cabello y las fibras se adhieren a los ductos de alcantarillado y los obstruyen; los ácidos en general y el ácido sulfhídrico en particular destruyen el cemento y los metales; los residuos calientes estrellan los ductos de barro y mampostería; los productos químicos venenosos destruyen el tratamiento biológico, matan la vida acuática útil y hacen peligrosos los abastecimientos de agua; los líquidos inflamables o explosivos ponen en peligro las estructuras por las que fluyen; los vapores o gases tóxicos son peligrosos para los obreros y operadores de las obras de alcantarillado ^[4].

2.1.2.1 Fuentes principales de aguas residuales

Existen cuatro fuentes principales de aguas residuales ^[18]:

1. Aguas urbanas o domésticas,
2. Aguas residuales industriales,
3. Esguerrimientos de usos agrícolas y,
4. Aguas pluviales.

Aun cuando la mayor cantidad de contaminantes provienen de las aguas domésticas o urbanas y de las aguas residuales industriales; es de gran importancia reconocer que los esguerrimientos de usos agrícolas arrastran consigo cantidades considerables de agentes contaminantes del agua como lo son los pesticidas y fertilizantes. Además, las aguas pluviales no sólo añaden volumen al mezclarse con las aguas residuales sino que también, arrastran cantidad de contaminantes localizados en los exteriores de los objetos con los que entran en contacto ^[18].

2.1.2.2 Efectos de la contaminación del agua en el medio ambiente

La naturaleza se encuentra provista con mecanismos capaces de autodepurar el valioso líquido que es el agua, una vez que ha sido contaminado. Sin embargo, no es suficiente para obtener buena calidad del agua. Anteriormente se creía que la gran cantidad de agua existente en el planeta era capaz de disolver los contaminantes que producía y tiraba el hombre. Este pensamiento fue cambiando con el paso del tiempo a la par que el crecimiento poblacional se disparó y se observó que la contaminación persistía en los cuerpos receptores de estas aguas.

El oxígeno es uno de los componentes que se hayan disueltos en el agua de lluvia. Ésta, al caer y formar parte de lo que se conoce como ciclo del agua, provee de oxígeno a las aguas superficiales como lo son ríos, lagos, océanos y aguas embalsadas. Existen especies vivas que necesitan altas cantidades de **oxígeno disuelto** (OD), tales como las especies acuáticas de aguas frías, las cuales al no obtenerlo se asfixian y se desplazan hacia otra área del río donde los recursos en oxígeno disuelto son superiores ^[18].

La **Demanda Bioquímica de Oxígeno** (DBO) es el parámetro que mide la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación de materia orgánica, por acción bioquímica aeróbica de los organismos presentes en una muestra de agua. La DBO es baja aguas arriba donde el agua aún no ha sido contaminada, debido a que no hay materia orgánica presente para consumir oxígeno. La DBO aumenta demasiado en el punto de descarga, y va disminuyendo gradualmente aguas abajo a partir del momento de la descarga a medida que la materia orgánica se va oxidando hasta alcanzar de nuevo la concentración original antes de la descarga. Éste es el punto donde se puede decir que el vertido se encuentra estabilizado. Este proceso se logra en aproximadamente 160 km aguas abajo del punto de la descarga como se muestra en la Fig. 3 ^[18].

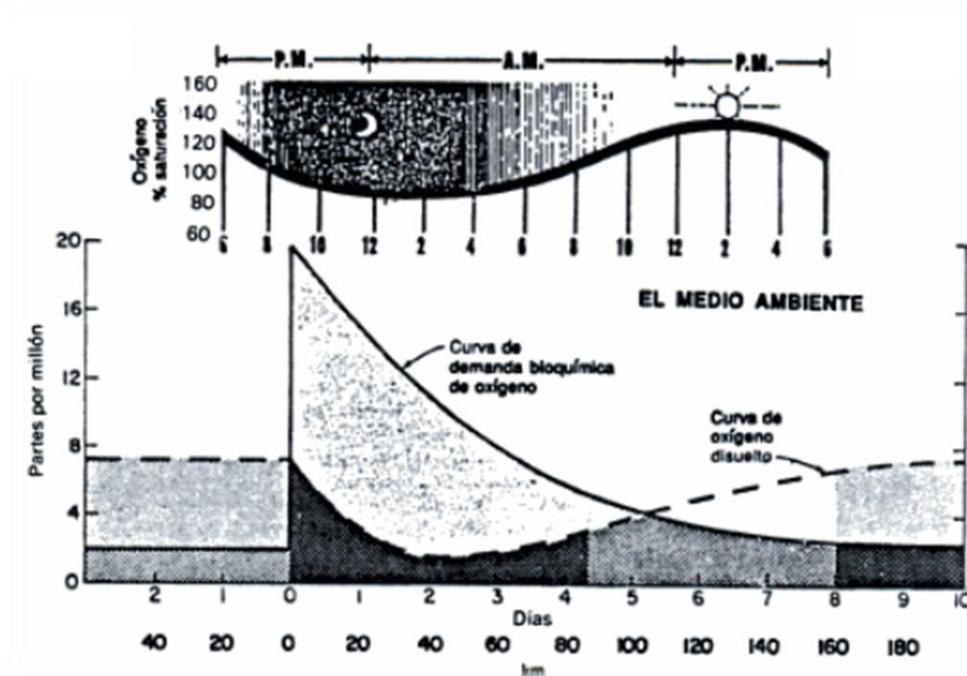


Fig. 3 - Curvas de oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno ^[18].

Las grasas y aceites son sustancias que tienden a flotar sobre la superficie del agua, limitando la transferencia de oxígeno, intervienen en el uso recreativo de zonas de baño, y producen impacto visual, haciendo de los cursos de agua un medio antiestético ^[6].

Las aguas residuales deben tener un pH entre 6 y 9 para que provoquen un mínimo impacto ambiental. Las aguas residuales con valores de pH inferiores a 6 tenderán a ser corrosivas por el exceso de iones de hidrógeno. Por otra parte, las aguas con pH superior a 9 tenderán a ser incrustantes, causando problemas de depósito debido a la precipitación de los iones metálicos como carbonatos o como hidróxidos ^[6].

CAPITULO 3.- MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Introducción

El trabajo de investigación se realizó en tres laboratorios, ya que las condiciones laborales de las instituciones con las que se trabajó, así lo permitieron, primero en la empresa de donde se obtuvo la muestra de agua residual, pero ésta no cuenta con todos los equipos necesarios, como el equipo para prueba de jarras, luego en la FIQ, pero el cierre de las instalaciones, no permitió seguir en tiempo y forma, finalmente se siguió en el OOPAS, pero el costo de las pruebas, no permitió tener un rango muy amplio de las mismas. Lo anterior trajo como consecuencia, el que se midieran diferentes parámetros, en los diferentes laboratorios, a pesar de los cambios, que se tuvieron, por causas ajenas a los investigadores, se lograron tener resultados aceptables para concluir con la hipótesis.

En la clarificación del agua, se requiere adicionar un coagulante cuando se tienen sólidos suspendidos, mismos que crean un problema para satisfacer las características del agua requerida en producción, o bien, para cumplir las NOM's a la salida del proceso, es entonces que es necesario un floculante para acelerar la velocidad del asentamiento, de las partículas.

Se emplea una prueba de laboratorio para seleccionar el mejor producto químico y aproximarse a la dosis requerida para la clarificación: esta prueba se conoce como la prueba de jarras. La prueba de jarras simula los tipos de mezclado y las condiciones de asentamiento que se encuentran en una planta clarificadora. Los resultados de la clarificación son sensibles a la dosificación del producto químico, a la energía y a la duración del mezclado. Generalmente se procede a realizar cuatro pasos en la prueba de jarras:

1) Una cantidad de coagulante se introduce con un alto grado de mezclado en una muestra de agua turbia para eliminar la neblina coloidal;

2) Luego de adicionar el coagulante, la partícula crece debido a la neutralización de la carga y entonces debe añadirse más coagulante o un floculante de peso molecular elevado según se vaya aclarando;

3) Luego de la floculación, la cual se lleva a cabo con una velocidad baja de agitación, se examina la muestra después de un intervalo de tiempo establecido. Se hace a una velocidad baja para promover las colisiones entre partículas y evitar que se redisuelvan los flóculos;

4) Finalmente, después de 5 a 10 minutos se deja asentar la muestra y se procede a analizar la muestra clarificada.

3.2 Materiales, equipo y reactivos utilizados.

En la tabla 2, se muestran los materiales, equipo y reactivos utilizados en el laboratorio de la empresa de ácidos grasos, en el laboratorio de Análisis Instrumental de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) y en el laboratorio del Organismo Operador de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento (OOAPAS):

Tabla 3 - Materiales, equipo y reactivos utilizados.

LABORATORIO	MATERIALES	EQUIPO	REACTIVOS UTILIZADOS
Empresa de ácidos grasos	<ul style="list-style-type: none"> • 4 vasos de precipitados de 500 ml • 2 agitadores magnéticos • Papel filtro 	<ul style="list-style-type: none"> • Parrilla eléctrica con agitación • Potenciómetro 	<ul style="list-style-type: none"> • Cal apagada o “cal MURO” (hidróxido de calcio) • Sulfato de Aluminio granular • Carbón activado en polvo
FIQ	<ul style="list-style-type: none"> • 6 vasos de precipitados de 1000 ml • Papel filtro 	<ul style="list-style-type: none"> • Equipo de prueba de jarras de 6 propelas • Multiparamétrico • Espectrofotómetro • Equipo Soxhlet • Destilador simple 	<ul style="list-style-type: none"> • Cal apagada o “cal MURO” (hidróxido de calcio) • Sulfato de Aluminio disuelto
OOAPAS	<ul style="list-style-type: none"> • 4 jarras de 2000 ml • Papel filtro • Tiras indicadoras de pH 	<ul style="list-style-type: none"> • Equipo de jarras de 4 propelas • Equipo Soxhlet • Conductímetro 	<ul style="list-style-type: none"> • Cal apagada o “cal MURO” (hidróxido de calcio) • Cloro (hipoclorito de sodio) • Polímero aniónico (MagnaFloc LT30) • Sulfato de Aluminio

3.3 Metodología general

La determinación de los parámetros problema de interés se realizaron en tres laboratorios: 1) En la empresa de ácidos grasos, 2) En la U.M.S.N.H., laboratorio de Análisis Instrumental de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) y, 3) En el OOAPAS.

Se llevaron a cabo distintas pruebas exploratorias, éstas con el fin de tener un panorama cercano a los valores óptimos de aditivos añadidos. Estas pruebas son realizadas en laboratorio con equipo de jarras y, en su caso, con vaso de precipitados con sistema de agitación magnética y en ellas se aproximan cantidades de reactivos para la obtención del valor óptimo de éstos. Finalmente, se realizaron pruebas finales las cuales son el reflejo de las pruebas de laboratorio en una planta piloto. Además, se realizaron 4 pruebas más, luego de no obtener cumplimiento de la normatividad correspondiente en los parámetros pH y DBO₅ con la planta piloto.

La metodología general utilizada en las pruebas exploratorias fue la prueba de jarras, la cual consiste en lo siguiente:

1. Colocar una cantidad conocida de muestra de agua residual tomada de la descarga de efluentes en la empresa de ácidos grasos (500 ml, 1000 ml o 2000 ml) en cada uno de los vasos del equipo de jarras o en su caso un sistema agitado por medio de un agitador magnético. (Se usó vaso de precipitado con agitador magnético en la empresa de ácidos grasos y equipo de jarras en la FIQ y en el OOAPAS).
2. Se determina el pH inicial y se agrega coagulante a diferentes dosis observando que el pH no sufra cambios grandes al de la muestra original.
3. Después de la adición del coagulante se realiza un mezclado rápido por 3 min hasta que el flóculo formado sea visible y se agrega el floculante.
4. Posteriormente, se realiza un mezclado lento por 10 minutos para la floculación y se observa cómo va creciendo el flóculo.
5. Por último, se deja sedimentar la muestra hasta que aclare.
6. Se determina el pH final de la muestra aclarada y filtrada.

3.4 Parámetros a medir

Los parámetros medidos de acuerdo a las posibilidades de cada laboratorio se muestran en la Tabla 4:

Tabla 4 - Parámetros medidos.

PARÁMETRO MEDIDO	UBICACIÓN
pH	Empresa de ácidos grasos, FIQ y OOAPAS
Conductividad eléctrica	Empresa de ácidos grasos, FIQ y OOAPAS
Grasas y aceites	FIQ y OOAPAS
DBO ₅	FIQ y OOAPAS
Sólidos suspendidos totales	FIQ y OOAPAS

3.5 Pruebas

Dentro de las pruebas realizadas, se hicieron pruebas exploratorias y pruebas finales. Con las pruebas exploratorias se encontró el funcionamiento de cada aditivo y además se estimó la cantidad de coagulante y floculante a utilizar.

En las pruebas finales, se afinaron estas cantidades y se llegó al tren de tratamiento final en el cual se demostró ser conveniente para este tipo de empresas.

3.5.1 Pruebas exploratorias

Se realizaron varias pruebas en los tres laboratorios. A continuación se muestran las más representativas:

LABORATORIO 1 - EMPRESA DE ÁCIDOS GRASOS

Metodología:

PRIMERA PRUEBA EXPLORATORIA: CAL + SULFATO DE ALUMINIO

Para desarrollar la primera prueba exploratoria, se realizaron los siguientes pasos:

1. Tomar una muestra de 500 ml de agua residual.
2. Determinar los parámetros pH y conductividad eléctrica.
3. Pesar 1.50 g de cal apagada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), adicionarlos a la muestra de agua residual y agitar rápido durante 2 min.
4. Pesar 0.25 g de sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), adicionarlos a la muestra y dar una agitación rápida durante 5 min.
5. Agitar lentamente durante 2 min.
6. Esperar 5 min para la sedimentación.
7. Filtrar la parte que se aclara.

SEGUNDA PRUEBA EXPLORATORIA: CAL + CARBÓN ACTIVADO (CAP) + SULFATO DE ALUMINIO

1. Tomar una muestra de 500 ml de agua residual.
2. Determinar los parámetros pH y conductividad eléctrica.
3. Pesar 1.5 g de cal apagada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), adicionarlos a la muestra de agua residual y agitar rápido durante 2 min.

4. Pesar 0.3750 g de carbón activado en polvo (CAP), adicionarlos a la misma muestra y agitar rápido durante 2 min.
5. Pesar 0.25 g de sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), adicionarlos a la muestra y dar agitación rápida durante 5 min.
6. Agitar lentamente durante 2 min.
7. Esperar 5 min para la sedimentación.
8. Filtrar la parte que se aclara.

LABORATORIO 2 – FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

Metodología:

TERCERA PRUEBA EXPLORATORIA: CAL + SULFATO DE ALUMINIO

1. Tomar una muestra de 1000 ml de agua residual para cada jarra.
2. Determinar los parámetros pH y conductividad eléctrica.
3. Pesar 3.00 g de cal apagada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), adicionarlos a cada jarra y agitar rápido durante 6 min (a 130 rpm).
4. Agregar las cantidades de sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) de acuerdo a la Tabla 5, dar una agitación rápida durante 6 min (a 130 rpm).
5. Agitar lentamente durante 10 min (a 5 rpm).
6. Esperar 5 min para la sedimentación.
7. Hacer prueba de grasas y aceites de una muestra sin filtrar de cada jarra.

Tabla 5 - Dosis añadida de reactivos, conductividad eléctrica y pH finales de la tercera prueba exploratoria.

Jarra	Ca(OH) ₂ (g)	Al ₂ (SO ₄) ₃ (ppm)	C. E. (mS/m)	pH (U)
0	-----	Agua cruda	150.2	3.78
1	3	28.5	381.6	11.35
2	3	57	389.4	11.38
3	3	114	378.9	11.32
4	3	171	346.0	10.95
5	3	-----	390.6	11.40
6	3	-----	361.1	11.18

CUARTA PRUEBA EXPLORATORIA: CAL + SULFATO DE ALUMINIO

1. Tomar una muestra de 1000 ml de agua residual para cada jarra.
2. Determinar el parámetro pH.
3. Agregar las cantidades de cal apagada (Ca(OH)₂), de acuerdo a la Tabla 6, agitar rápido durante 6 min (a 130 rpm).
4. Agregar las cantidades de sulfato de aluminio (Al₂(SO₄)₃) de acuerdo a la Tabla 6, dar una agitación rápida durante 6 min (a 130 rpm).
5. Agitar lentamente durante 10 min (a 5rpm).
6. Esperar 5 min para la sedimentación.
7. Hacer prueba de grasas y aceites de una muestra sin filtrar de cada jarra.

Tabla 6 - Dosis añadida de reactivos y resultado de pH final en la cuarta prueba exploratoria.

Jarra	Ca(OH) ₂ (g)	Al ₂ (SO ₄) ₃ (ppm)	pH (U)
0	-----	Agua cruda	3.84
1	3	114	11.56
2	3	228	11.48
3	3	342	11.42
4	2	-----	7
5	4	-----	11.72
6	5	-----	11.83

LABORATORIO 3 – OOAPAS (ORGANISMO OPERADOR DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO)

Metodología:

QUINTA PRUEBA EXPLORATORIA: HIPOCLORITO DE SODIO + CAL + POLÍMERO ANIÓNICO

1. Tomar una muestra de 2000 ml de agua residual para cada jarra.
2. Determinar el parámetro pH.
3. Agregar las cantidades de hipoclorito de sodio (NaClO) al 13%, de acuerdo a la Tabla 7, dejar reposar sin agitación durante 3 min.

4. Agregar las cantidades de cal apagada (Ca(OH)_2), de acuerdo a la Tabla 7, agitar rápido durante 3 min (a 200 rpm).
5. Agregar las cantidades de polímero aniónico MagnaFloc LT30 de acuerdo a la Tabla 7, dar una agitación rápida durante 3 min (a 175 rpm).
6. Agitar lentamente durante 10 min (a 35rpm).
7. Esperar 5 min para la sedimentación.
8. Hacer prueba de grasas y aceites de una muestra sin filtrar de cada jarra.

NOTA: El polímero aniónico debe prepararse previamente disolviendo 1 g de éste en 1000 ml de agua, posteriormente se agrega a las jarras las alícuotas de la Tabla 7.

Tabla 7 - Dosis añadida de reactivos, resultados de conductividad eléctrica y pH final de la quinta prueba exploratoria.

Jarra	NaClO (ml)	Ca(OH)_2 (g)	Polímero Aniónico (ml)	C. E. (mS/m)	pH (U)
0	-----	Agua cruda		160.0	4
1	10	6	-----	643.0	12
2	40	6	9	118.2	10
3	7.5	5	3	-----	11
4	7	4	4	-----	12
5	2	4	3	253.0	10

3.5.2 Pruebas finales

Con los resultados de las pruebas exploratorias, se procedió a realizar pruebas finales, con el propósito de obtener los resultados concluyentes.

EMPRESA DE ÁCIDOS GRASOS, PRUEBAS PILOTO:

PRUEBA FINAL 1

Una de las principales observaciones fue que al agregar la cal al agua residual y mantenerla en agitación rápida, seguida de agitación lenta; se producen flóculos que por el simple hecho de chocar unas partículas con otras, crecen a un tamaño tal que se pueden retener fácilmente en las mallas que, son el medio filtrante en este caso, y así lograr la reducción de SST, GyA y DBO₅. Por este motivo se procedió a realizar esta prueba a fin de observar el resultado.

En esta prueba se utilizó un filtro prensa, el cual está provisto de placas y marcos. Para poder filtrar en este sistema, es necesario hacer una precapa de carbón activado que en este caso se utiliza en polvo. El procedimiento para formar la precapa fue el siguiente:

1. Llenar el tanque con agua limpia a 100 l.
2. Agregar 300 g de carbón activado en polvo.
3. Recircular durante 10 min.
4. Vaciar el tanque.

NOTA: Se utilizan 3g/l de carbón activado puesto que se pretende reutilizar el medio filtrante tantas veces como sea posible o al menos 4 veces seguidas.

Procedimiento para tratar el agua residual:

1. Llenar el tanque a 400 l con agua residual.
2. Determinar los parámetros pH y conductividad eléctrica iniciales.
3. Pesar 1.2 kg de cal apagada (Ca(OH)₂) (3.0 g/l), adicionarlos a la muestra de agua residual y agitar rápido durante 10 min hasta disolver.
4. Agitar lentamente durante 10 min.
5. Filtrar con filtro prensa.

PRUEBA FINAL 2

Una vez analizada la opción de agregar únicamente cal como coagulante y floculante, se hizo una segunda prueba con cal + sulfato de aluminio a fin de comparar ambos tratamientos.

En esta prueba se volvió a utilizar el filtro prensa. El procedimiento para formar la precapa es el siguiente:

1. Llenar el tanque con agua limpia a 100 l.
2. Agregar 300 g de carbón activado en polvo.
3. Recircular durante 10 min.
4. Pasar la mezcla a través del filtro prensa hasta que el agua recirculada quede completamente limpia de nuevo.
5. Vaciar el tanque.

Procedimiento para tratar el agua residual:

1. Llenar el tanque a 400 l con agua residual.
2. Determinar los parámetros pH y conductividad eléctrica iniciales.
3. Pesar 1.2 kg de cal apagada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (3.0 g/l), adicionarlos a la muestra de agua residual y agitar rápido durante 10 min hasta disolver.
4. Pesar 200 g de sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) (0.5g/l), adicionarlos a la muestra de agua residual y agitar rápido durante 10 min hasta disolver.
5. Agitar lentamente durante 10 min.
6. Filtrar con filtro prensa.

OOAPAS, PRUEBAS ELEGIDAS:

PRUEBA FINAL 3

Debido a que las pruebas realizadas en la planta piloto no cumplen con los LMP en pH y DBO₅, se procedió a realizar 4 pruebas más finas en laboratorio utilizando 2 reactivos diferentes, conservando el hidróxido de calcio como reactivo.

Metodología

1. Tomar una muestra de 1000 ml de agua residual para cada jarra.
2. Determinar el parámetro pH.
3. Agregar las cantidades de hipoclorito de sodio (NaClO) al 13%, de acuerdo a la Tabla 8, dejar reposar sin agitación durante 3 min.
4. Agregar las cantidades de cal apagada (Ca(OH)₂), de acuerdo a la Tabla 8, agitar rápido durante 3 min (a 200 rpm).
5. Agregar las cantidades de polímero aniónico MagnaFloc LT30 de acuerdo a la Tabla 8, dar una agitación rápida durante 3 min (a 175 rpm).
6. Agitar lentamente durante 10 min (a 35rpm).
7. Esperar 5 min para la sedimentación.
8. Hacer prueba de grasas y aceites de una muestra sin filtrar de cada jarra.

NOTA: El polímero aniónico debe prepararse previamente disolviendo 1 g de éste en 1000 ml de agua, posteriormente se agregan a las jarras las alícuotas de la Tabla 8.

Tabla 8 - Prueba final 3. Dosis añadida de reactivos y resultados de pH final de la tercera prueba final.

Jarra	NaClO (ml)	Ca(OH) ₂ (g)	Polímero Aniónico (ml)	Sulfato de Aluminio (g)	pH (U)
0	-----	Agua cruda			4.5
1	2	4	3	-----	10
2	1	3	3	-----	6
3	-----	3	-----	1	5.5

CAPITULO 4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados de la caracterización del agua residual industrial

El agua residual de la empresa de Ácidos Grasos se encuentra contaminada con altas concentraciones de grasas y aceites, en la investigación efectuada, ésta aumenta los niveles de DBO₅ y DQO a rangos que van desde 1300 hasta 4000 ppm. Ocasionalmente, el pH queda dentro de norma en el límite mínimo permisible (5.5), pero es más común encontrar valores fuera de la norma entre 4 y 5 unidades. La conductividad eléctrica se encuentra en un rango de 1400 a 1700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que es aproximadamente el doble del valor que posee el agua de pozo. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9 - Caracterización del agua residual industrial.

PARÁMETROS MEDIDOS	PROMEDIO MENSUAL	LMP
pH (U)	4.8	5.5 a 10
C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1 854. 40	N/A
G y A (mg/l)	511.68	50
DBO₅ (mg/l)	2 382.75	150
DQO (mg/l)	11 070.00	N/A
SST (mg/l)	804.47	100

4.2 Resultados de las pruebas exploratorias

PRIMER PRUEBA EXPLORATORIA: CAL + SULFATO DE ALUMINIO

De la Tabla 10, se deduce que al agregar cal apagada (hidróxido de calcio), aumenta el pH entre 2 y 3 unidades, desestabiliza la suspensión coloidal y aumenta la conductividad eléctrica al doble. El pH queda cerca del límite máximo permisible sin llegar a superarlo.

Tabla 10 - Resultados de la primera prueba exploratoria.

Parámetro medido	Inicial	Final
pH (unidades)	4.47	9.25
Conductividad eléctrica (mS/m)	170	340

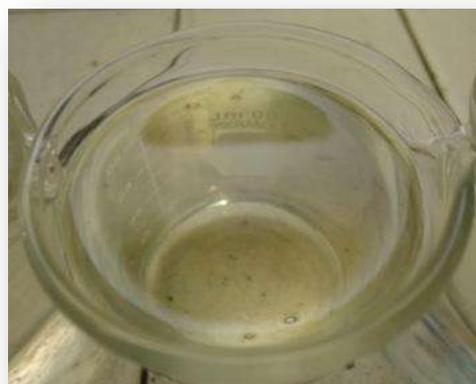


Fig. 4 - Primera prueba exploratoria. Prueba con cal + sulfato de aluminio una vez filtrada.

Observaciones:

- Al agregar el sulfato de aluminio, se forman pequeños flóculos que no crecen mucho y posteriormente sedimentan.
- El filtrado queda sin capa de grasa en la superficie y el color es amarillo – transparente.
- Queda libre de sólidos suspendidos.

SEGUNDA PRUEBA EXPLORATORIA: CAL + SULFATO DE ALUMINIO + CARBÓN ACTIVADO

De la Tabla 11, se observa que dado el carácter ligeramente ácido del carbón activado, el pH disminuye cerca de una unidad con respecto a la primera prueba. La conductividad sigue cerca del doble de la inicial. Es la muestra más clara de ese período de pruebas, disminuye el color amarillento.

Tabla 11 - Resultados de conductividad eléctrica y pH de la segunda prueba exploratoria.

Parámetro medido	Inicial	Final
pH (unidades)	4.45	8.45
Conductividad eléctrica (mS/m)	175	335



Fig. 5 - Segunda prueba exploratoria. Prueba con cal + carbón activado + sulfato de aluminio una vez filtrada.

Observaciones:

- Al agregar el sulfato, comienzan a formarse flóculos de tamaño medio que después sedimentan.
- Forma espuma.
- El filtrado queda sin capa de grasa en la superficie y el color es amarillo muy claro – transparente. Es la más transparente de todas las muestras.
- Queda libre de sólidos suspendidos.
- Además, se observa que el sulfato de aluminio disminuye la cantidad de grasa, las muestras quedan sin capa de grasa en la superficie. El carbón activado disminuye la cantidad de color y olor.

TERCERA PRUEBA EXPLORATORIA: CAL + SULFATO DE ALUMINIO

De la Tabla 5, se observa que la cantidad de sulfato de aluminio no afecta el valor de la conductividad eléctrica y el pH también se mantiene constante con lo cual se deduce que se puede disminuir aún más este reactivo.

Además en la Tabla 12, se observa que la presencia del sulfato de aluminio sí remueve grasas y aceites, además tenemos que a 28.5, 57 y 171 ppm de sulfato de aluminio se tienen cantidades similares de grasas y aceites lo cual quiere decir que la remoción es muy similar a estas concentraciones. Se observa además, que la ausencia de sulfato de aluminio en la jarra 5, remueve menos grasas y aceites que en presencia de éste.

Cabe señalar que por cuestiones técnicas, la destilación de las muestras para grasas y aceites se vieron afectadas al no conseguir evaporar la mayor cantidad de agua posible, es decir, los resultados muestran la cantidad de grasas y aceites más una cantidad de agua.

Tabla 12 - Resultados de prueba de grasas y aceites de la tercera prueba exploratoria.

Jarra	Al ₂ (SO ₄) ₃ (ppm)	Vol. Filtrado (ml)	Peso de grasas (g)	Grasas y aceites (ppm)
1	28.5	400	0.0388	97
2	57	400	0.0354	88.5
3	114	400	0.0576	144
4	171	370	0.0309	83.51
5	-----	400	0.0976	244

CUARTA PRUEBA EXPLORATORIA: CAL + SULFATO DE ALUMINIO

De la Tabla 6, verificamos que para cantidades iguales y arriba de 3g de cal apagada (hidróxido de calcio), el pH aumenta cerca de 6 unidades con respecto al agua cruda. Además, se observa que la presencia del sulfato de aluminio disminuye ligeramente el pH.

De la Tabla 13, observamos buena remoción de grasas y aceites en todas las muestras. Todas quedan dentro del LMP en grasas y aceites.

Tabla 13 - Resultados de prueba de grasas y aceites de la cuarta prueba exploratoria.

Jarra	Al ₂ (SO ₄) ₃ (ppm)	CaO (g)	Vol. Filtrado (ml)	Peso de grasas (g)	Grasas y aceites (ppm)
1	114	3	400	0.0032	8
2	228	3	400	0.0045	11.25
3	342	3	400	0.0035	8.75
5	-----	4	400	0.0048	12
6	-----	5	400	0.0135	33.75

QUINTA PRUEBA EXPLORATORIA: HIPOCLORITO DE SODIO + CAL + POLÍMERO ANIÓNICO

De la Tabla 7, observamos el aumento en conductividad eléctrica al agregar sólo hipoclorito de sodio y cal; la cual se reduce significativamente al agregar altas concentraciones de polímero aniónico. Aparentemente, la mejor combinación a simple vista es baja concentración de hipoclorito de sodio, cal y polímero aniónico para lograr un pH en el LMP. Altas concentraciones de hipoclorito de sodio y cal elevan demasiado el pH. En la Fig. 6, se observa cómo aclara cada prueba con su respectivo tratamiento.

Tabla 14 - Quinta prueba exploratoria. Resultados de grasas y aceites, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y sólidos suspendidos totales en el laboratorio del OOAPAS.

PARÁMETROS MEDIDOS	AGUA CRUDA	JARRA 1	JARRA 2	JARRA 3	JARRA 4	JARRA 5
G y A (mg/l)	373.85	-----	-----	-----	-----	-----
DBO ₅ (mg/l)	1 450.00	89.10	110.00	111.80	96.00	99.80
DQO (mg/l)	17 544.80	8 856.00	9 517.00	7 084.00	7 347.00	6 560.00
SST (mg/l)	610.52	24.00	30.00	10.00	18.00	16.00

Jarra 1

Jarra 2

Jarra 3

Jarra 4

Jarra 5

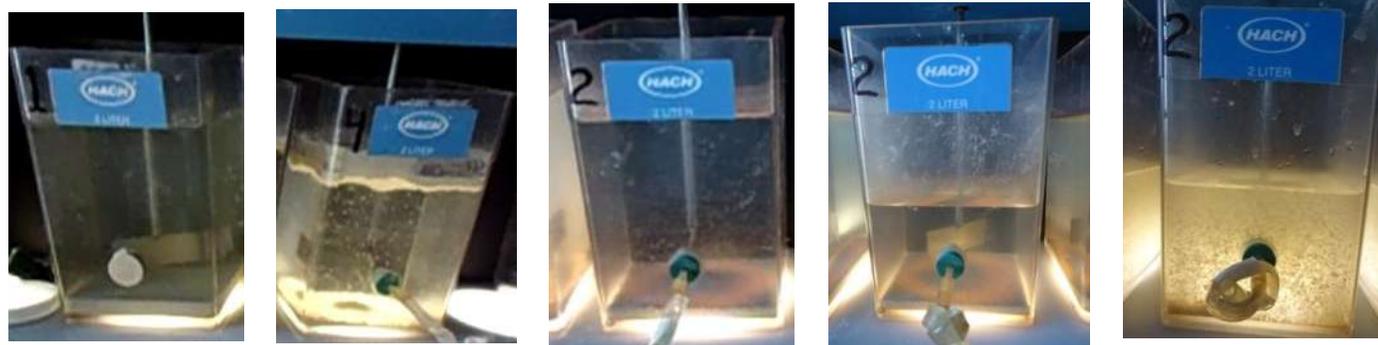


Fig. 6 - Quinta prueba exploratoria. Pruebas con hipoclorito de sodio + cal + polímero aniónico una vez filtradas.

Se observa en la Tabla 14 que la DBO₅ queda dentro del LMP aunque cabe señalar que estas 5 muestras fueron previamente filtradas con papel filtro y posteriormente se realizaron los análisis de los parámetros mencionados. Se remueve entre el 96 y 98% de sólidos suspendidos totales. Las grasas y aceites no fueron analizadas ya que las muestras no mostraron rastro de éstos.

4.3 Resultados de las pruebas finales

En base a los resultados de las cinco pruebas exploratorias, se llevaron a cabo las tres pruebas finales.

PRUEBA FINAL 1

Aumentando la cantidad de cal se logra una buena floculación. Sin embargo, al usar únicamente cal se obstruye rápidamente el medio filtrante ocasionando un filtrado lento. Además, la conductividad eléctrica aumenta considerablemente lo que significa que se encuentran sales en forma iónica los cuales para fines de reutilización del agua, no son convenientes. Los parámetros de interés lograron ser controlados a excepción del pH el cual requiere de ajuste con un medio ácido y la DBO₅ la cual fue removida en un 90% de acuerdo a la Tabla 15.

A continuación se muestran los resultados de los distintos parámetros en las Tablas 15 y 16:

Tabla 15 - Prueba final 1. Resultados de pH y conductividad eléctrica en la empresa de ácidos grasos.

PARÁMETROS MEDIDOS	Inicial	Después de filtrar
pH (U)	4.64	10.90
C.E. (mS/cm)	4.17	5.07

Tabla 16 - Prueba final 1. Resultados de grasas y aceites, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos totales, pH y conductividad eléctrica del laboratorio acreditado (CEMA).

PARÁMETROS MEDIDOS	AGUA CRUDA	AGUA TRATADA
G y A (mg/l)	176.22	9.08
DBO ₅ (mg/l)	2253.3	236
SST (mg/l)	275	<5.5
pH	4.142	11.6
C.E. (μS/cm)	2812.33	5690

En la Fig. 7, se observa el radical cambio entre el agua cruda que contiene una suspensión coloidal, sólidos suspendidos y un color crema; y el agua una vez tratada, la cual se aclara por completo, presenta una mejor apariencia y sin embargo, los análisis de los parámetros problema nos demuestran que la DBO₅ se reduce, pero aun así no cumple con la norma, al igual que en pH el cual queda arriba del LMP.



Fig. 7 - Prueba final 1. Comparación de agua cruda (a la izquierda de la foto) y agua tratada (a la derecha de la foto).

PRUEBA FINAL 2

En esta prueba se mejora la floculación y además, el medio filtrante no se obstruye tan rápido. La conductividad baja y el pH también se ve favorecido. El pH queda ligeramente arriba del LMP, requiere ajuste con medio ácido. La DBO₅ se remueve nuevamente en un 90%. Con este tratamiento la remoción de las grasas y aceites se ve favorecida y la conductividad se encuentra aproximadamente al doble que la del agua cruda, sin embargo, resulta mejor que el tratamiento únicamente con cal puesto que mejora la remoción de los contaminantes, evita la obstrucción inmediata del material filtrante y disminuye la conductividad eléctrica.

A continuación se muestran los resultados de los distintos parámetros en las Tablas 17 y 18:

Tabla 17 - Prueba final 2. Resultados de pH y conductividad eléctrica en la empresa de ácidos grasos.

PARÁMETRO MEDIDOS	Inicial	Después de filtrar
pH	4.77	9.60
C.E. (mS/cm)	4.14	3.60

Tabla 18 - Prueba final 2. Resultados de grasas y aceites, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos totales, pH y conductividad eléctrica.

PARÁMETROS MEDIDOS	AGUA CRUDA	AGUA TRATADA
G y A (mg/l)	227.94	6.62
DBO ₅ (mg/l)	2488.5	254.1
SST (mg/l)	480	<5.5
pH	4.025	10.4
C.E. (μS/cm)	1875.33	3873

En la Fig. 8, se observa que una vez tratada el agua cruda, el filtrado se vuelve transparente y amarillento. Sin embargo, la remoción de GyA y de SST se ve favorecida; mientras que la DBO_5 y el pH siguen quedando por encima del LMP aunque muy cercano en cuanto a pH.



Fig. 8 - Prueba final 2. Comparación de agua cruda (a la izquierda de la foto) y agua tratada (a la derecha de la foto).

PRUEBA FINAL 3

Con esta prueba se demuestra que es necesaria la filtración para detener cualquier rastro de sólidos suspendidos y de grasas y aceites. La DBO_5 se remueve entre el 64 y 66% de acuerdo a la Tabla 19. El pH requiere ajuste. La conductividad aumenta a menos del doble de la cantidad inicial. El polímero aniónico funciona muy bien aglomerando las partículas y dándoles peso para sedimentar de manera más rápida y así mejorar los tiempos de residencia del tratamiento. El cloro ayuda a degradar materia orgánica, prácticamente elimina por completo coliformes fecales y reduce el color. La cal fue indispensable en cada prueba ya que ayuda a aumentar el pH y mejorar la función de los flocculantes y a desestabilizar la suspensión coloidal.

Tabla 19 - Prueba final 3. Resultados de grasas y aceites, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, sólidos totales, y conductividad eléctrica del laboratorio OOAPAS.

PARÁMETROS MEDIDOS	AGUA CRUDA	JARRA 1	JARRA 3	JARRA 4
G y A (mg/l)	603.2	0.3	2.38	17.88
DBO ₅ (mg/l)	650.0	233.0	227.0	219.0
DQO (mg/l)	29 388.0	29 388.0	32 611	30 715
SST (mg/l)	730.0	62.0	130.0	176.0
ST (mg/l)	14 078.0	20 284	20 348	52 842
C.E. (µS/cm)	1530	2850	2660	2500

4.4 Análisis de resultados para las variables Flujo, Grasas y aceites, DBO₅, pH y Conductividad

4.4.1 Flujo

Específicamente en esta empresa manufacturera de ácidos grasos, se lleva un control de caudal de descarga del agua residual el cual es capturado por el operador de esta área en los formatos correspondientes. Este parámetro es medido y anotado por el operador cada hora utilizando el instrumento de medición aforador Parshall.

En base al caudal a tratar, se diseña el tamaño del sistema de tratamiento. Para ello, se analiza el comportamiento del flujo de descarga y el flujo máximo en el período comprendido de Enero de 2012 a Abril de 2013 en las Figs. 9 y 10, respectivamente.

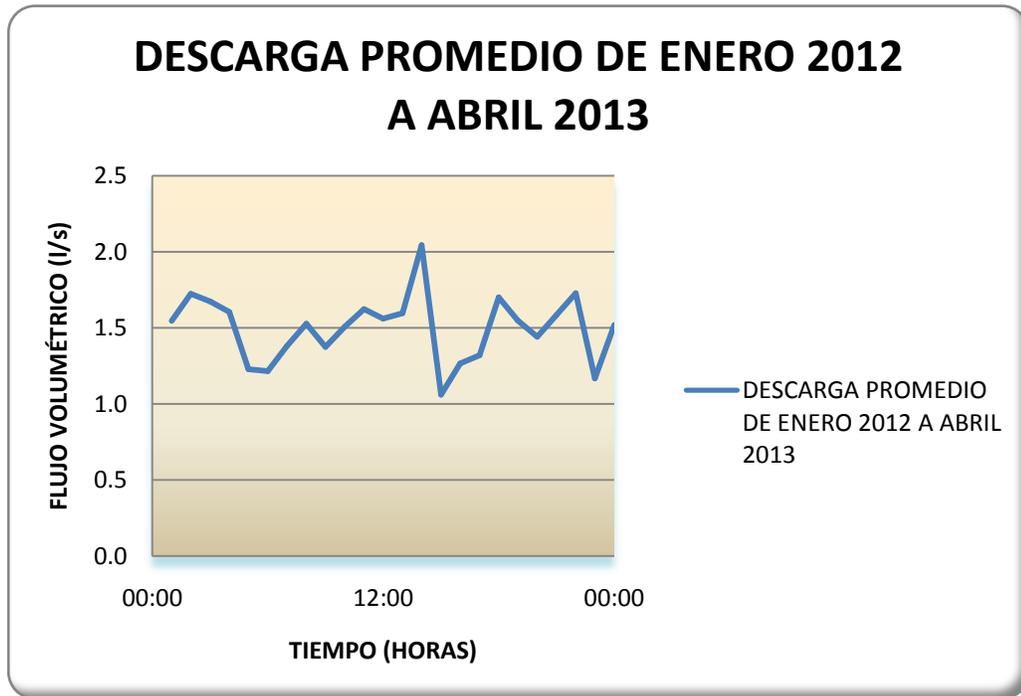


Fig. 9 - Comportamiento de descarga promedio de enero 2012 a abril 2013.

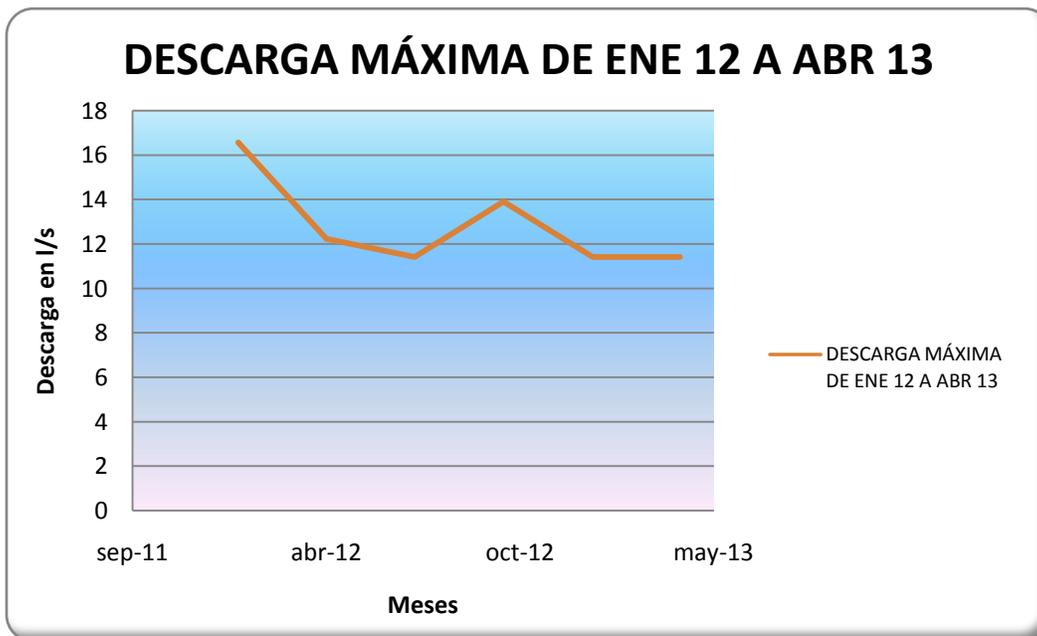


Fig. 10 - Comportamiento de descarga máxima de enero 2012 a abril 2013.

Como se muestra en la Fig. 9, la máxima media es de 3 l/s misma que permanece a lo largo del año, por lo cual se diseñará con este valor.

En base a la Fig. 10, se propone añadir un tanque colchón para absorber los máximos que no son constantes.

4.4.2 Grasas y aceites

A continuación se muestra una tabla comparativa con los porcentajes de remoción logrados para Grasas y aceites con los distintos sistemas de tratamiento de las pruebas finales (Tabla 20):

Tabla 20 - Comparación de resultados del parámetro Grasas y aceites entre tratamientos.

CARACTERÍSTICAS	PRUEBA FINAL 1	PRUEBA FINAL 2	PRUEBA FINAL 3		
			Jarra 1	Jarra 3	Jarra 4
TREN DE TRATAMIENTO	Cal + CAP	Cal + Sulfato de Aluminio+ CAP	Hipoclorito de Sodio + Cal + Polímero aniónico	Hipoclorito de Sodio + Cal + Polímero aniónico	Cal + Sulfato de Aluminio
G y A AGUA RESIDUAL (mg/l)	176.22	227.94	603.2	603.2	603.2
G y A AGUA TRATADA (mg/l)	9.08	6.62	0.3	2.38	17.88
% REMOCIÓN	↓ 94.8	↓ 97.1	↓ 99.9	↓ 99.6	↓ 97.0

NOTA: La flecha ↓ indica que el parámetro presentó una reducción luego del tratamiento.

De la Tabla 20, las pruebas finales 1 y 2 se llevaron a cabo en la planta piloto. La prueba final 3 fue en equipo de jarras. Se analizó la parte clarificada de cada prueba. En todas las pruebas se alcanzó una remoción arriba del 90%, lo que permitió entrar en los LMP de la norma.

4.4.3 DBO₅

A continuación se muestra una tabla comparativa con los porcentajes de remoción logrados para Demanda Bioquímica de Oxígeno con los distintos sistemas de tratamiento de las pruebas finales (Tabla 21):

Tabla 21 - Comparación de resultados del parámetro DBO₅ entre tratamientos.

CARACTERÍSTICAS	PRUEBA FINAL 1	PRUEBA FINAL 2	PRUEBA FINAL 3		
			Jarra 1	Jarra 3	Jarra 4
TREN DE TRATAMIENTO	Cal + CAP	Cal + Sulfato de Aluminio+ CAP	Hipoclorito de Sodio + Cal + Polímero aniónico	Hipoclorito de Sodio + Cal + Polímero aniónico	Cal + Sulfato de Aluminio
DBO ₅ AGUA RESIDUAL (mg/l)	2253.3	2488.5	650.0	650.0	650.0
DBO ₅ AGUA TRATADA (mg/l)	236	254.1	233.0	227.0	219.0
% REMOCIÓN	↓ 89.5	↓ 89.8	↓ 64.1	↓ 65.1	↓ 66.3

NOTA: La flecha ↓ indica que el parámetro presentó una reducción luego del tratamiento.

De la Tabla 21, se observan remociones arriba del 60%. Aun así, no se alcanzó el LMP de la norma (150 mg/l). Se observa que las pruebas 1 y 2 (donde se utilizó filtración) obtienen un porcentaje mayor de remoción de este parámetro.

4.4.4 pH y conductividad

A continuación se muestran dos tablas comparativas, una con los valores reportados para pH y otra con los valores reportados para Conductividad eléctrica con los distintos sistemas de tratamiento de las pruebas finales (Tablas 22 y 23, respectivamente):

Tabla 22 - Comparación de resultados de pH entre tratamientos.

CARACTERÍSTICAS	PRUEBA FINAL 1	PRUEBA FINAL 2	PRUEBA FINAL 3		
			Jarra 1	Jarra 3	Jarra 4
TREN DE TRATAMIENTO	Cal + CAP	Cal + Sulfato de Aluminio+ CAP	Hipoclorito de Sodio + Cal + Polímero aniónico	Hipoclorito de Sodio + Cal + Polímero aniónico	Cal + Sulfato de Aluminio
pH AGUA RESIDUAL (Unidades)	4.142	4.025	4.5	4.5	4.5
pH AGUA TRATADA (Unidades)	11.6	10.4	10	6	5.5
DETERMINACIÓN	↑ LMP	↑ LMP	En el LMP	Dentro del LMP	En el LIP

NOTA: La flecha ↑ indica que el parámetro presentó un aumento luego del tratamiento. LIP (límite inferior permisible).

A pesar de que la Conductividad Eléctrica no se encuentra normada, es un parámetro importante para la empresa ya que una de las ventajas de tratar el agua residual es el reuso de éstas en alguna actividad no especificada en la empresa. Un valor considerable se encuentra entre 700 y 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Tabla 23 - Comparación de resultados de Conductividad eléctrica entre tratamientos.

CARACTERÍSTICAS	PRUEBA FINAL 1	PRUEBA FINAL 2	PRUEBA FINAL 3		
			Jarra 1	Jarra 3	Jarra 4
TREN DE TRATAMIENTO	Cal + CAP	Cal + Sulfato de Aluminio+ CAP	Hipoclorito de Sodio + Cal + Polímero aniónico	Hipoclorito de Sodio + Cal + Polímero aniónico	Cal + Sulfato de Aluminio
C.E. AGUA RESIDUAL ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2812.33	1875.33	1530	1530	1530
C.E. AGUA TRATADA ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	5690	3873	2850	2660	2500
DETERMINACIÓN	↑	↑	↑	↑	↑

NOTA: La flecha ↑ indica que el parámetro presentó un aumento luego del tratamiento.

CAPITULO 5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

La utilización del método de prueba de jarras nos da una idea muy clara del tren de tratamiento a seguir, se observa cómo se comportan los diferentes aditivos, qué forma obtiene el flóculo, la rapidez de aglomeración, el tamaño del flóculo, las velocidades de formación y sedimentación. La variación de la dosis en cada prueba nos acercó más a elección del tren de tratamiento final.

En conclusión se tiene que la combinación de hidróxido de calcio (3g/l) con sulfato de aluminio (0.5 g/l) y filtración con filtro prensa y precapa de carbón activado (3g/l) con reutilización de éste último, es una opción de fácil acceso, rentable y que se puede manipular con la capacitación adecuada. Produce flóculos de buen tamaño que sedimentan a una velocidad considerablemente buena (5-10 min) y luego de la filtración, los parámetros GyA y SST cumplen con los límites máximos permisibles por la normatividad correspondiente. Sin embargo, con este tratamiento la remoción de la DBO₅ no es suficiente para quedar dentro de los LMP pero sí es removida en un alto porcentaje (90%). El pH requiere de ajuste a través de medios ácidos.

Puesto que la prueba final 3 no se realizó en prueba piloto, se sugiere que se lleve a cabo como un trabajo futuro. De las dos opciones que se analizaron en prueba piloto, se elige el tratamiento de cal + sulfato de aluminio ya que fue el que resulta más adecuado para las condiciones de operación del filtro prensa, es decir, permite reutilizar la malla y el carbón activado al menos dos veces seguidas obteniéndose aún un agua residual tratada clara con rastros de sólidos suspendidos y grasas y aceites apenas visibles a simple vista.

El sistema propuesto se muestra en el siguiente diagrama de proceso (Fig. 9), éste es básicamente la planta piloto llevada a nivel industrial:

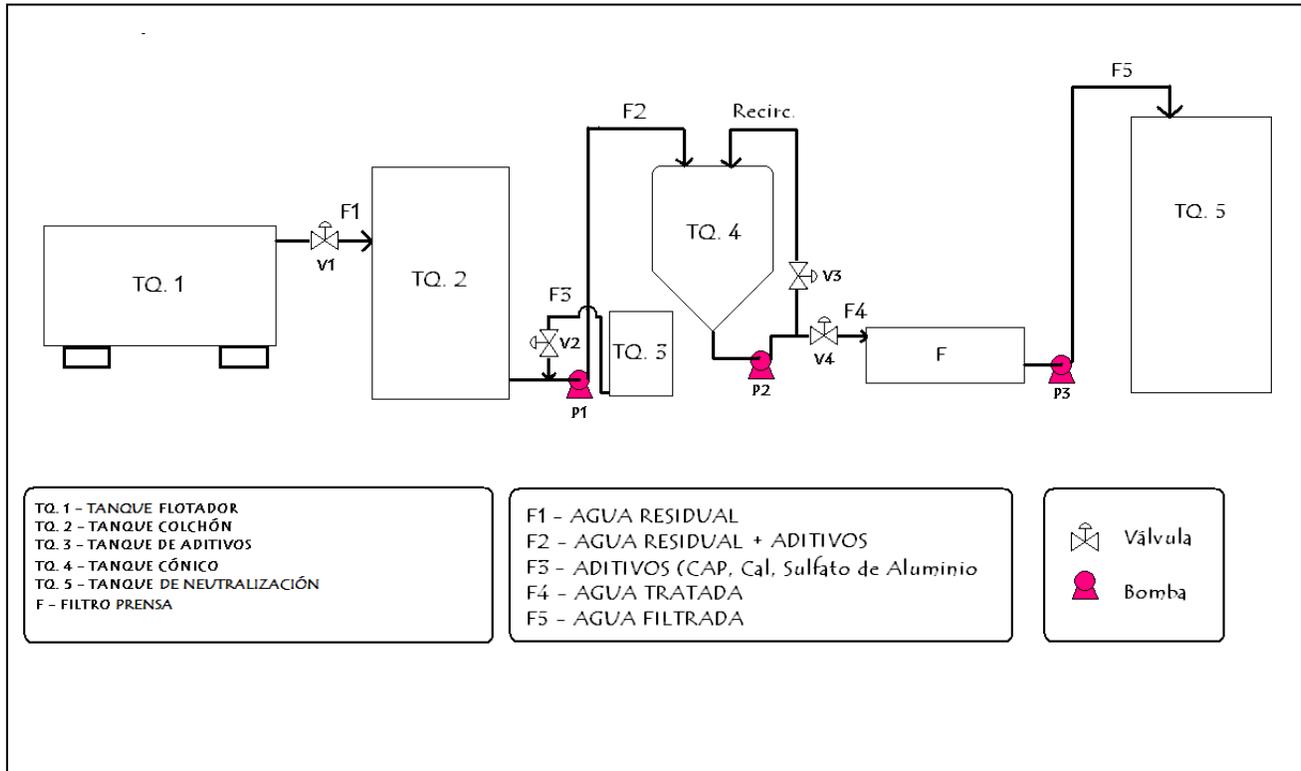


Fig. 11 - Diagrama de proceso del sistema de tratamiento propuesto.

Con este sistema se consigue la remoción de GyA, SST y DBO_5 al grado de que cumplan con la normatividad correspondiente, a excepción de la DBO_5 la cual podría mostrar una reducción utilizando un sistema de aireación en el tanque final (TQ. 5). El pH se controlará en este mismo tanque agregando una solución ácida (p.e. ácido sulfúrico) para neutralizar. El resto de los parámetros normados, se encuentran controlados.

5.2 RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos:

Se recomienda agregar la cal una vez que se encuentre disuelta en agua ya que esto mejora la dispersión del coagulante en toda la muestra.

El floculante es preferible agregarlo en forma de solución para favorecer la integración de éste a la desestabilización previa de partículas y así, mejorar tiempos de floculación y disminuir los tiempos de residencia en planta.

Es importante pasar las pruebas del laboratorio, a prototipos en campo con la finalidad de comprobar en campo los resultados obtenidos.

La precapa de carbón activado se puede reutilizar al menos dos veces seguidas comprobado; sin embargo, la cantidad especificada se consideró para reutilizarla cuatro veces seguidas.

CAPITULO 6.- SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS

Una de las sugerencias para un trabajo futuro es continuar con las pruebas de jarras utilizando otro tipo de coagulantes y floculantes (p.e. sulfato férrico, polielectrolitos). Es probable encontrar una combinación de estos aditivos que se ajuste mejor a la remoción de grasas y aceites utilizando menor cantidad de los mismos.

Reducir la cantidad de sulfato de aluminio grado industrial, se demostró que el tratamiento funciona aun con cantidades menores a 0.5 g/l. Sin embargo, es necesario encontrar la cantidad mínima y hacer pruebas piloto una vez determinada.

Con respecto al filtro prensa, utilizado para retirar los flóculos, se recomienda utilizar otro tipo de medio filtrante donde no se pierda la capacidad de retención y sea de fácil acceso, que se pueda usar por más tiempo o incluso reutilizarse, que soporte mayor carga, etc. Se recomienda revisar los materiales de las mallas para escoger el más conveniente.

Además, se sugiere probar el tratamiento utilizando una filtración por medio de filtros de arena, los cuales son eficaces en cuestión de remoción de sólidos suspendidos, fáciles de limpiar en poco tiempo y que no requieren ningún tipo de fuerza mecánica para su funcionamiento.

APÉNDICES

Apéndice 1. Técnicas para la determinación de parámetros

Grasas y aceites (GyA).- Este método permite una estimación del contenido de grasas y aceites en aguas naturales, residuales tratadas al determinar gravimétricamente las sustancias que son extraídas con hexano de una muestra acuosa acidificada. La determinación de grasas y aceites es indicativa del grado de contaminación del agua por usos industriales y humanos. En la determinación de grasas y aceites no se mide una sustancia específica sino un grupo de sustancias con unas mismas características fisicoquímicas (solubilidad).

Entonces la determinación de grasas y aceites incluye ácidos grasos, jabones, grasas, ceras, hidrocarburos, aceites y cualquier otra sustancia susceptible de ser extraída con hexano. ^[1]

Técnica de determinación: Este método se basa en la adsorción de grasas y aceites en tierra de diatomeas, los cuales son extraídos en un Soxhlet empleando hexano como disolvente. Una vez terminada la extracción se evapora el hexano y se pesa el residuo que ha quedado en el recipiente; siendo este valor el contenido de grasas y aceites de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-005-SCFI-2000 “Determinación de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba (Cancela a la MNX-AA-005-1980)”.

Procedimiento:

1. Medir el pH de las muestras el cual debe ser menor de 2, si no tiene este valor acidifique con ácido clorhídrico 1:1 o ácido sulfúrico 1:1.
2. Para muestras con un pH menor de 8 unidades generalmente es suficiente con adicionar 5 ml de ácido clorhídrico 1:1 o 2 ml de ácido sulfúrico 1:1.
3. Preparar los matraces de extracción introduciéndolos a la estufa a una temperatura de 103 °C – 105 °C, enfriar en desecador y pesarlos, repetir el procedimiento hasta obtener el peso constante de cada uno de los matraces.
4. Preparar el material filtrante colocando un papel filtro en el embudo Büchner, colocar el embudo en un matraz Kitazato y agregar 100 ml de la suspensión de tierra de diatomeas – sílice sobre el filtro, aplicar vacío y lavar con 100 ml de agua.
5. Transferir el total de la muestra acidificada al embudo Büchner preparado aplicando vacío hasta que cese el paso de agua. Medir volumen de la muestra.
6. Con ayuda de unas pinzas, transferir el material filtrante a un cartucho de extracción. Limpiar las paredes internas del embudo y el frasco contenedor de la muestra, así como la parte interna de la tapa del frasco con trozos de papel filtro previamente impregnados de disolvente (hexano) tener cuidado en remover la película de grasa y los sólidos impregnados sobre las paredes; colocar los trozos de papel en el mismo cartucho.
7. Secar el cartucho en una estufa a 103 °C – 105 °C por un período de 30 min. Transcurrido este período colocar en el equipo Soxhlet.
8. Adicionar el volumen adecuado de hexano al matraz de extracción previamente puesto a peso constante y preparar el equipo Soxhlet. Evitar tocar con las manos el cartucho y el matraz de extracción, para ello utilizar pinzas o guantes de látex.
9. Colocar el equipo de extracción sobre la parrilla de calentamiento, controlas la temperatura del reflujo y extraer a una velocidad de 20 ciclos/hora durante un período de 4 h.
10. Una vez terminada la extracción retirar el matraz del equipo Soxhlet, y evaporar el disolvente.
11. El matraz de extracción libre de disolvente se coloca en el desecador hasta que alcance la temperatura ambiente.

12. Pesar el matraz de extracción y determinar la concentración de grasas y aceites recuperables.
13. Analizar un blanco de reactivo bajo las mismas condiciones de la muestra.
14. Cálculo de grasas y aceites recuperables (G y A):

$$GyA \left(\frac{mg}{l} \right) = \frac{A - B}{V}$$

Donde:

A es el peso final del matraz de extracción (mg);

B es el peso inicial del matraz de extracción (mg);

V es el volumen de la muestra, en litros.

15. Restar al resultado obtenido de la muestra el valor del blanco de reactivo.
16. Reportar los resultados del análisis en mg/l.

Potencial de Hidrógeno (pH).- La medición del pH del agua es muy importante ya que los valores altos y bajos son tóxicos para organismos acuáticos, ya se directamente o indirectamente. Es el parámetro más importante utilizado en la evaluación de las propiedades corrosivas de un medio ambiente acuático. Asimismo, es importante para el funcionamiento efectivo de los procesos de tratamiento de aguas y su control, el control de plumbosolencia de aguas potables y tratamiento biológico de aguas residuales y los vertidos de aguas residuales.

Los métodos colorimétricos emplean indicadores que desarrollan una gama de colores a diferentes pH. Su precisión es restringida y sólo son satisfactorias para su uso en una

prueba de campo. Este método es aplicable a todos los tipos de agua y muestras de aguas residuales en el intervalo de pH 3 a pH 10.

Técnica de determinación: El método electrométrico se basa en la medición de la fuerza electromotriz de una celda electroquímica, que consta de la muestra, un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia. Se puede obtener una desviación estándar de $\Delta\text{pH} = 0.05$ o menos mediante este método. Si la muestra es baja en la fuerza iónica, es decir, menos de 5 mS/m de conductividad eléctrica, son necesarios equipos de análisis y procedimientos especiales. Método utilizado de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2011 “Determinación del pH – Método de prueba – (Cancela a la MNX –AA-008-SCFI-2000)”.

Procedimiento:

1. Preparación: Mida la temperatura de las disoluciones amortiguadoras de pH. Ajuste el control de la temperatura del potenciómetro. De acuerdo con las instrucciones del fabricante, considere la posibilidad del punto isopotencial. Las disoluciones amortiguadoras de pH y las muestras deben tener la misma temperatura, cuando sea posible.
2. Calibración en dos puntos: Para llevar a cabo la calibración del medidor de pH o potenciómetro siga las instrucciones del fabricante del equipo. Lea cuidadosamente el manual del mismo, ya que parámetros como la compensación de temperatura, el reconocimiento automático de disoluciones de calibración, estabilidad de las lecturas, intervalos permisibles de la pendiente y el punto de isopotencial, pueden influir adversamente en la calibración e incluso dar lugar a errores sistemáticos.
Al margen de la diversidad de medidores de pH existentes, los cuales cubren un amplio intervalo de complejidad y funciones automatizadas, las siguientes prácticas deben observarse durante la calibración:

- Lave el electrodo con agua y sumérgalo en la disolución amortiguadora (véase 5.2). Agite la disolución suavemente con el electrodo y permita que la disolución repose (tome la lectura sin agitación).
- El punto de isotencial debe caer en un intervalo $\Delta\text{pH} \leq 0.5$
- Deben elegirse las disoluciones amortiguadora para pH B, C, D, F o I de modo que el pH esperado de la muestra se encuentre dentro del intervalo de las disoluciones amortiguadoras de pH utilizadas de acuerdo a la siguiente tabla:

Valores nominales de pH para disoluciones amortiguadoras de trabajo

Temperatura	B	C	D	F	I
	Bitartrato de potasio ¹⁾	Biftalato de potasio	Fosfato	Bórax	Hidrógeno de sodio/Bicarbonato de sodio
0	-	4.000	6.984	9.464	10.317
5	-	3.998	6.951	9.395	10.245
10	-	3.997	6.923	9.332	10.179
15	-	3.998	6.900	9.276	10.118
20	-	4.001	6.881	9.225	10.062
25	3.557	4.005	6.865	9.180	10.012
30	3.552	4.011	6.835	9.139	9.966
35	3.549	4.018	6.844	9.102	9.926
40	3.547	4.027	6.838	9.068	9.889
45	3.547	4.038	6.824	9.038	9.856
50	3.549	4.050	6.833	9.011	9.828
c (mol/l)	0.027	0.016	0.029	0.020	0.029
$\Delta\text{pH } \frac{1}{2}$	+ 0.049	+ 0.052	+ 0.080	+ 0.01	+ 0.079
1) La solubilidad del bitartrato de potasio es reducida por enfriamiento y no puede utilizarse a una temperatura inferior a 25 °C.					

3. Cálculo de pH para diversas temperaturas:

El pH debe estar referido a 25 °C. Si el valor es medido a diferente temperatura, debe indicarse. Si es necesario, expresar el pH para otras temperaturas diferentes a la medición, utilizar el cálculo siguiente:

$$pH_{25} = pH_{tm} + \Delta pH_{tm}$$

donde

pH_{25} es el pH a 25°C

pH_{tm} es el pH a la temperatura de la medición

ΔpH_{tm} es la desviación de pH con referencia a 25 °C para la temperatura de la medición

Nota: el cálculo es válido para las aguas con una capacidad amortiguadora de pH debida principalmente a los iones de bicarbonato.

4. Expresión de los resultados:

Reportar el pH con las cifras decimales indicadas por el instrumento.

Reportar la temperatura a la cual se efectuó la medición.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅).- Es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un período de 5 días.

El método se basa en medir el oxígeno consumido por una población microbiana en condiciones en las que se ha inhibido los procesos fotosintéticos de producción de oxígeno en condiciones que favorecen el desarrollo de los microorganismos.

Técnica de determinación: El método se basa en medir la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para efectuar la oxidación de la materia orgánica presente en aguas naturales y residuales y se determina por la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto al cabo de cinco días de incubación a 20°C. La determinación de la DBO₅ se realiza de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001 “Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅) y residuales tratadas – Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-028-1981)”.

Procedimiento:

1. Preparación de agua para dilución:

- Colocar el volumen requerido de agua en un frasco y añadir por cada litro de agua 1 ml de cada una de las siguientes disoluciones: disolución de sulfato de magnesio disolución de cloruro de calcio, disolución de cloruro férrico y disolución amortiguadora de fosfatos. Preparar el agua de dilución diariamente.
- Analizar y almacenar el agua de dilución, de tal forma que siempre tenga a mano agua de calidad garantizada. Antes de usar el agua de dilución debe ponerse a una temperatura aproximada de 20°C. Saturar con oxígeno aireando con aire filtrado, libre de materia orgánica durante 1 h por lo menos.
- Si la muestra presenta alto contenido de biocidas como cloro o se sabe de su bajo contenido de materia orgánica, es necesario inocular la muestra.

- Si se requiere, sembrar el agua de dilución como se indica en el inciso 10.4.1.

2. Control del agua de dilución

- Utilizar este procedimiento como una comprobación aproximada de la calidad del agua de dilución. Si la disminución de oxígeno disuelto del agua excede de 0,2 mg/l, obtener agua de mejor calidad mejorando la purificación o usar agua de otra fuente. Alternativamente si se requiere inhibir la nitrificación, almacenar el agua de dilución sembrada en una habitación oscura a temperatura ambiente hasta que la captación de oxígeno disuelto se haya reducido lo suficiente para cumplir los criterios de comprobación del agua de dilución. No se recomienda su almacenamiento cuando la DBO₅ se va a determinar sin inhibir la nitrificación ya que pueden desarrollarse microorganismos nitrificantes durante ese tiempo. Si el agua de dilución no ha sido almacenada para mejorar su calidad, añadir suficiente inóculo como para un consumo de OD de 0,05 mg/l a 0,1 mg/l en cinco días a 20°C. Al incubar en un frasco Winkler lleno de agua de dilución durante cinco días a 20°C, el consumo no debe ser mayor a 0,2 mg/l y preferiblemente no menor a 0,1 mg/l.

3. Control de la glucosa-ácido glutámico

- Comprobar en cada lote analítico la calidad del agua de dilución, la efectividad del inóculo y la técnica analítica mediante determinaciones de la DBO₅ en muestras estándar de concentración conocida. Utilizar la disolución de glucosa-ácido glutámico como disolución madre de control. La glucosa tiene una tasa excepcionalmente alta y variable de oxidación, pero cuando se utiliza con ácido glutámico, dicha tasa se estabiliza y es similar a la obtenida en muchas aguas residuales municipales.

Alternativamente, si un agua residual particular contiene un componente principal identificable que contribuya a la DBO_5 , utilizar este compuesto en lugar de la glucosa-ácido glutámico. Determinar la DBO_5 de una disolución al 2% de la disolución de control patrón de glucosa-ácido glutámico utilizando las técnicas expuestas en los incisos 4 a 10.

4. Inóculo

- Fuente de la siembra:

Es necesario contar con una población de microorganismos capaces de oxidar la materia orgánica biodegradable de la muestra. El agua residual doméstica, los efluentes no clorados o sin desinfección, los efluentes de las plantas de tratamiento de desechos biológicos y las aguas superficiales que reciben las descargas de aguas residuales que contienen poblaciones microbianas satisfactorias. Algunas muestras no contienen una población microbiana suficiente (por ejemplo, algunos residuos industriales no tratados, residuos desinfectados, residuos de alta temperatura o con valores de pH extremos).

Para tales residuos, sembrar el agua de dilución añadiendo una población de microorganismos. La mejor siembra es la que proviene del efluente de un sistema de tratamiento biológico de aguas residuales. Cuando se usa como siembra el efluente de tratamiento biológico de sistema de aguas residuales se recomienda la inhibición de la nitrificación. Cuando no se disponga de ésta, utilizar el sobrenadante del agua residual doméstica después de dejarlo reposar a temperatura ambiente durante al menos 1 h, pero no más de 36 h. Determinar si la población existente es satisfactoria haciendo la prueba de la siembra en una muestra para DBO_5 . El incremento del valor de la DBO_5 indica una siembra exitosa.

5. Control del inóculo

- Determinar la DBO_5 del material de siembra como para cualquier otra muestra. Esto es una siembra control. A partir de este valor y de uno conocido de la dilución del material de siembra (en el agua de dilución) determinar el consumo de OD de la siembra. Lo ideal es hacer disoluciones tales de la siembra que la mayor cantidad de los resultados presenten una disminución de al menos el 50 % del OD. La representación de la disminución del OD (mg/l) con respecto a los mililitros de siembra, tiene que ser una línea recta cuya pendiente corresponde a la disminución de OD por mililitro del inóculo. La intersección del eje de las abscisas (OD) representa el consumo del oxígeno causado por el agua de dilución y debe ser inferior a 0,1 mg/l (ver inciso 8). Para determinar el consumo de OD de una muestra, se resta el consumo de OD de la siembra, del consumo de OD total. La captación de OD total del agua de dilución sembrada debe oscilar entre 0,6 mg/l y 1,0 mg/l.

6. Pretratamiento de la muestra

- Muestras con pH ácidos o básicos:

Neutralizar las muestras a un pH entre 6,5 y 7,5 con ácido sulfúrico o hidróxido de sodio de concentración tal que la cantidad de reactivo no diluya la muestra en más del 0,5 %. El pH del agua de dilución sembrada no debe verse afectado por la dilución de la muestra.

- Muestras que contiene cloro residual:

Si es posible, evitar las muestras que contengan cloro residual, tomándolas antes del proceso de cloración. Si la muestra ha sido clorada pero no hay

residuo detectable de cloro, sembrar el agua de dilución. Si hay cloro residual, eliminar el cloro de la muestra y sembrar con inóculo (ver inciso 4). No se deben analizar las muestras cloradas sin sembrar el agua de dilución. En algunas muestras, el cloro desaparece en el lapso de 1 h a 2 h después de su exposición a la luz. Esto suele ocurrir durante el transporte o la manipulación de la muestra. Para las muestras en las que el residuo de cloro no se disipe en un tiempo razonablemente corto, eliminar el cloro residual añadiendo disolución de sulfito de sodio.

Determinar el volumen requerido de disolución de sulfito de sodio cuantificando el cloro residual total. Añadir a la muestra neutralizada el volumen relativo de la disolución de sulfito de sodio determinada por la prueba anterior, mezclar y después de 10 min a 20 min, comprobar el cloro residual de la muestra.

La determinación de cloro residual se realiza de acuerdo a lo establecido en la norma mexicana NMX-AA-100

- Muestras sobresaturadas con OD

En aguas frías o en aguas donde se produce la fotosíntesis (aguas de embalses), es posible encontrar muestras que contienen más de 9,0 mg OD/l a 20°C. Para evitar la pérdida de oxígeno durante la incubación de tales muestras, reducir el OD por saturación, calentando la muestra aproximadamente a 20°C en frascos parcialmente llenos mientras se agitan con fuerza o se airean con aire limpio, filtrado y comprimido.

- Ajustar la temperatura de la muestra a $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ antes de hacer diluciones
- Inhibición de la nitrificación

Si se requiere inhibir la nitrificación adicionar 3,0 mg de 2-cloro-6 (triclorometil) piridina a cada uno de los frascos antes de recolectar o bien adicionar la cantidad suficiente de agua para tener una concentración de 10 mg/l aproximadamente.

Entre las muestras que requieren inhibición de la nitrificación se incluyen, los efluentes tratados biológicamente, las muestras sembradas con efluentes tratados biológicamente y las aguas superficiales entre otras. Debe hacerse la observación del uso de inhibición del nitrógeno cuando se presente el informe de los resultados.

7. Técnica de dilución

- Las diluciones que dan lugar a un OD residual mayor de 1 mg/l y una captación de OD de al menos 2 mg/l después de 5 días de incubación, producen los resultados más confiables. Hacer varias diluciones (al menos 3) por duplicado de la muestra preparada para obtener una captación de OD en dicho intervalo. La experimentación con una muestra concreta permite el uso de un número menor de diluciones. Un análisis más rápido tal como la DQO, presenta una correlación aproximada con la DBO₅ y sirve como una guía para seleccionar las diluciones. En ausencia de datos previos, utilizar las siguientes diluciones: de 0 % a 1 % para los residuos industriales fuertes, de 1 % a 5 % para las aguas residuales sedimentadas y crudas, del 5 % al 25 % para el efluente tratado biológicamente y del 25 % al 100 % para las aguas superficiales contaminadas.
- Diluciones preparadas directamente en frascos tipo Winkler. Utilizando una pipeta volumétrica, añadir el volumen de muestra deseado a frascos Winkler individuales de 300 ml. Añadir cantidades adecuadas del material de siembra a los frascos tipo Winkler o al agua de dilución. Llenar los frascos con

suficiente agua de dilución, sembrada si es necesario, de forma que la inserción del tapón desplace todo el aire, sin dejar burbujas. No realizar diluciones mayores de 1:300 (1 ml de la muestra en un frasco). Determinar el OD inicial en uno de los frascos de cada una de las diferentes diluciones. En los frascos de los duplicados de cada una de las diluciones, Ajustar herméticamente el tapón, poner un sello hidráulico y la contratapa e incubar durante 5 días a 20°C.

8. Determinación del OD inicial

- Método yodométrico

La determinación del OD inicial se realiza por medio del método yodométrico de azida modificado, de acuerdo a lo establecido en la norma mexicana NMX-AA-012-SCFI.

- Método electrométrico

La determinación del OD inicial se realiza por medio del método electrométrico con electrodo de membrana, de acuerdo a lo establecido en la norma mexicana NMXAA- 012-SCFI. Los aceites, grasas o cualquier sustancia que se adhiera a la membrana puede ser causa de baja respuesta en el electrodo.

9. Blanco del agua de dilución. Emplear un blanco del agua de dilución como un control aproximado de la calidad del agua de dilución no sembrada y de la limpieza de los frascos de incubación. Junto con cada lote de muestras, incubar un frasco de agua de dilución no sembrada. Determinar el OD inicial y final como se especifica en los incisos 7 y 10. El consumo de OD no debe ser mayor de 0,2 mg/l y preferentemente no menor a 0,1 mg/l.

10. Incubación

Incubar a $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ las botellas de DBO_5 que contengan las muestras con las diluciones deseadas, los controles de siembra, los blancos de agua de dilución y el control de glucosa-ácido glutámico. En caso de no contar con contratapas, diariamente se debe verificar que el sello hidráulico esté intacto en cada botella incubada, agregar agua si es necesario.

11. Determinación del OD final

Después de 5 días de incubación determinar el OD en las diluciones de la muestra, en los controles y en los blancos. La medición del OD debe ser realizada inmediatamente después de destapar la botella de Winkler, para evitar la absorción de oxígeno del aire por la muestra.

12. Cálculos de la DBO_5

- Cuando no se utilice inóculo ni diluciones:

$$\text{DBO}_5 \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = (\text{OD}_i \text{mg/l} - \text{OD}_5 \text{mg/l})$$

donde:

$\text{OD}_i \text{ mg/l}$ es el oxígeno disuelto inicial, y

$\text{OD}_5 \text{ mg/l}$ es el oxígeno disuelto al quinto día.

- Cuando se emplea una dilución:

$$\text{DBO}_5 \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = \frac{\text{OD}_i \text{mg/l} - \text{OD}_5 \text{mg/l}}{\% \text{ de dilución expresado en decimales}}$$

13. Cuando se utiliza inóculo

- Sin dilución:

$$DBO_5 \left(\frac{mg}{l} \right) = \left[(OD_i mg/l - OD_5 mg/l) - \frac{C_1(B_1 - B_2)(V_t)}{C_2(V_m)} \right]$$

- Con dilución:

$$DBO_5 \left(\frac{mg}{l} \right) = \left[(OD_i mg/l - OD_5 mg/l) - \frac{C_1(B_1 - B_2)(V_t)}{C_2(V_m)} \right] \quad |P$$

donde:

- B_1 es el OD del inóculo antes de la incubación, en mg/l;
- B_2 es el OD del inóculo después de la incubación, en mg/l;
- C_1 es el volumen de inóculo en la muestra;
- C_2 es el volumen de inóculo en el inóculo control;
- V_t es el volumen total del frasco Winkler, y
- V_m es el volumen de muestra sembrada.

14. Expresar los resultados como CDBO₅ si se inhibe la nitrificación.

15. Reportar los resultados en mg/l de DBO₅ con dos cifras significativas con la precisión (media, desviación estándar) correspondiente.

Sólidos suspendidos totales (SST): Las aguas naturales o residuales con altos contenidos de sólidos suspendidos o sales disueltas no pueden ser utilizadas en forma directa por las industrias o por las plantas potabilizadoras. De ello se deriva el interés por determinar en forma cuantitativa estos parámetros.

Técnica de determinación: El principio de este método se basa en la medición cuantitativa de los sólidos y sales disueltas así como la cantidad de materia orgánica contenidos en aguas naturales y residuales, mediante la evaporación y calcinación de la muestra filtrada o no, en su caso, a temperaturas específicas, en donde los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo del contenido de estos. Esta determinación se realiza de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001 “Determinación de sólidos y sales disueltas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba (cancela a las NMX-AA-020-1980 Y NMX-AA-034-1981)”.

Procedimiento:

1. Preparación de cápsulas de porcelana

- Las cápsulas se introducen a la mufla a una temperatura de $550^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$, durante 20 min como mínimo. Después de este tiempo transferirlas a la estufa a $103^{\circ}\text{C} - 105^{\circ}\text{C}$ aproximadamente 20 min.
- Sacar y enfriar a temperatura ambiente dentro de un desecador.
- Pesar las cápsulas y registrar los datos.
- Repetir el ciclo hasta alcanzar el peso constante, el cual se obtendrá hasta que no haya una variación en el peso mayor a 0,5 mg. Registrar como peso G.

2. Preparación de crisoles Gooch

- Introducir el filtro de fibra de vidrio en el crisol con la cara rugosa hacia arriba, mojar el filtro con agua para asegurar que se adhiera al fondo del crisol.

- Los crisoles se introducen a la mufla a una temperatura de $550^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$, durante 20 min como mínimo. Después de este tiempo transferirlos a la estufa a $103^{\circ}\text{C} - 105^{\circ}\text{C}$ aproximadamente 20 min.
- Sacar y enfriar a temperatura ambiente dentro de un desecador.
- Pesar los crisoles y repetir el ciclo hasta alcanzar el peso constante, el cual se obtiene hasta que no haya una variación en el peso mayor a 0,5 mg. Registrar como G3.

3. Preparación de la muestra

- Sacar las muestras del sistema de refrigeración y permitir que alcancen la temperatura ambiente. Agitar las muestras para asegurar la homogeneización de la muestra.

4. Medición para sólidos totales (ST) y sólidos totales volátiles(SVT)

- Determinación para sólidos totales (ST):

En función de la cantidad de sólidos probables tomar una cantidad de muestra que contenga como mínimo 25 mg/L de sólidos totales, generalmente 100 mL de muestra es un volumen adecuado.

Transferir la muestra a la cápsula de porcelana que previamente ha sido puesta a peso constante (ver inciso 9, punto 4).

Llevar a sequedad la muestra en la estufa a $103^{\circ}\text{C}-105^{\circ}\text{C}$.

Enfriar en desecador hasta temperatura ambiente y determinar su peso hasta alcanzar peso constante. Registrar como peso G1.

- Determinación para sólidos totales volátiles(SVT):

Introducir la cápsula conteniendo el residuo a la mufla a $550^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ durante 15 min a 20 min, transferir la cápsula a la estufa a $103^{\circ}\text{C} - 105^{\circ}\text{C}$ aproximadamente 20 min, sacar la cápsula, enfriar a temperatura ambiente en desecador y determinar su peso hasta alcanzar peso constante. Registrar como peso G2.

Cuando se determinen muestras por duplicado o triplicado, los resultados como máximo pueden tener una variación del 5 por ciento del promedio de los resultados.

5. Sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos totales (SST)

- Determinación de los sólidos suspendidos totales (SST):

Medir con una probeta, un volumen adecuado de la cantidad seleccionada de muestra previamente homogeneizada la cual depende de la concentración esperada de sólidos suspendidos.

Filtrar la muestra a través del crisol Gooch preparado anteriormente aplicando vacío (ver inciso 2), lavar el disco tres veces con 10 ml de agua, dejando que el agua drene totalmente en cada lavado.

Suspender el vacío y secar el crisol en la estufa a una temperatura de 103°C a 105°C durante 1 h aproximadamente. Sacar el crisol, dejar enfriar en un

dsecador a temperatura ambiente y determinar su peso hasta alcanzar peso constante registrar como peso G4.

- Determinación de sólidos suspendidos totales (SST):

Introducir el crisol que contiene el residuo (ver inciso 9.5.3) y el disco a la mufla, a una temperatura de $550^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ durante 15 min a 20 min. Sacar el crisol, de la mufla e introducirlo a la estufa a una temperatura de $103^{\circ}\text{C} - 105^{\circ}\text{C}$ durante 20 min aproximadamente. Sacar y enfriar a temperatura ambiente en desecador y determinar su peso hasta alcanzar peso constante. Registrar como peso G5.

6. Sales disueltas totales (SDT)

- La determinación de las sales disueltas totales es por diferencia entre los sólidos totales menos sólidos suspendidos totales.

7. Calcular el contenido de sólidos totales de las muestras como sigue:

$$S_T = (G_1 - G) * 1000 / V$$

donde:

S_T son los sólidos totales, en mg/l;

G_1 es el peso de la cápsula con el residuo, después de la evaporación, en mg;

G es el peso de la cápsula vacía, en mg a peso constante, y

V es el volumen de muestra, en ml.

8. Calcular el contenido de sólidos suspendidos totales de las muestras como sigue:

$$SST = (G4 - G3) * 1\ 000 / V$$

donde:

SST son los sólidos suspendidos totales, en mg/l;

G3 es el peso del crisol con el disco a peso constante, en mg;

G4 es el peso del crisol con el disco y el residuo seco, en mg, y

V es el volumen de muestra, en ml.

9. Calcular el contenido de sólidos suspendidos totales de las muestras como sigue:

$$SST = (G4 - G5) * 1\ 000 / V$$

donde:

SST son los sólidos suspendidos totales, en mg/l;

G5 es el peso del crisol con el residuo, después de la calcinación, en mg;

V es el volumen de muestra, en ml.

10. Calcular el contenido de sales disueltas totales de las muestras como sigue:

$$SDT = ST - SST$$

donde:

SDT son las sales disueltas totales, en mg/l

ST son los sólidos totales, en mg/l

SST son los sólidos suspendidos totales, en mg/l

11. Reportar los valores obtenidos de la muestra control junto con los resultados del análisis.
12. Reportar los resultados, en mg/l.

Conductividad eléctrica (CE): La conductividad eléctrica es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones, de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura. La determinación de conductividad es de gran importancia pues da una idea del grado de mineralización del agua.

Técnica de determinación: Este método se basa en la propiedad que adquiere el agua de conducir la corriente eléctrica cuando tiene iones disueltos. La conducción de la corriente eléctrica en agua, puede explicarse por medio de la disociación electrolítica. Cuando se disuelve en agua un ácido, una base o una sal, una porción se disocia en iones positivos y otra en negativos



Los iones se mueven independientemente y se dirigen a los electrodos de carga opuesta mediante la aplicación de un campo eléctrico. La cantidad de moléculas que se han disociado depende de la concentración de la solución. Las soluciones, al igual que los conductores metálicos obedecen a la Ley de Ohm, excepto en voltajes muy elevados y corrientes de frecuencia muy alta. Esta determinación se realiza de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-093-SCFI-2000 “Determinación de la conductividad electrolítica - método de prueba (cancela a la NMX-AA-093-1984)”.

Procedimiento:

1. Medición de la conductividad

- Preparar el equipo para su uso de acuerdo a las instrucciones del fabricante y seleccionar un electrodo con la constante de celda apropiada para el intervalo de medición en que se usará.
- La cantidad de la muestra depende del equipo por usar.
- Las muestras y la disolución de calibración deben estar a 25°C de preferencia o a la temperatura ambiente.
- Determinar la temperatura de la muestra.
- Enjuagar la celda con porciones de la disolución de prueba antes de realizar la medición para evitar contaminación de la muestra por electrolitos.
- Sumergir la celda en la disolución de prueba, el nivel de la disolución debe cubrir los orificios de ventilación de la celda, agitar la celda verticalmente para expulsar las burbujas de aire.
- Seleccionar el rango adecuado de medición en el instrumento, una vez que se estabilice la lectura, anotar el valor de conductividad.
- Después de cada determinación, retirar la celda de la disolución y enjuagarla con agua desionizada.
- Reportar los resultados como conductancia específica o conductividad, mS/m a 25°C.

Muchos instrumentos incorporan correcciones de la constante de celda en una función integral y directamente medida de la conductividad obtenida. En su caso multiplicar el valor de la conductancia obtenida por la constante de celda para obtener la conductividad electrolítica.

El factor de conductancia de disoluciones electrolíticas en agua, es casi siempre positivo y de una magnitud de 1 a 3 % por °C, dependiendo de la concentración de los iones electrolíticos y de su naturaleza.

La temperatura de referencia en las mediciones de conductividad es de 25°C por lo que la mayoría de los instrumentos cuentan con compensador de temperatura.

Si no existe en el instrumento el compensador, es necesario ajustar la temperatura de la disolución a prueba a 25°C. No se recomienda efectuar un ajuste matemático por medio de un factor debido a su naturaleza empírica.

Existen factores de corrección por temperatura muy específicos, para la conversión de valores de conductividad de aguas naturales a distintas temperaturas en °C a la temperatura de referencia de 25°C.

2. Si se cuenta con un conductímetro con compensador de temperatura no se requiere hacer cálculos.
3. Cuando se mide la resistencia de la muestra, la conductividad a 25°C es:

$$\sigma = \frac{(1 \times 10^6)K}{Rm1 + 0.0191(t - 25)}$$

donde:

σ es la conductividad, S/cm;

K es la constante de celda, cm^{-1} ;

Rm es la resistencia medida de la celda, ohms, y

T es la temperatura de medición, °C

4. Cuando se mide la conductividad de la muestra, dicha conductividad a 25°C es :

$$\sigma = \frac{m(1 \times 10^6)K}{1 + 0.0191(t - 25)}$$

donde:

m es la conductividad medida, σ a t°C.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alton E. Bailey. (1984). Reacciones de las grasas y los ácidos grasos. *Aceites y grasas industriales*. (pp. 33 – 58), (2ª ed.), Barcelona, España: Editorial Reverté, S. A.
2. Nestor Julio Fraume Restrepo. (2007). Definiciones. *Diccionario Ambiental*. (pp. 35, 82, 207, 320, 401), Colombia: ECOE EDICIONES.
3. J. M. Costa. (2005). Definiciones. *Diccionario de Química Física*. (pp. 72, 86, 419, 467), Barcelona, España: DIAZ DE SANTOS EDICIONES.
4. Gordon Maskew Fair, John Charles Geyer, Daniel Alexander Okun. (1993). Sistemas de aguas residuales. *Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales. Volumen I*. (pp. 63 - 70), (5ª reimp.), México: LIMUSA, S.A. de C.V.
5. Frank N. Kemmer, John McCallion. (año 1989). *Manual del AGUA. Su naturaleza, Tratamiento y Aplicaciones. TOMO I*. (pp. 1-1 a 1-5; 3-1 a 3-19; 8-1 a 817), (1ª ed.), México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE MÉXICO S.A. DE C.V.
6. Robert H. Perry, Don W. Green. (2003). Gestión de residuos. *Manual del Ingeniero Químico. TOMO IV*. (pp. 25-76 a 25-82), (7ª ed.), España: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA S.A.U.
7. José Luis Lobardero. (2008, Noviembre). Contaminación de las aguas. *Manual para la Formación en Medio Ambiente*. (pp. 198- 212), (1ª ed.), España: Lex Nova S.A. de C.V.
8. Norma Mexicana NMX-AA-005-SCFI-2000 “Determinación de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba (Cancela a la MNX-AA-005-1980)”.
9. Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2011 “Determinación del pH – Método de prueba – (Cancela a la MNX –AA-008-SCFI-2000)”.
10. Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001 “Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅) y residuales tratadas – Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-028-1981)”.

11. Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001 “Determinación de sólidos y sales disueltas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba (cancela a las NMX-AA-020-1980 Y NMX-AA-034-1981)”.
12. Norma Mexicana NMX-AA-093-SCFI-2000 “Determinación de la conductividad electrolítica - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-093-1984)”.
13. Dr. A. D. Smith, Dr. D. A. Bender. (1997). *Oxford Dictionary of Biochemistry and Molecular Biology*. (pp. 227, 465), (1a ed.) United States, New York: The General Editors.
14. Raymond Chang, Williams College. (2003). Fuerzas intermoleculares. *Química*. (pp. 419 – 424). (7ª ed.) Colombia: MCGRAW – HILL INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V.
15. Antonio Rico Galicia, Rosa Elba Pérez, María José Castellanos Zoreda. (2008). Agua: Compuesto indispensable. *Química I. Agua y Oxígeno*. (pp. 26), (3ª ed.), México D.F.: DIRECCIÓN GENERAL DEL COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES
16. John McMurry. (2008). Ceras, grasas y aceites. *Química Orgánica*. (pp. 1060 - 1063, A-10), (7ª ed.), México D.F.: CENGAGE Learning
17. *Reglamento Para Controlar Las Descargas de Aguas Residuales al Alcantarillado Municipal de Morelia*. Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento del Municipio de Morelia, Michoacán. (pp. 16).
18. Ramalho, R. S. (2003, Mayo). Introducción. *Tratamiento de aguas residuales*. (pp. 1 - 26), (2ª ed.), España: Editorial Reverté, S. A.

FUENTES DIGITALES:

19. <http://www.conagua.gob.mx>

Determinación de sólidos y sales disueltas.

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NMX-AA-034-SCFI-2001.pdf>

Determinación de conductividad electrolítica.

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NMX-AA-093-SCFI-2000.pdf>

20. <http://www.despuesdelclick.blogspot.mx>

Imágenes de tensión superficial

<http://despuesdelclick.blogspot.mx/2009/06/el-milagro-de-la-tension-superficial.html>

21. <http://www.economia-nmx.gob.mx>

Determinación de grasas y aceites.

<http://www.economia-nmx.gob.mx/normasmx/detallenorma.nmx?clave=NMX-AA-005-SCFI-2000>

Determinación de pH.

<http://www.economia-nmx.gob.mx/normasmx/detallenorma.nmx?clave=NMX-AA-008-SCFI-2011>

Determinación de DBO₅.

<http://www.economia-nmx.gob.mx/normasmx/detallenorma.nmx?clave=NMX-AA-028-SCFI-2001>

22. <http://www.virtual.unal.edu.co>

El agua.

http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4090020/files/pdf/cap_1+.pdf