



**SEP**  
SECRETARÍA  
DE EDUCACIÓN  
PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

**SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL  
RÍO**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E  
INVESTIGACIÓN**

*Aprovechamiento de *Aloe barbadensis* Miller como coagulante  
natural para aguas residuales*

**TESIS**

**PRESENTA:**

**IBQ. ERENDIRA RAMIREZ HERRERA**

**DIRECTORA:**

**DRA. CINTHYA ALEJANDRA SOSA VILLALOBOS**

**CODIRECTORA:**

**DRA. ITZEL GALAVIZ VILLA**

**ASESOR:**

**M.C. IRVING DAVID PÉREZ LANDA**

**ASESORA:**

**DRA. PAULA ZÚÑIGA RUIZ**

**FEBRERO 2020, BOCA DEL RÍO, VERACRUZ, MÉXICO.**



"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Número Registro **A-612-120118**

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 12:00 horas del día 4 del mes de octubre de 2019 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Consejo del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITBOCA, para examinar la Tesis de Grado titulada:

### "APROVECHAMIENTO DE *Aloe barbadensis* MILLER COMO COAGULANTE NATURAL PARA AGUAS RESIDUALES"

Que presenta el (la) alumno(a):

**ERENDIRA RAMIREZ HERRERA**

Aspirante al Grado de:

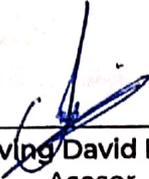
**Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental**

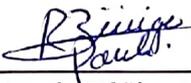
Después de escuchar las opiniones sobre el documento escrito e intercambiar puntos de vista, los miembros de la Comisión manifestaron SU APROBACIÓN, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes para su defensa ante el jurado correspondiente.

#### LA COMISIÓN REVISORA:

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Cinthya Alejandra Sosa Villalobos  
Director

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Itzel Galaviz Villa  
Asesor

  
\_\_\_\_\_  
M.C.I.B. Irving David Pérez Landa  
Asesor

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Paula Zúñiga Ruiz  
Suplente





**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Boca del Río  
Subdirección Académica  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Boca del Río, Ver., **21/enero/2020**

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

**ERENDIRA RAMIREZ HERRERA  
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
PRESENTE**

De acuerdo con el fallo emitido por los integrantes del Comité Revisor de la TESIS PARA OBTENCIÓN DE GRADO, desarrollada por usted cuyo título es:

**"APROVECHAMIENTO DE *Aloe barbadensis* MILLER COMO COAGULANTE  
NATURAL PARA AGUAS RESIDUALES"**

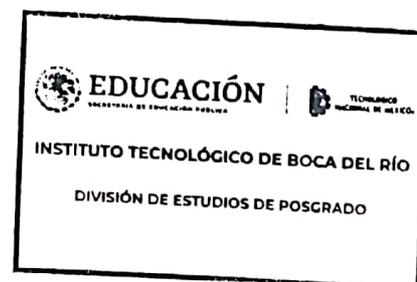
Esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede **AUTORIZACIÓN** para que proceda a su impresión.

### **ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica  
Por nuestros mares responderemos*

  
**M. C. ANA LETICIA PLATAS PINOS  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

c.c.p. Coordinación de la Maestría  
c.c.p. Expediente



Km. 12 Carr. Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver. C.P. 94290  
Tel. (229) 690 5010 correo: dir01\_bdelrio@tecnm.mx  
www.tecnm.mx | www.bdelrio.tecnm.mx



**Agradecimientos** Doy gracias a dios por todo lo que he vivido y aprendido estos 28 años.

Agradezco a mis formadores, personas de gran sabiduría quienes a sus consejos y dedicación me han ayudado a lograr importantes objetivos como culminar el desarrollo de mi tesis con éxito y al punto en que me encuentro.

A mi madre Rosy, gracias por ser mi pilar y por forjarme la persona que soy en la actualidad, mucho de mis logros se los debo a ella, siempre motivándome constantemente para alcanzar mis sueños y uno de ellos es este. Mis hermanos Miguel y Maricarmen por estar en mi camino todos los días y ser apoyo cuando más lo necesito.

A mis amigos, Katty, Arturo y Aarón en especial, por estar en los momentos más difíciles, escucharme y entenderme.

A mi familia y amigos, por aprender todo los días de ellos y estar ahí en los momentos gratos y no tanto.

Los logros y éxitos no son disfrutados si no se comparten con los que más amas, gracias a todos.

## Resumen

Los contaminantes de aguas residuales son una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos (Gonzales, 2003). Una planta de tratamiento de aguas residuales evacua sólidos que incluyen objetos de mayor tamaño, reduce la materia orgánica y los contaminantes por medio de bacterias y microorganismos, una vez utilizados estos son separados del agua (Troconis, 2010). Los sistemas de tratamiento de aguas residuales se dividen frecuentemente en subsistemas primarios, secundario y terciario (Valdez y González, 2003). Los tratamientos primarios más habituales son: decantación primaria y tratamiento fisicoquímico coagulación floculación. Los coagulantes que se emplean en la actualidad son químicos sin embargo estos traen desventajas, ya que alteran el pH del agua a tratar y tienen difícil manejo y almacenamiento, además de que pueden presentar riesgo para la salud y el medio ambiente (Sotheeswaran *et al.*, 2011). Es por ello que se han utilizado coagulantes naturales, origen animal o vegetal como semillas y plantas como *el Aloe barbadensis* Miller, entre otras, ya que estos son biodegradables y amigables para la salud y el medio ambiente. Por lo anterior, el presente proyecto tiene el objetivo de evaluar y determinar la eficiencia de remoción de turbidez y sólidos suspendidos del coagulante natural *Aloe barbadensis* Miller en aguas residuales domésticas y acuícolas, donde se realizó a nivel laboratorio haciendo uso de las pruebas de jarras. Las concentraciones óptimas fueron 0.800 mg/L para AA y 0.200 mg/L para AD, con una velocidad alta inicial de 100 rpm por 2 minutos, una velocidad baja de 30 rpm por 30 minutos y sedimentación de 40 minutos; obteniendo resultados óptimos en las diferentes aguas residuales al tratarlas, ya que, el comportamiento del coagulante *A. barbadensis* Miller en polvo, tuvo diferencia significativa en cuanto al tratamiento del AD en la remoción de DBO<sub>5</sub> (49.19%) y DQO (60.23%). Algo similar fue reportado por Malqui (2017), quien aplicó el mismo coagulante en polvo, con una dosis óptima de 800 mg/L, para el tratamiento de un canal, donde se evidenciaron altos niveles de DBO<sub>5</sub> y DQO, después del tratamiento, los valores de remoción de DBO<sub>5</sub> y DQO, fueron 80.64% y 90.11% respectivamente. En esta investigación la remoción de turbiedad fue de del 70.96% en AA y 95% en AD, que al compararse con la turbidez obtenida con el coagulante sintético sulfato de aluminio, que remueve 95.60% de turbiedad en aguas residuales domésticas (Sandoval y Laines, 2013), demuestra que, el coagulante *A. barbadensis* Miller en polvo, es efectivo para la clarificación de aguas residuales, con la ventaja de no afectar a la salud ni al medio ambiente.

## **Abreviaturas**

**AA:** agua residual acuícola

**AD:** agua residual domestica

**ANOVA:** análisis de varianza

**COO-;** grupo carboxilo

**$\rho_a$** = densidad aparente

**$\rho_c$** = densidad compacta

**DBO:** demanda bioquímica de oxígeno

**DQO:** demanda química de oxígeno

**FeCl<sub>3</sub>:** Cloruro férrico

**UNT:** unidad nefelométrica de turbidez

**OD:** oxígeno disuelto

**Pa:** pascales

**PTAR:** planta de tratamiento de agua residual

**STV:** sólidos totales volátiles

**STV:** sólidos totales volátiles

**SSF:** sólidos suspendidos fijos

**SSV:** sólidos suspendidos volátiles

**SDT:** sólidos disueltos totales

**SSe:** sólidos sedimentables

**RPM:** revoluciones por minuto

**%RT:** porcentaje de remoción de turbidez

## Índice

1. Introducción.....	8
2. Generalidades.....	10
2.1. Aguas residuales.....	<b>10</b>
2.2. Tratamiento de aguas residuales.....	<b>12</b>
2.3. Tratamiento primario de aguas residuales.....	<b>14</b>
2.3.1. Decantación primaria.....	15
2.3.2. Tratamiento fisicoquímico.....	15
2.4. Coagulación-floculación.....	<b>15</b>
2.5. Coloides.....	<b>19</b>
2.5.1. Superficie específica de las partículas coloidales.....	20
2.5.2. Desestabilización de coloides.....	20
2.5.3. Compresión de la doble capa.....	20
2.5.4. Neutralización de cargas por adsorción.....	21
2.5.5. Atrapamiento de partículas dentro de un precipitado.....	21
2.5.6. Absorción y puente.....	22
2.6. Tipos de coagulantes.....	<b>22</b>
2.6.1. Coagulantes naturales.....	23
2.7. <i>Aloe barbadensis</i> Miller.....	<b>25</b>
2.7.1. Composición química.....	28
2.8. Coagulante natural Aloe Vera.....	<b>29</b>
2.9. Caracterización fisicoquímica de <i>Aloe barbadensis</i> Miller.....	<b>32</b>
2.9.1. Color.....	32
2.9.2. Valoración de granulado.....	35
2.9.3. Carbohidratos.....	36
2.10. Grupos funcionales.....	<b>38</b>
2.10.1. Espectroscopia infrarroja (FTIR).....	40
2.11. Pruebas de jarras.....	<b>42</b>
3. Planteamiento del problema.....	43
4. Justificación.....	43
5. Hipótesis.....	44
6. ¿Pregunta de investigación?.....	44
7. Objetivo general.....	45
7.1. Objetivos específicos.....	<b>45</b>
8. Materiales y métodos.....	46
8.1. Caracterización de las aguas residuales.....	<b>46</b>

<b>8.2. Obtención y caracterización del coagulante Aloe <i>Barbadensis</i> Miller en polvo</b>	<b>50</b>
8.2.1. Procedimiento de extracción del coagulante en polvo.....	50
8.2.2. Caracterización del coagulante .....	51
8.2.3. Espectroscopia infrarroja (FTIR).....	51
<b>9. Evaluar el porcentaje de remoción de turbiedad y sólidos suspendidos.....</b>	<b>52</b>
9.1. Prueba de jarras.....	<b>52</b>
<b>10. Resultados .....</b>	<b>53</b>
10.1. Caracterización de las aguas residuales .....	<b>53</b>
<b>11. Discusión .....</b>	<b>66</b>
<b>12. Conclusiones .....</b>	<b>71</b>
<b>13. Bibliografía.....</b>	<b>82</b>

## Índice de figuras

Figura 1: Etapas de la línea del tratamiento de aguas residuales (Mihelcicy Zimmerman, 2011). .....	14
Figura 2: Proceso de coagulación-floculación(Arcila y Peralta, 2015).....	16
Figura 3: Proceso de coagulación(López y Rodriguez, 2014) .....	17
Figura 4: Tamaño de partículas coloidales (valencia, 1992).....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 5: Composición química del gel de sábila (Hegggers, et al., 1993; Angel, .....	29
Figura 6: Estructura química del polisacárido (acemanano)(Marante, 2003).....	30
Figura 7: Representación del sistema CIE L*a*b* o CIELAB(Ibraheemet al., 2012).....	34
Figura 8: Estructura del complejo generado a partir de la reacción de fructosa con fenol en medio ácido .....	37
Figura 9: Espectro electromagnético(Socrates, 2006) .....	41
Figura 10: Pruebas de jarras (Padilla, 1999). .....	42
Figura 11: Localización de los sitios de muestreo del agua residual doméstica. Google Earth Pro.....	46
Figura 12: Localización de los sitios de muestreo del agua residual acuícola. Google Earth Pro. ....	47
Figura 13: Espectroscopia(FTIR) A. barbadensis Miller. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 14: Evaluación de pH de las aguas residuales tratadas.....	57
Figura 15: Remoción de la eficiencia de turbiedad en el (AA).....	58
Figura 16: Remoción de la eficiencia de turbiedad en el agua residual acuícola (AD).....	59
Figura 17: Comportamiento de DBO <sub>5</sub> (mg/L)antes y después del tratamiento primario.....	60
Figura 18: Valoración de DQO(mg/L) en el tratamiento del agua residual(AA) y (AD).....	61
Figura 19: Niveles de nitrógeno (mg/L) del agua residual (AA) y (AD).....	62
Figura 20: Eficiencia del coagulante natural en polvo A. barbadensis Miller para la remoción de grasas y aceites (mg/L) .....	63
Figura 21: Resultados de SST (mg/L) de las aguas residuales (AA) y (AD).....	64

## Índice de cuadros

Cuadro 1: Contaminantes del agua residual.....	10
Cuadro 2: Contaminantes en el tratamiento de aguas residuales.....	13
Cuadro 3: Factores que influyen en la coagulación.....	18
Cuadro 4. Resumen de coagulación-floculación.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Cuadro 5: Efecto al disminuir el tamaño de las esferas.....	20
Cuadro 6: Tipos de coagulantes.....	23
Cuadro 7: Taxonomía del Aloe vera.....	25
Cuadro 8: Usos del Aloe barbadensis Miller.....	27
Cuadro 9: Principales atributos que determinan las propiedades sensoriales.....	32
Cuadro 10: Índice de Hausner (H).....	36
Cuadro 11: Curva Estándar de Glucosa.....	38
Cuadro 12: Principales grupos funcionales.....	39
Cuadro 13: Longitud de onda para distintos rangos en el infrarrojo. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Cuadro 14: Descripción de la localización de los sitios de muestreo. Google Earth Pro. ...	47
Cuadro 15: caracterización establecida en el agua residual doméstica y acuícola.....	48
Cuadro 16: Condiciones de operación.....	52
Cuadro 17: Caracterización del agua acuícola y domestica.....	53
Cuadro 18: Resultados de color.....	54
Cuadro 19: Rango de granulometría.....	54
Cuadro 20: Absorbancias y concentraciones de cada muestra.....	55
Cuadro 21: Características del agua residual acuícola tratada y no tratada en base a la Norma-001-SEMARNAT-1996. ....	65

## 1. Introducción

El agua residual es aquella cuyas características han sido modificadas por actividades humanas y que, por su calidad, requieren de un tratamiento previo antes de ser reusadas o descargadas a un cuerpo de agua (Mihelcic y Zimmerman, 2011).

Ya que son, aguas usadas de cualquier combinación de actividades domésticas, industriales, comerciales o agrícolas, escorrentía superficial o aguas pluviales y cualquier afluencia o infiltración de alcantarillas (Zurbrügg, *et. al*, 2011).

Siendo una mezcla de contaminantes como Microorganismos patógenos (bacterias, virus, parásitos) que producen enfermedades como hepatitis, cólera, disentería, diarreas, giardiasis, etcétera. Materia orgánica e inorgánica en suspensión como disueltos (heces, papel higiénico, restos de alimentos, jabones y detergentes) que consume el oxígeno del agua y produce malos olores. Turbiedad, la cual contiene partículas coloides, los cuales son responsables de que el agua no se vea cristalina, nutrientes como nitrógeno y fosforo que propician el desarrollo desmedido de algas y malezas acuáticas en arroyos, ríos y lagunas, hasta causar la eutrofización y entre otros contaminantes como aceites, ácidos, pinturas, solventes, venenos, etc., que alteran el ciclo de vida de las comunidades acuáticas (Curran, 2006). Denominándose a este tipo de características “parámetros fisicoquímicos”, los cuales se, determinan para saber qué tipo de tratamiento requiere el efluente residual (Andréis, 2003; Cuenca *et al.*, 2012; Sperlig, 2017).

Las tecnologías para tratar las aguas residuales se pueden dividir en tres categorías; los métodos químicos, físicos y biológicos en tratamientos primarios, secundarios y terciarios (Noyola *et al.*, 2013).

El objetivo del tratamiento primario es eliminar toda partícula, cuyas dimensiones obstruyan los procesos consecuentes; este consta del cribado o mallas de barrera, flotación o la eliminación de grasa y la coagulación floculación (Ruíz, 1987).

La coagulación es la desestabilización química de las partículas coloides que se producen al neutralizar las fuerzas que las mantiene separadas por medio de la adición de un coagulante y la energía por medio de un mezclador (Cardenas, 2000). El proceso de coagulación es la adición de compuestos químicos naturales que provocan la formación de polímeros que atrapan o encapsulan las partículas coloides a mayor agitación formando un floculo. La floculación es posterior a la coagulación, con una agitación lenta

aglomerando lodos para una mejor sedimentación (Arcila y Peralta, 2015; Fayos *et al.*, 2003).

Para la coagulación-floculación se utilizan diferentes tipos de coagulantes: como los coagulantes metálicos inorgánicos, sales metálicas prehidrolizadas, polímeros orgánicos, que alteran el pH del agua a tratar y tienen difícil manejo y almacenamiento, además de que pueden presentar riesgo para la salud y el medio ambiente (Sotheeswaran *et al.*, 2011).

En cambio, los coagulantes naturales, pueden ser de origen animal o vegetal como semillas y plantas como *Moringa oleifera*, *Opuntia ficus-indica*, *Aloe barbadensis* Miller, entre otras. Estos son biodegradables y amigables para la salud y el medio ambiente, ya que sus compuestos activos pueden ser proteínas, polisacáridos, mucílagos, taninos y alcaloides, que permiten la desestabilización de coloides, remoción de sólidos disueltos y la absorción de metales pesados; no producen alcalinidad comparados con los coagulantes químicos, lo que evita cambios bruscos en su pH (Claros, 2014; Mihelcic y Zimmerman 2011; Gonzales, 2013).

El *Aloe barbadensis* Miller se caracteriza por poseer en el interior una sustancia viscosa, también llamado gel, el cual tiene un componente activo, llamado acemanano, el cual se define como un polisacárido mucilaginoso y polímero catiónico que constituye la mayor parte del mucílago de la planta (Valoyes, 2012; Marante, 2003).

Los polímeros catiónicos son usados como coagulantes primarios, ya que tienen una alta densidad de carga y poseen bajo peso molecular con carga positiva, neutralizando las cargas coloidales sin afectar el pH; estos pueden reemplazar el uso de coagulantes químicos como las sales de aluminio (Reyes, 2015).

El acemanano, es el responsable de que el *Aloe barbadensis* Miller, se utilice como coagulante-floculante en aguas residuales, ya que al entrar en contacto con el agua forma una sustancia viscosa que tiene gran facilidad para atrapar coloides. Este compuesto está considerado como ingrediente activo, coagulante natural para el tratamiento de agua por su mecanismo de desestabilización de materia orgánica (Filho, 2008; Hamman, 2008; Maqui, 2017; Femenia *et al.*, 1999; Nindo *et al.*, 2009; Baruah *et al.*, 2016; Filho, 2008; Hamman, 2008; Maqui, 2017).

Los coagulantes naturales, son biodegradables y amigables con el medio ambiente. Ya que se ha comprobado que el lodo se utiliza como fertilizante orgánico en la agricultura (Malqui, 2017). Por lo anterior, el presente proyecto tiene el objetivo de evaluar y

determinar la eficiencia de remoción de turbidez y sólidos suspendidos del coagulante natural *Aloe barbadensis* Miller en aguas residuales domésticas y acuícolas.

## 1. Generalidades

### 1.1. Aguas residuales

Son aquellas que han participado en actividades humanas y que por su calidad requieren de un tratamiento previo ya que las aguas residuales son una combinación del líquido (agua) y residuos extraídos de residencias, instituciones, establecimientos comerciales e industriales, junto con el agua subterránea, superficial y pluvial que puedan mezclarse (Cheremisiuff, 2002).

El término aguas residuales, describe las aguas no tratadas, los lodos de aguas residuales o los desechos de tanques sépticos. El tratamiento de aguas residuales reduce el contenido de agua y elimina la suciedad, pero no mata ni elimina a todos los microorganismos. Los contaminantes de aguas residuales son una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos (Gonzales, 2003).

Cuadro 1: Contaminantes del agua residual

Contaminante	Fuente	Importancia ambiental
Sólidos suspendidos	Uso doméstico, desechos industriales y agua infiltrada a la red	Causa depósitos de lodo y condiciones anaerobias en ecosistemas acuáticos
Compuestos orgánicos biodegradables	Desechos domésticos e industriales	Incrementa la demanda de oxígeno en los cuerpos receptores y ocasiona condiciones indeseables
Microorganismos patógenos	Desechos domésticos	Causan enfermedades transmisibles
Nutrientes	Desechos domésticos e industriales	Pueden causar eutroficación
Compuestos orgánicos refractarios	Desechos industriales	Pueden causar problemas de sabor y olor; pueden ser tóxicos o carcinogénicos
Metales pesados	Desechos industriales, minería, etc.	Son tóxicos, pueden interferir con el tratamiento y reúso del efluente
Sólidos inorgánicos disueltos	Debido al uso doméstico o industrial se incrementan con respecto a su nivel en el suministro de agua	Pueden interferir con el reúso del efluente

Tomado y adaptado de González, 2003.

Existen diferentes tipos de aguas residuales, tales como:

**Aguas residuales domésticas:** Están compuestas en más del 98% por agua que contiene contaminantes como sólidos suspendidos, compuestos orgánicos (40-60% proteínas, 25-50% carbohidratos, 10% aceites y grasas), nutrientes (nitrógeno y fósforo), metales, sólidos disueltos inorgánicos, sólidos inertes, sólidos gruesos, compuestos no biodegradables y organismos patógenos (Ramalho, 1997; Campos, 1999).

**Aguas residuales urbanas:** Los efluentes urbanos son una mezcla de aguas residuales domésticas y de industrias situadas en zona urbana. Estos efluentes presentan cargas orgánicas variables, pero al mezclarse entre sí y con los demás efluentes urbanos, dan como resultado aguas de bajas cargas orgánicas y complejas en cuanto a su composición. Se consideran efluentes de baja carga aquellos que presentan una DQO inferior a los 2,000 mg/L. Las aguas residuales urbanas presentan concentraciones generalmente por debajo de los 1000 mg/L de DQO, encontrándose habitualmente entre 300 y 700 mg DQO/L. La concentración orgánica depende de diversos factores, como la presencia de un contenido en materia de suspensión variable, entre 100 y 400 mg SS/L, que pueden contribuir en un 30-70% a la DQO. Otros parámetros importantes son la DBO, que se sitúa en torno a un 40-60% de la DQO, los nutrientes, como el nitrógeno, el fósforo y la carga bacteriana de origen fecal, incluyen diferentes tipos de microorganismos patógenos. Para la eliminación de nutrientes y la desinfección se lleva a cabo tratamientos terciarios (García *et al.*, 1988; Ronzano y Dapena, 2002).

**Aguas residuales acuícolas:** La acuicultura es una actividad de gran importancia económica a nivel mundial como generadora de empleos, divisas y productos alimenticios con alto valor nutricional y accesible a un gran sector de la población. Sin embargo, puede llegar a ocasionar impactos negativos ambientales de sus efluentes a la hora de su descarga en alcantarillado, riego acuícola o en cuerpos de agua (ríos), ya que estos están mayormente asociados a la elevada carga orgánica como sólidos suspendidos totales, sólidos inorgánicos totales, materia orgánica particulada, clorofila, la calidad del sedimento y las altas concentraciones de nutrientes como nitrógeno y fosforo las cuales a su vez son resultado de inadecuadas prácticas de manejo (sobre todo alimentación y fertilización) de los sistemas de cultivo. (Guardado, *et al.*, 2014; Casillas *et al.*, 2006, Miranda *et al.*, 2007).

**Aguas residuales industriales:** son las que resultan de un proceso productivo, incluyendo a las provenientes de la actividad minera, agrícola, energética, agroindustrial entre otras (Gómez, 2011).

Estas aguas se caracterizan por su elevada carga orgánica, presencia de componentes tóxicos para los microorganismos (que son responsables de los procesos biológicos de tratamientos), presencia de sustancias no biodegradables o difícilmente biodegradables (García, 2010).

Estas aguas residuales en general deben ser tratadas antes de ser rehusadas o descargadas a un cuerpo de agua, que implican la descomposición de compuestos orgánicos o inorgánicos ya sea complejo o simple por un tratamiento fisicoquímico o biológico. Ya que al no tratar se generan problemática al ambiente como gran cantidad de gases malolientes, las aguas contaminadas con materia orgánica ayudan al desarrollo de (DBO) causando la muerte de peces, también puede contener nutrientes como fosfato que estimulan al crecimiento de aguas acuáticas conduciendo a una eutrofización de lagos y arroyos. Las aguas no tratadas contienen numerosos agentes patógenos los causantes de enfermedades. Por estas razones es necesario un tratamiento previo antes darle un uso o descargar las aguas residuales (Topare y Manfe, 2011).

## **2.1. Tratamiento de aguas residuales**

Una planta de tratamiento de aguas residuales evacua sólidos que incluyen objetos de mayor tamaño como trapos, madera, plástico, entre otros; reduce la materia orgánica y los contaminantes por medio de bacterias y microorganismos, una vez utilizados estos son separados del agua; restaura la presencia de oxígeno, la cual es importante ya que debe tener suficiente oxígeno para sostener la vida (Troconis, 2010).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales reciben muchos metros cúbicos de aguas industriales, domésticas, acuícolas y de escorrentías, las cuales varían en cantidad, composición y de esto se basa para saber que tratamiento se dará al efluente (Mihelcic y Zimmerman, 2011).

Para garantizar la tratabilidad del agua residual, se hace necesario eliminar todas las impurezas presentes en ella, para lograr este objetivo es preciso combinar varios tratamientos elementales cuyas bases pueden ser físicas, químicas o biológicas. A través de estos procesos se remueven las partículas suspendidas, coloidales y disueltas, en aguas residuales (Brito, 2017).

Cuadro 2: Contaminantes en el tratamiento de aguas residuales

<b>Contaminantes</b>	<b>Descripción</b>
<b>Sólidos suspendidos</b>	Los sólidos en suspensión pueden conducir al desarrollo de depósitos de lodo en condiciones anaeróbicas cuando las aguas residuales no tratadas se descargan en el medio ambiente acuático.
<b>Orgánicos biodegradables</b>	Compuesto principalmente de proteínas, carbohidratos y grasas, los compuestos orgánicos biodegradables se miden más comúnmente en términos de DBO y DQO. Si se descargan sin tratar al medio ambiente, su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos de oxígeno natural y al desarrollo de condiciones sépticas.
<b>Patógenos</b>	Son entidades biológicas bacterias, virus, parásitos u otros organismos capaces de producir enfermedades en el ser humano, en los animales o en los vegetales. En el caso del agua, estos microbios suelen proceder de los desechos de carácter orgánico que se han vertido en ríos, lagos o embalses sin haber sido tratados previamente, y de forma adecuada, para reducir su carga contaminante.
<b>Nutrientes</b>	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se descargan al medio ambiente acuático, estos nutrientes pueden llevar al crecimiento de la vida acuática no deseada. Cuando se descargan en cantidades excesivas en tierra, también pueden conducir a la contaminación del agua sucia.
<b>Pesticidas o plaguicidas</b>	Estos orgánicos tienden a resistir los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Los ejemplos típicos incluyen surfactantes, fenoles y pesticidas agrícolas.
<b>Metales pesados</b>	Los metales pesados generalmente se agregan a las aguas residuales de las actividades comerciales e industriales y es posible que se deban eliminar para reutilizarlas.
<b>Sólidos disueltos inorgánicos</b>	Los constituyentes inorgánicos, como el calcio, el sodio y el sulfato, se agregan al suministro de agua doméstica original como resultado del uso del agua y es posible que se deban eliminar para reutilizar las aguas residuales.

Tomado y adaptado de Muttamara, 1996.

Las aguas residuales consisten en dos componentes, un efluente líquido y un constituyente sólido, conocido como lodo. Existen dos formas naturales de tratar las aguas residuales; una es dejar que se asienten en el fondo de los estanques, permitiendo que el material sólido se deposite en el fondo. Posteriormente se trata la corriente superior de residuos con sustancias químicas para reducir el número de contaminantes dañinos presentes. El segundo método consiste en la utilización bacteriana para degradar la materia orgánica; conocido como tratamiento de lodos activados, la cual requiere oxígeno para mantener su metabolismo (Noloya *et al.*, 2013). Los sistemas de tratamiento de aguas residuales se dividen frecuentemente en subsistemas primarios, secundario y terciario (Valdez y González, 2003).

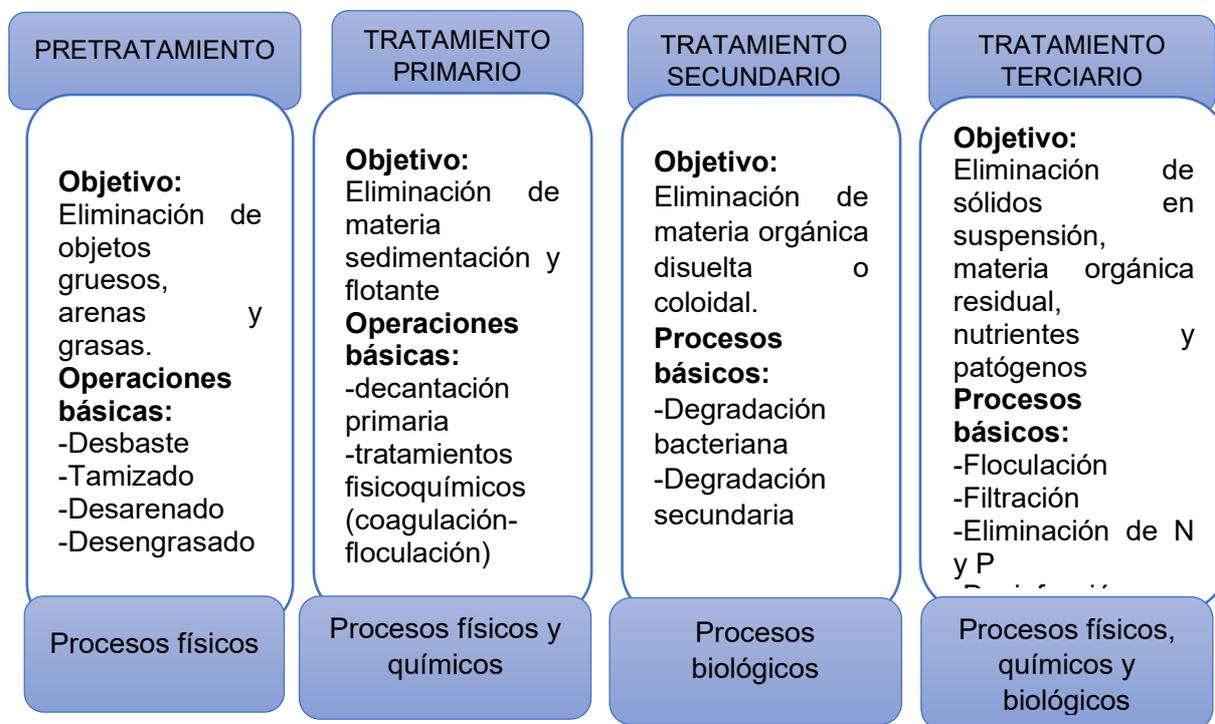


Figura 1: Etapas de la línea del tratamiento de aguas residuales (Centa, 2013).

## 2.2. Tratamiento primario de aguas residuales

El tratamiento primario está diseñado para eliminar por efecto de la gravedad la materia orgánica e inorgánica, (DBO) un 25-50%, grasas y aceites un 65% y (SS) un 50-70% y en partes mínimas se elimina nitrógeno, fosforo y metales pesados, por medio de la sedimentación (Sonune y Ghate, 2004). Los tratamientos primarios más habituales son:

### **2.2.1. Decantación primaria**

Es donde se elimina la mayor parte de los sólidos sedimentables, bajo la acción exclusiva de la gravedad. La sedimentación es el proceso de clarificación con base a la concentración y tipo de partículas, las cuales se sedimentan, para después ser tratadas o desechadas de acuerdo con su normatividad. Existen cuatro tipos de sedimentación de partículas: a) discreta b) floculenta c) de zona d) espesamiento y compresión y los tres tipos principales de tanques sedimentadores son: de flujo horizontal, de flujo radial y de flujo ascensorial, que puede tener forma rectangular o circular (Díaz y Rojas, 2017; García, *et al.*, 2006).

### **2.2.2. Tratamiento fisicoquímico**

Este se basa mediante la adición de coagulantes químicos como hierro o aluminio, los cuales eliminan sólidos suspendidos y partículas coloides, donde se sedimentan hasta formarse un lodo en el proceso de coagulación-floculación. Este pretratamiento es de mayor utilidad para la separación de partículas coloides, los cuales se agregan a las aguas residuales sin tratar dando como resultado la desestabilización de materia orgánica e inorgánica y se aplica cuando (Odegard, 1998; García *et al.*, 2006):

- ✓ Existen aguas residuales industriales que pueden afectar negativamente al tratamiento biológico.
- ✓ Se desea evitar la sobrecarga en el posterior tratamiento biológico.
- ✓ Se necesita la reducción del contenido de fósforo.

### **2.3. Coagulación-floculación**

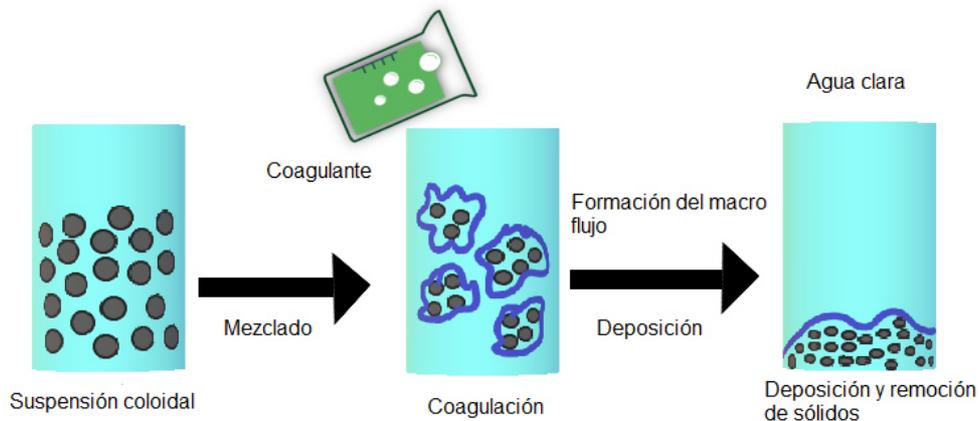


Figura 2: Proceso de coagulación-floculación (Arcila y Peralta, 2015).

Mediante la coagulación-floculación se remueve del 80 al 90% del total de la materia suspendida, del 40 al 70% de DBO<sub>5</sub>, del 30 al 60% de DQO y del 80 al 90% de bacterias, con respecto a la cantidad de sólidos coloidales presentes en el agua residual (Robles *et al.*, 2000). La coagulación ha sido definida como la desestabilización eléctrica de las partículas coloides y la floculación es la unión de estas para formar el floculo (Healy *et al.*, 1963; Kirchmer *et al.*, 1975).

Este proceso es para la remoción de turbidez que no se pueden sedimentar fácilmente, la remoción de color, olor y sabor, eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos que pueden ser separados por este tratamiento, remoción de plancton y algas (Valencia, 1992)

Este tratamiento consiste en la dosificación de compuestos químicos o naturales que provocan la formación de polímeros que atraen las partículas coloides que implica reacciones de transferencia de masa, constando de varias etapas como: la desestabilización de partículas por medio de un mezclado, la interacción contaminante-coagulante, favorecer la agrupación de partículas (floculación) (Kiral y Bautista, 2015).

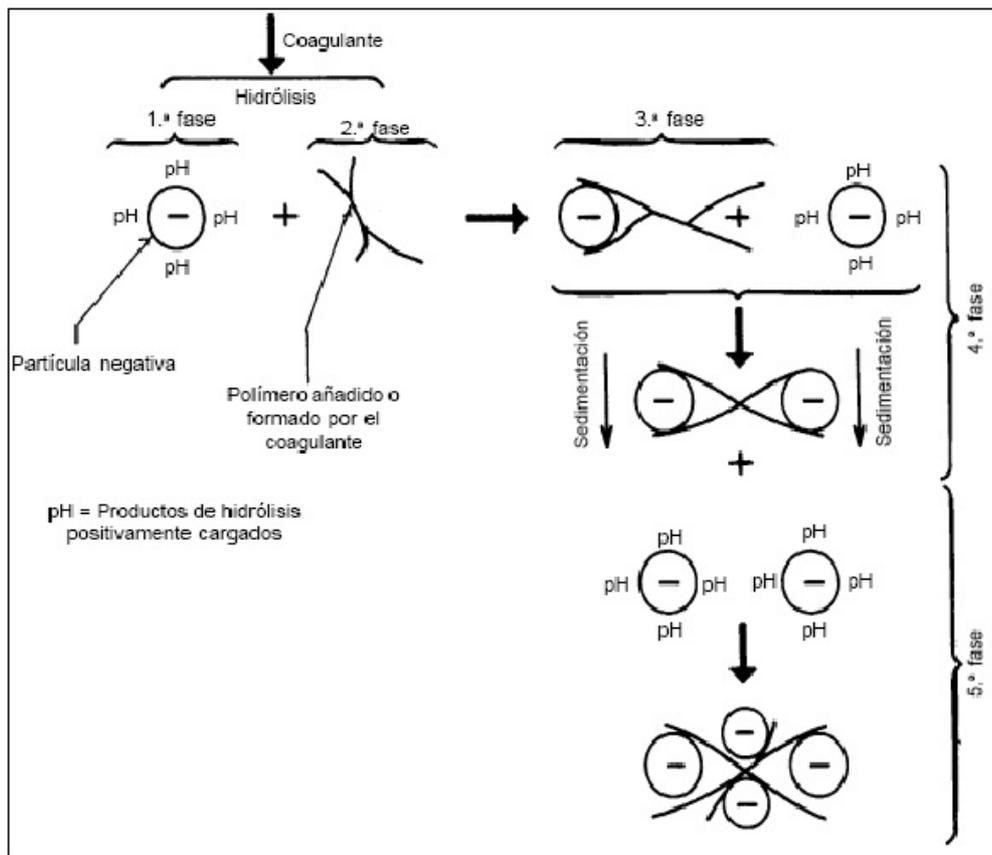


Figura 3: Proceso de coagulación (López y Rodríguez, 2014)

Este proceso se utiliza para la: remoción de turbidez (coloides) de partículas orgánicas o inorgánicas para después sedimentarse rápidamente; elimina las algas y plancton en general y sustancias productoras de sabor, color y olor, en algunos casos precipita químicos suspendidos (Osorno, 2009; Fuentes, 2005).

Cuadro 3: Factores que influyen en la coagulación

<b>Valencia</b>	Entre mayor sea la valencia del ion, más efectivo resulta como coagulante.
<b>Capacidad de cambio</b>	Medida de la tendencia a remplazar cationes de baja valencia por otros de mayor valencia, provocando la desestabilización y aglomeración de partículas en forma muy rápida.
<b>Tamaño de las partículas</b>	Estas deben poseer un diámetro inferior a una micra. Entre un diámetro de uno a cinco micras, sirve como núcleos de flóculo, en cambio de diámetro superior a cinco micras, son demasiado grandes para ser incorporadas en el flóculo.
<b>Temperatura</b>	Cambia el tiempo de la formación del flóculo, entre más fría el agua, la reacción es más lenta y el tiempo de formación del flóculo es mayor.
<b>Concentraciones de iones H<sup>+</sup> o pH</b>	Cada coagulante tiene un pH óptimo en la cual una buena floculación ocurre en el tiempo más corto y con la misma dosis de coagulante.
<b>Relación cantidad-tiempo</b>	La cantidad de coagulante es inversamente proporcional al tiempo de formación del flóculo.
<b>Alcalinidad</b>	La alcalinidad guarda la relación con el pH y por lo tanto el contenido de alcalinidad del agua es uno de los factores por considerar en la coagulación.

Tomado y adaptado de Osorno, 2009; Fuentes, 2005.

La floculación se basa en la colisión o aglomeración de partículas coloidales suspendidas, por medio de un mezclado fisicoquímico con ayuda de un coagulante químico o natural, para formar flóculos de mayor tamaño capaces de ser separados por procesos subsecuentes como sedimentación o filtración de un líquido (Robles, *et al.*, 2000).

En el proceso de floculación es importante conseguir la formación del flóculo de mayor peso y cohesión posible, ya que estas características facilitan su eliminación. Normalmente, la floculación se analiza como un proceso causado por la colisión entre partículas. En ella intervienen, en forma secuencial, tres mecanismos de transporte (Rodríguez y Velasquez, 2015).

- Floculación pericinética o browniana. Se debe a la energía térmica del fluido.
- Floculación ortocinética o gradiente de velocidad. Se produce en la masa del fluido en movimiento.
- Sedimentación diferencial. Se debe a las partículas grandes, que, al precipitarse, colisionan con las más pequeñas, que van descendiendo lentamente, y ambas se aglomeran.

## Coloides

Cuadro 4. Resumen de coagulación-floculación

<b>Desestabilización de partículas (coagulación)</b>	Adsorción-neutralización	
	Puente químico	
	Sobresaturación	
<b>Trasporte de partículas (floculación)</b>	Ortocinético (>h)	Creado en el líquido por el gradiente de velocidad
	Pericinético (<h)	Por movimiento browniano
		Por sedimentación

Tomado y adaptado de Valencia, 1992

### 3. Coloides

Los coloides tienen la propiedad de estabilizarse con las moléculas del agua, formando enlaces fuertes, esto se debe a la repulsión electrostática ya que poseen cargas eléctricas de superficie de igual signo. Lo que provoca que no puedan eliminarse con la decantación simple; utilizando el tratamiento primario fisicoquímico la coagulación-floculación. Las características de los coloides dependen del tamaño entre  $1.0^{-3} \mu\text{m}$  y  $10^{-6} \mu\text{m}$ , sus formas pueden ser esféricas, semiesféricas, elipsoidales y filamentosos de distintas longitudes, formas de discos y formas indeterminadas; además pueden variar sus propiedades superficiales e interacciones eléctricas como partícula-disolvente, partícula-partícula y por lo general están cargados negativamente debido a la presencia de grupos carboxilos( $\text{COO}^-$ ) e hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) (Galvin, 2011).

Existen tres tipos de coloides en las aguas residuales: hidrofóbicos, hidrofílicos y coloides asociados. Los dos primeros se definen como partículas que son débiles o fuertes atraídas por el agua respectivamente clasificándose como coloides irreversibles y la tercera tipo es la aglomeración entre partículas coloidales y otras moléculas de tensoactivos como detergentes, grasas y aceites, que se agregan en forma de micelas clasificándose como coloides reversibles(Aguilar, *et al.*, 2002).

### 3.1.1. Superficie específica de las partículas coloidales

Como se puede comprobar en la tabla 5, las partículas coloidales se caracterizan por tener una gran superficie específica, definida como la relación entre el área superficial y la masa. Nótese el efecto de la disminución del tamaño de las esferas sobre el área total superficial y el tiempo de sedimentación requerido. La gran superficie específica da a los coloides una gran capacidad de adsorción y, por tanto, no resulta práctico sedimentar las partículas coloidales sin tratamiento químico previo (Ramos, 2017; Henry y Heink, 1999; Martel, 2000).

Cuadro 5: Efecto al disminuir el tamaño de las esferas

Diámetro de partículas	Escala de tamaños	Área superficial total	Tiempo requerido para sedimentar
10	Grava	3.15cm <sup>2</sup>	0.3 s
1	Arena gruesa	31.50 cm <sup>2</sup>	3.0 m/s
0.1	Arena fina	315.0 cm <sup>2</sup>	38.0 s
0.01	Sedimento	3150.00 cm <sup>2</sup>	33.0 min
0.001	Bacteria	3.15 cm <sup>2</sup>	55 horas
0.0001	Partícula coloidal	31.50 cm <sup>2</sup>	230 días
0.00001	Partícula coloidal	0.283 ha	6.3 años
0.000001	Partícula coloidal	2.83 ha	63 años

Tomado y adaptado de Martel, 2000.

### 3.1.2. Desestabilización de coloides

Los coagulantes químicos y naturales pueden llevar a cabo una desestabilización de coloides. Algunos pueden funcionar como coagulantes o ayudantes de coagulantes, y algunos coagulantes pueden alcanzar la desestabilización coloidal por más de un método. Se presentan cuatro métodos de los mecanismos de desestabilización de coagulantes (Walter y Weber, 1979).

### 3.1.3. Compresión de la doble capa

Es la interacción electrostática entre partículas (coloides), que se deben a la aparición de cargas superficiales (opuestas). Las cuales determinan la energía de interacción entre las partículas y es, en muchos casos, la estabilidad de la suspensión contra la coagulación.

En cada interface entre un sólido y el agua, existe una doble capa eléctrica. Esta capa está formada por partículas con carga y un exceso igual de iones con carga contraria (contraiones), que acumula el agua cerca de la superficie de la partícula (Báez, 2012; Mondragon *et al.*, 2014). Esta desestabilización por los contraiones se lleva a cabo por compresión de la capa difusiva que rodea a las partículas coloidales (Valencia, 1992).

#### **3.1.4. Neutralización de cargas por adsorción**

Los coagulantes tienen la capacidad de desestabilizar una dispersión coloidal, siendo una mezcla de interacciones coagulante-coloides, coagulantes-disolvente y coloides-disolvente. Según el tipo y magnitud de estas interacciones, la capacidad que tiene un coagulante para ocasionar la desestabilización de una dispersión coloidal es base de la energía implicada en una interacción electrostática. Esta energía electroquímica se puede presentar ( $z_c F \psi_0$ ), en donde  $z_c$  es la carga del ion coagulante,  $F$  es la constante de Faraday y  $\psi_0$  es la diferencia de potencial a través de la capa difusa (Aguilar *et al.*, 2002).

#### **3.1.5. Atrapamiento de partículas dentro de un precipitado**

Si ciertas sales metálicas se agregan al agua o al agua residual en cantidades suficientes, se producirá una rápida formación de precipitados. Los coloides pueden servir como núcleos de condensación para estos precipitados o pueden quedar atrapados a medida que los precipitados se asientan. La eliminación de coloides de esta manera se denomina frecuentemente coagulación de barrido por floculación. Se han informado varias características que distinguen la coagulación de barrido de floculo de la compresión de doble capa y la adsorción. Existe una relación inversa entre la dosis óptima de coagulante y la concentración de coloides que se eliminarán. A bajas concentraciones coloidales, se requiere un gran exceso de coagulante para producir una gran cantidad de precipitado que enrede las partículas relativamente pocas coloidales a medida que se asienta. A altas concentraciones de coloides, la coagulación ocurrirá a una dosis química más baja porque los coloides sirven como núcleos para mejorar la formación de precipitados. Las condiciones óptimas de coagulación no corresponden a un potencial zeta mínimo, sino que dependen del pH dependiendo de la relación solubilidad pH para ese coagulante (Kotera y Furusawa, 1970).

### **3.1.6. Absorción y puente**

La desestabilización por adsorción es producida por la adición de especies hidrolizadas de polímeros sintéticos y naturales de cadena larga; y iones metálicos hidrolizados, que sirven como puente a las partículas. La teoría del puente químico supone, que las moléculas de los polímeros contienen grupos químicos; que pueden adherirse a la superficie de las partículas coloidales en uno o más sitios de adsorción. Los polímeros contienen varios sitios ionizables que pueden unirse a varias partículas coloidales, es decir, los polímeros actúan como un puente químico entre las partículas permitiendo su aglomeración y decantación. La adición excesiva de polímeros provoca la reestabilización de los coloides; ya que si el polímero no encuentra otra partícula con la que pueda unirse, buscará otro sitio de adsorción con la partícula original impidiendo la formación de flóculos (Sawyer *et al.*, 2001; Vargas, 1972).

### **3.2. Tipos de coagulantes**

Los coagulantes actúan de manera diferentes en el tratamiento de las aguas residuales, dependiendo de su calidad, cantidad y características del agua que se va a tratar (Fuentes, 2005).

En la clarificación del agua se usan diferentes coagulantes como los químicos, sintéticos y naturales, los cuales se ha utilizado desde tiempos antiguos. El sulfato de aluminio (alumbre), el cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), el sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), el cloruro de poli aluminio y los coagulantes poliméricos sintéticos orgánicos, son los coagulantes de mayor demanda para la eliminación de la turbidez del agua (Aziz *et al.*, 2007).

Estos, pueden llegar a superar el 95% de remoción de materia orgánica y que gracias a su base de polímero puede plantearse a las necesidades provistas. La utilización de polímeros aniónicos para la desestabilización de coloides negativos, indica que los iones metálicos divalentes deben y están presente en adición directa y proporcionar un tamaño de polímeros mínimos con el fin de vencer la barrera energética entre partículas coloidales y puede tener lugar la sobredosificación sobre agitación. La desestabilización con polímeros aniónicos es más específica que cuando se utilizan sales metálicas. las sales inorgánicas que se forman con  $\text{Al(III)}$  y  $\text{Fe(III)}$  se adsorben en la mayor parte de la interfase, mientras que los polímeros aniónicos sintéticos se adsorben en los lugares de

adsorción adecuados. Los polímeros catiónicos se usan para desestabilizar coloides negativos, se lleva a cabo por la neutralización de carga, por enlaces de puente o por una combinación de estos dos mecanismos. Ambos métodos indican una correlación estequiométrica entre la concentración coloidal y la dosificación del coagulante. Los polímeros catiónicos de bajo peso molecular pueden actuar como coagulantes efectivos para los coloides negativos presentes en el agua residual, ya que no es necesario sobrepasar la barrera energética potencial cuando ocurre la neutralización de carga. Al utilizar cualquier tipo de coagulante se requiere de un análisis experimental previo, donde las condiciones específicas de los polímeros orgánicos sintéticos, aniónicos, catiónicos o no-iónicos, puede actuar para una determinada agua residual (Walter y Weber, 1979; Veloz, 2018).

Cuadro 6: Tipos de coagulantes

Coagulantes	Tipos de coagulantes
Metálicos inorgánicos	Sulfato de aluminio (alumbre), $Al_2(SO_4)_3$ ; aluminato de sodio ( $Na_2Al_2O_4$ ); cloruro de aluminio ( $AlCl_3$ ); sulfato ferroso ( $Fe_2(SO_4)_3$ ) y cloruro ferroso ( $FeCl_3$ ).
Metálicas prehidrolizadas	Echas de alumbre y sales de hierro e hidróxido bajo condiciones controladas; incluye cloruro de polialuminio (PACl), sulfato de polialuminio (PAS) y cloruro de polihierro.
Polímeros orgánicos	Polímeros catiónicos, polímeros aniónicos y polímeros no iónicos.
Coagulantes iónicos	Poliacrilamidas, polímeros del óxido de etileno
Coagulantes naturales	<i>Opuntia</i> spp., <i>Moringa oleifera</i> y <i>Aloe barbadensis</i> Miller, etc.

Tomado y adaptado de: Bratby, 1980; Cardeas, 2000; Mihelcic y Zimmerman, 2011

### 3.2.1. Coagulantes naturales

Los coagulantes naturales pueden reemplazar a los coagulantes químicos, como el aluminio, el cual es el de mayor uso para la tratabilidad de las aguas, ya que estos generan enfermedades como el Alzheimer y cáncer y sus residuos (lodos) deben ser aislados de la población siendo tóxicos para la salud humana y el medio ambiente (Arias, 2017; Gauthier *et al.*, 2000; Flaten, 2001).

Los coagulantes naturales pueden ser de origen animal como el quitosano, que resulta de la desacetilación parcial de la quitina, la cual participa como elemento estructural en el exoesqueleto de los crustáceos. También existen los de origen vegetal los cuales se

obtienen de las semillas y otras partes de las plantas, como las especies *Moringa oleifera*, *Opuntia ficus-indica* y *Aloe barbadensis* Miller (Jahn, 1988; Cocolletzi *et al.*, 2009). Estos son amigables con el medio ambiente y libres de toxicidad. Sus compuestos activos pueden ser polisacáridos como manosa, taninos o alcaloides, por mencionar algunos, y se conforman comúnmente de varias macromoléculas. Estos pueden ser polímeros catiónicos, aniónicos o no iónicos o conocidos como polielectrolitos (Kumar y Asharuddin, 2017; Bolto y Gregory, 2007).

Las propiedades de los coagulantes naturales, permite la desestabilización de coloides, remoción de sólidos disueltos y la absorción de metales pesados, no producen alcalinidad en comparación con los coagulantes químicos, lo que no genera cambios bruscos en su pH (Sotheeswaran *et al.*, 2011).

En la literatura científica se encuentran diversos trabajos que han utilizado coagulantes naturales para la remoción de turbidez en agua. En 2013, Gonzales determinó la eficiencia de remoción de turbidez sintética (50-100 NTU) en aguas, utilizando extractos vegetales de semillas, las cuales fueron: Colorín (*Eritrina americana*), bellotas de Encino (*Quercus ilex*), Huizache (*Acacia farnesiana*), Muérdago (*Viscum album*) y Quebracho (*Senna candolleana*). Una vez realizada las pruebas de jarras, la semilla de Huizache obtuvo el 60% de remoción de turbiedad a un pH de 8, en comparación a las demás semillas que no obtuvieron una eficiencia de remoción.

En otro trabajo (Silgado *et al.*, 2012), se evaluó el uso de nopal (*Opuntia ficus-indica*), en el cual se utilizó agua superficial de río, la cual fue caracterizada con una turbidez inicial de 171 NTU y un pH de 8. Los resultados obtenidos permitieron establecer que, en las condiciones manejadas durante las pruebas de jarras, el coagulante natural alcanzó una eficiencia satisfactoria del 80% al 84.52%, es decir una turbidez baja de 24 NTU y un pH de 7.5; este último dato demuestra que el nopal como coagulante no altera el pH a un nivel ácido en comparación a los coagulantes químicos, esto quiere decir que sigue con una característica alcalina de pH 7.5 al agua tratada.

Por su parte Gazabon *et al.*, (2014) evaluó la eficiencia del nopal *Opuntia ficus-indica* como coagulante natural y el sulfato de aluminio como coagulante químico, los dos tipos de coagulantes se utilizaron con el fin de ver con cual se lograba una mayor remoción de turbidez en aguas superficiales (de río) con una turbidez inicial de 174 NTU y un pH de 6.55. Los ensayos se realizaron a escala laboratorio aplicando la prueba de jarras. Los análisis se realizaron con los diferentes tipos de coagulante (alumbre y mucílago de *Opuntia ficus-indica*), con una concentración de 35 mg/L y 40 mg/L a una velocidad de

agitación 100 rpm y 200 rpm donde la turbidez actuó como variable dependiente. Los resultados óptimos se obtuvieron a una velocidad de agitación de 200 rpm a una concentración de 40 mg/L donde se obtuvo una remoción de turbidez de 99.30%, alcanzando un pH de 5.51, mientras que con el mucílago *Opuntia ficus-indicase* logró una remoción de turbidez de 83.66%, alcanzando un pH de 6.55. Así, quedó demostrado que el coagulante natural es eficiente en la clarificación de aguas, sin embargo, el sulfato de aluminio presentó mayor remoción de turbidez.

### 3.3. *Aloe barbadensis* Miller

El Aloe Vera es una planta perenne de crecimiento herbáceo, se compone de raíz, tallo corto, hojas de color verde grisáceo y flores en época de floración. Las hojas crecen alrededor del tallo al nivel del suelo en forma de roseta, desde el centro hacia arriba crece el tallo 60 y 100 cm de altura, que al florecer forma densos racimos de flores tubulares amarillas o rojas; esta planta puede sobrevivir a temperaturas de 40°C y a temperaturas de congelación dependiendo de la salud de la raíz. De las especies más conocidas son el *A. Arborescens*, *A. PerrylBeker*, *A. Socotrino* y el *A. Barbadesis* (Grindlay, 1986; Campa, 1994).

Cuadro 7: Taxonomía del Aloe vera

Clasificación taxonómica	
Reino	Vegetal
División	<i>embriophyta-siphonogama.</i>
Subdivisión	angiosperma.
Clase	monocotiledoneae.
Orden	liliales.
Familia	liliaceae.
Subfamilia	asfondeloideae.
Tribu	aloinaeae.
Genero	Aloe.
Especie	vera.
Sinónimo	<i>barbadensis.</i>

Tomado y adaptado de: Ortiz y Picornell, 2009.

El tejido del parénquima de las hojas de aloe vera contiene más del 98% de agua, con más del 60% de materia seca compuesta de polisacáridos de alto peso molecular. Sus hojas de contiene zumo que es el látex presente debajo de la capa de la epidermis, que ocupa aproximadamente el 20-30% del peso de toda la hoja, muestras que la parte interior de la hoja contiene un gel insípido e incoloro en forma de pulpa o mucilago de las células (Femenia, *et al.*, 1999; Nindo, *et al.*, 2009; Baruah, *et al.*, 2016).

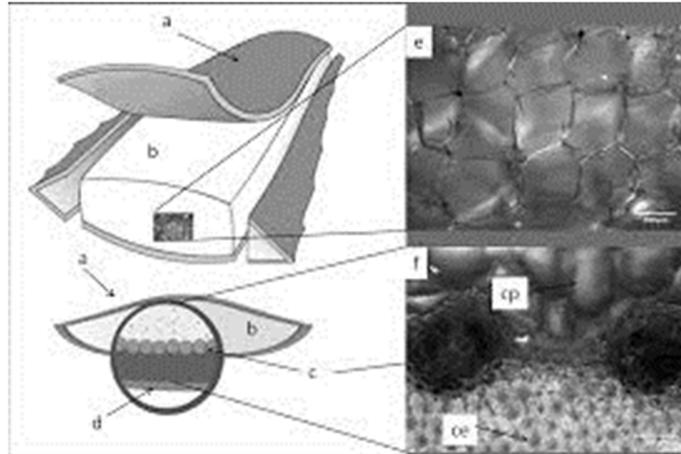


Tabla 1: Estructura y microestructura de la hoja de Aloe (Fernandez, *et al.*, 2012).

En la figura se muestran imágenes de microscopía de luz tomadas a una magnificación de 5x de las células del parénquima y de un corte seccional de la hoja de Aloe vera, donde se observan con gran detalle células internas del exocarpio (ce), células del parénquima (cp) y conductos de aloína (c).

- exocarpio
- pulpa o tejido parenquimático
- conductos de aloína
- cutícula

El Aloe vera tiene amplios usos en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética; así mismo, la parte que más se usa de esta planta es el gel, debido a sus propiedades funcionales, antioxidantes y terapéuticas. Un adecuado aprovechamiento de la planta, está asociado al contenido de sus componentes bioactivos, microestructura y los métodos para preservar y estabilizar los productos obtenidos a partir del gel (Fernandez, *et al.*, 2012; Vogler y Ernst, 1999).

Se pueden obtenerse diferentes derivados como: el exudado seco excretado del jugo de la aloína, el gel y gel en polvo, que es un jugo mucilaginoso presente en el centro de la

hoja que se obtiene o se liofiliza dependiendo como se requiera o el aceite, este se extrae por disolventes orgánicos (Saccu y Procida, 2001).

A lo largo de la historia se ha usado terapéuticamente como ungüento tópico, tabletas y cápsulas; cosmética como preparación de cremas, champús, cremas faciales, etc.; y como alimento como leche, helados, yogurts y jugo; siendo industrializada mundialmente. Actualmente se está estudiando sus propiedades como coagulante para el tratamiento de aguas sintéticas y superficiales (río) (Calderón, 2012; Machado, *etal.*, 1937).

El procesamiento de aloe vera inicia con la cosecha de la sábila; consiste en cortar las hojas a mano desde la base de la planta, las cuales se transportan a las plantas procesadoras.

El proceso de obtención de jugo involucra las siguientes etapas:

1. Lavado de hojas frescas con agua y soluciones bactericidas.
2. El fileteado, que es donde se remueve el gel con un cuchillo desde la base de la hoja abarcando su extremo superior y las partes laterales.
3. Molienda, la cual se homogeneiza en un triturador a temperatura ambiente. Mientras más largo sea el tiempo de molienda, mayor será el índice de oscurecimiento en el jugo del gel de *Aloe barbadensis* Miller, debido a las reacciones de pardeamiento enzimático, estabilizando el gel para mantener los compuestos activos.
4. Se filtra para la estabilidad del jugo de gel de sábila y se lleva a cabo la sedimentación de partículas en el producto.
5. Se pasteuriza, una vez pasteurizado se envasa en frascos de vidrio o de plásticos para la distribución.

Cuadro 8: Usos del *Aloe barbadensis* Miller

Usos	Procedencia
<b>Antiinflamatorio</b>	Su exudado, el cual tiene un éster de ácido cinámico de aloesina, demostró reducción de la inflamación
<b>Antibacterial</b>	Extracto, del 60% al 90% de concentración en la inhibición de bacterias
<b>Anticancerígeno</b>	Componentes activos identificados como antraquinonas y cromonas
<b>Aplicación cosmética y usos de la piel</b>	Aloína y gel

<b>Gastoprotectora</b>	Gel, el cual inhibió la producción de ácido gástrico, estimuló pepsina y secreciones mucosas en ratas
<b>Antivirales en el herpes simplex tipos 1 y 2, varicela e influenza h1v-1</b>	Antraquinonas naturales y otros compuestos similares contenidos en la aloína
<b>Detergente, germicida y fungicida</b>	Acido cinámico

Tomado y adaptado de: Dweck, 1999; Shelton, 1991; Sahu, *et al.*, 2013; Fernandez, *et al.*, 2012; Bonilla y Herrera, 2016; Schweizer, 1994.

### 3.3.1. Composición química

Al referirse al aloe vera, hay una distinción entre cada capa de la hoja. Se cree que el gel transparente interno, también conocido como capa mucilaginosa, es responsable de la mayoría de las propiedades terapéuticas de la planta, el 99% de esta capa es agua y el resto está hecho de glucomananos, aminoácidos, lípidos, esteroides y vitaminas. El gel de aloe contiene aproximadamente 55% de polisacáridos, 17% de azúcares, 16% de minerales, 7% de proteínas, 4% de lípidos y 1% de compuestos fenólicos (Namazi, 2009; Ahlawat y Khatkar, 2011).

La capa intermedia está compuesta de látex, una savia de color amarillo amargo, que contiene antraquinonas y glucósidos. Las moléculas de esta capa le dan al aloe sus efectos laxantes. Finalmente, la capa gruesa externa, o corteza, compuesta de 15-20 células, tiene una función protectora y sintetiza carbohidratos y proteínas. Los haces vasculares dentro de la corteza están compuestos de xilema y floema. El xilema ayuda a transportar agua y minerales desde las raíces a las hojas y el floema ayuda a transportar el almidón y otras pequeñas moléculas orgánicas. La composición química de la planta de aloe varía según la especie, el clima y las condiciones de crecimiento. Se ha estimado que hay más de 75 compuestos bioactivos contenidos en la hoja de aloe vera. Los múltiples compuestos han dado lugar a los muchos supuestos beneficios de la planta (Surjushe, *et al.*, 2008; Baruah y Bordoloi, 2016; Klein y Penneys, 1988; Rahman, *et al.*, 2017).

El Aloe Vera se compone químicamente la presencia de compuestos fenólicos que son generalmente clasificados en dos principales grupos: las cromonas, como la aloensina y las antraquinonas (libres y glicosiladas) como la barbaloína, isobarbaloína y la aloemodina; estos compuestos se encuentran en la capa interna de las células epidermales. La aloína es el principal componente del acíbar, que la planta secreta como defensa para alejar a posibles depredadores por su olor y sabor desagradable (Vega, *et al.*, 2005; Okamura, *et al.*, 1996).

Su gel o pulpa es una masa gelatinosa e incolora formada por células parenquimáticas, estructuradas en colénquima y células pétreas delgadas. El gel está constituido principalmente de agua, mucílagos y otros carbohidratos, ácidos y sales orgánicas, enzimas, esteroides, triacilglicéridos, aminoácidos, ARN, trazas de alcaloides, vitaminas y diversos minerales (Reynolds, 2004; Fernandez, *et al.*, 2012).

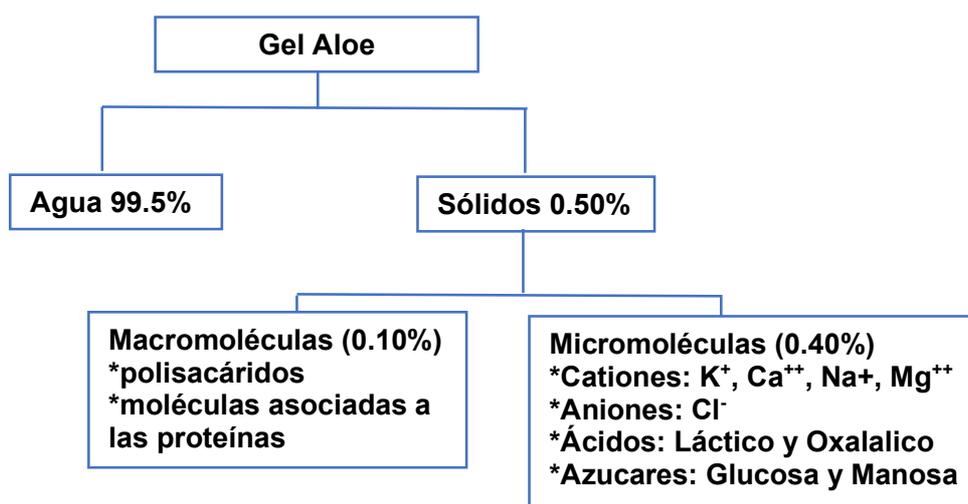


Figura 4: Composición química del gel de sábila (Hegggers *et al.*, 1993; Angel, 2010).

### 3.4. Coagulante natural Aloe Vera

El Aloe Vera se caracteriza por poseer en el interior una sustancia viscosa, también llamado gel o mucílago. Tras algunos estudios realizados se ha determinado que el Aloe vera, contiene más de 130 compuestos, entre ellos polisacáridos con distintas cantidades de manosa, glucosa y galactosa. Entre dichos compuestos también podemos encontrar a los glucomanos, galactoglucoarabinomanos, entre otros. Cabe señalar que en los últimos años se ha generado un gran interés por uno de sus componentes activos: el acemanano,

el cual se define como un polisacárido mucilaginoso que constituye la mayor parte del mucílago de Aloe vera, la cual es una mezcla de polímeros de varias cadenas de longitud con enlaces  $\beta$ -(1,4) unidos a mananos acetilados, donde se ha identificado la manosa como su componente principal con un porcentaje del 82%, seguido por glucosa y galactosa con 10.5 % y 4.5 % respectivamente (Valoyes, 2012; Marante, 2003).

El acemanano es un compuesto con acción inmunomoduladora que estimula la formación de leucocitos, aumenta la liberación de citoquinas, activa la fagocitosis e induce la síntesis de óxido nítrico por macrófagos, además presenta efectos antibacteriales, inhibe la replicación del virus del SIDA y potencializa la producción de anticuerpos contra el virus Coxsackie y se utiliza como coagúlate floculante en aguas residuales, ya que al entrar en contacto con el agua forma una sustancia viscosa que tiene gran facilidad para atrapar coloides. Este compuesto está considerado dentro de los tratamientos de agua por su mecanismo de desestabilización de materia orgánica (Filho, 2008; Hamman, 2008; Maqui, 2017).

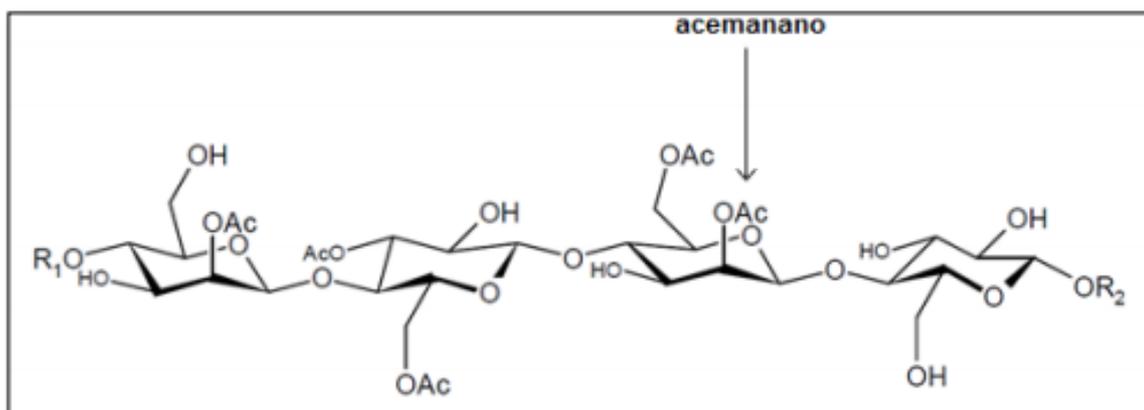


Figura 5: Estructura química del polisacárido (acemanano) (Marante, 2003).

En un estudio donde el Aloe vera y el alumbre fueron utilizados como coagulantes para el proceso de tratabilidad del agua superficial de río con una turbidez de nivel medio (45,5 NTU) y alto (101 NTU) (Kopytko *et al.*, 2014), ambos coagulantes se mezclaron para las pruebas de jarras, requiriendo 56 mg/L de alumbre con 5 mg/L de Aloe Vera para la tratabilidad de agua con turbidez media, mientras que el agua con turbidez alta requirió 24 mg/L de alumbre con 14 mg/L de Aloe Vera para lograr una eliminación de la turbidez superior al 90% en ambos casos; este trabajo ha demostrado que el coagulante Aloe vera es eficiente y sirve como coadyuvante en la fase de coagulación y floculación, Dando como resultado una remoción de turbidez del 95%. También se demostró que los desechos (flóculos) son menos abrasivos al utilizar y mezclar estos dos coagulantes para

tratar aguas residuales, ya que el coagúlate químico sulfato de aluminio es abrasivo y perjudicial a la salud.

Poco después, en 2017, Munavalli realizó un trabajo similar donde también utilizó Aloe Vera como coagulante mezclado con alumbre (sulfato de aluminio) para eliminar la turbidez de aguas. Para la eliminación de turbidez alta, se encontró que la eficiencia era del 76-81% y para el agua con turbiedad baja se encontró en un 60-65%. También se reportó que el Aloe Vera tiene menos efecto sobre otros parámetros de calidad del agua como el pH y la dureza. El uso del gel de Aloe vera con alumbre como coadyuvante puede ser una nueva alternativa para el tratamiento de aguas. Sin embargo, existen estudios como el de Nindo *et al.*, (2009) que demuestran que el extracto de Aloe por liofilización conserva sus propiedades fisicoquímicas, en comparación con otras metodologías para preservarlo.

En el mismo tenor de la utilización de aloe vera como coadyuvante en la clarificación de aguas, Malqui (2017) aplicó dos tipos de coagulantes naturales (Aloe Vera y *Opuntia ficus indica*) en polvo, obtenidos por el método de liofilización, fueron aplicados para el tratamiento de un canal para riego con un alto contenido de materia orgánica, donde se evidenciaron altos niveles de DBO<sub>5</sub> y DQO. Se aplicaron tres tratamientos (Aloe Vera L., *Opuntia ficus indica* y Aloe Vera L.+ *Opuntia ficus indica*) con concentraciones de 600, 700 y 800 mg/L. El estudio se realizó a nivel de laboratorio y demostró que, los dos coagulantes naturales (Aloe Vera L.+ *Opuntia ficus indica*) mezclados, a una dosis optima de 800 mg/L reducen el contenido de DBO<sub>5</sub> y DQO a un 80.64% y 90.11% respectivamente.

En 2019, Ramos y Paredes determinaron el efecto de la concentración del gel de *Aloe barbadensis* Miller en polvo (secado al sol) y el tiempo de floculación en la remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica biodegradable de una muestra de aguas residuales municipales. Utilizaron concentraciones de 2000 ppm y 3000 ppm con tiempos de floculación de 20 y 25 minutos respectivamente. Se concluyó que, utilizando la concentración de 3000 ppm en un tiempo de 25 minutos, se logró una remoción de turbidez de 88.49%, de sólidos suspendidos de 87.64% y de DBO<sub>5</sub> de 73.43%.

### 3.5. Propiedades sensoriales de e *Aloe barbadensis* Miller

o sensoriales de un producto y son aquellas que pueden ser captadas a través de sentidos. Tradicionalmente se trata de cinco sentidos: vista, oído, olfato, gusto y tacto. Las características sensoriales de un objeto se evalúan a través de atributos que, al ser captados por los sentidos, nos informan de la magnitud o cualidad del estímulo provocado, una vez que han sido interpretados por el cerebro. Por ejemplo, una impresión visual nos informa del color, brillo, tamaño y forma; entre otros órganos que nos dan información de diferentes maneras (Gutierrez, 2000; Manfugas, 2007; Utset, 2007).

### 3.6. Propiedades organolépticas de *Aloe barbadensis* Miller

Cuadro 9: Principales atributos que determinan las propiedades sensoriales

<b>Color</b>	Se aprecia por el sentido de la vista cuando le estimula la luz reflejada por un alimento, que contiene sustancias con grupos cromóferos capaces de adsorber parte de sus radiaciones luminosas, dentro de unas determinadas longitudes de onda.
<b>Sabor</b>	Sensación recibida en respuesta al estímulo provocado por sustancias químicas solubles sobre las papilas gustativas.
<b>Textura</b>	Propiedad organoléptica que resulta de la disposición y combinación entre si de elementos estructurales y diversos componentes químicos, dando lugar a una micro y macro estructuras, definida por diversos sistemas fisicoquímicos.
<b>Flavor</b>	Percepciones constituidas por estímulos olfato gustativo, táctil y cinestésicos, que permite caracterizar un objeto de los demás como tal.

Tomado y adaptado de: (Gutierrez, 2000)

#### 3.6.1. Color

El color es una percepción humana de la luz reflejada por un objeto. Es un atributo de apariencia de los productos y su observación permite detectar ciertas anomalías y defectos. Pero para detectar colores que el ojo humano no esté a su alcance existen equipos que detecta más variedad de colores, los cuales nos permite determinar estos. Hay dos maneras de caracterizar los colores, utilizado los cromáticos uniformes (CIELAB) y no uniformes (CIEXYZ), que permiten visualizar y representar colores en dos y tres dimensiones (Delmoro *et al.*,2010).

CIELAB es una transformación matemática del espacio XYZ en el cual se fija un blanco de referencia y cuyos valores de triestímulo son  $(X_n, Y_n, Z_n)$ . Ese blanco de referencia puede ser, por ejemplo, una fuente luminosa, el iluminante al que se haya adaptado el observador, un difusor perfecto o el color neutro más reflectante o transmisor de un medio de reproducción entonces es media-relativa. En el sistema CIELAB, los colores deben verse sobre un fondo que vaya de blanco a gris medio por un observador adaptado a un iluminante que no sea demasiado distinto a la luz natural del medio día. Los tres ejes del sistema CIELAB se indican con los nombres  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ . Representan, respectivamente Luminosidad, tonalidad de rojo a verde y tonalidad de amarillo a azul (los dos últimos ejes están inspirados en la teoría de los colores oponentes) (Trussell *et al.*, 2005); como se ilustra en la figura 7.

Los asteriscos de  $L^*a^*b^*$  sirven para distinguir el espacio de color CIELAB de otros con nombres similares como HunterLab o ANLAB. CIELAB, tiene dos fundamentos para describir el color, el primero es la determinación de la diferencia de color, en el espacio CIELAB, entre un producto y un estándar. Los valores de dicha muestra se le restan los valores de referencia del estándar, resultando entonces, las diferencias entre ambos objetos. Las diferencias se expresan con el símbolo delta ( $\Delta$ ). Para que la interpretación de los signos (+) y (-) sea correcta, los valores de la referencia deben ser substraídos a los de la muestra. La segunda es la que se aplicó en los cálculos de esta investigación donde la descripción del color en el espacio, donde la luminosidad viene descrita por el eje vertical  $L^*$ , la tonalidad por el contorno de la esfera y la pureza por el radio desde el centro al exterior de la esfera. Estos valores de color pueden obtenerse a partir de los valores de  $L^*a^*b^*$ . (Minolta, 2012; López y Sarli, 2016; Ibraheem *et al.*, 2012).

$$\text{Luminosidad} = L^* \dots \text{Ecuación 1}$$

$$\text{Tonalidad} = h^* = \arctg \frac{b^*}{a^*} \dots \text{Ecuación 2}$$

$$\text{Pureza} = C^* = \sqrt{a^* + b^*} \dots \text{Ecuación 3}$$

$L^*$  es la medida de luminosidad, su valor varía de 0 para un negro a 100 para un blanco. Es posible encontrar valores  $L^*$ . Superiores a 100 cuando el cuerpo emite cierta fluorescencia, pero en el caso alimentario es difícil que esto ocurra. Cuanto más cercano

será el valor a 100 más luminoso será el producto, y cuanto más próximo a 0, más oscuro será.  $h^*$  es el ángulo que mide la tonalidad, indicando la orientación relativa del color respecto al origen  $0^\circ$ . Si el círculo  $a^*b^*$  entero se divide en  $360^\circ$  grados, como toda circunferencia y se define el origen 0 en la posición  $a^*$  positiva y  $b^*=0$ , es decir, donde se situaría un color estrictamente rojo, podemos desplazarnos en sentido contrario a las agujas de un reloj de tal forma que un color estrictamente amarillo se encontraría en el ángulo  $90^\circ$ , un verde estricto en  $180^\circ$  y un azul estricto en  $270^\circ$ . Así, la especificación del tono a partir de la ecuación 3 requiere la correspondiente corrección del cuadrante. Un valor de cero para  $C^*$  indica un estímulo acromático, sin ninguna orientación hacia rojo, verde, azul o amarillo. Un color con un valor alto de  $C^*$  es un color altamente saturado (Oliag, 2012).

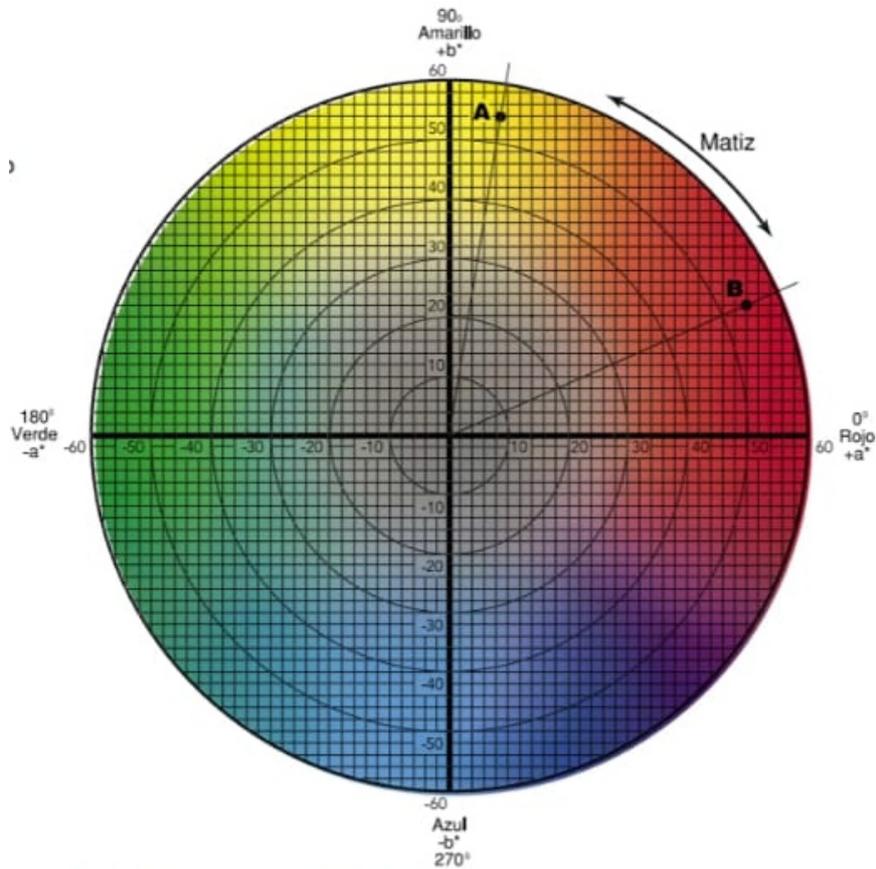


Figura 6: Representación del sistema CIE  $L^*a^*b^*$  o CIELAB (Ibraheem *et al.*, 2012).

### 3.6.2. Valoración de granulado

La valoración granular tiene dos tipos de densidad que se pueden medir. El primero es densidad girada o  $\rho_{\text{Tapped}}$  y la segunda es densidad aparente y compacta o  $\rho_{\text{Bulk}}$  (Abdullah y Geldart, 1999; Bhattacharef *al.*, 2003).

Densidad aparente: es la determinación de un sólido poroso como los polvos o granos relativamente sencilla, puesto que implica la medida de su volumen aparente (su volumen total, incluyendo los huecos entre los granos). Bastaría entonces con dividir una cierta masa de polvos o granos entre el volumen aparente de esa misma muestra. Con el fin de estandarizar la determinación, se hace necesario el grado máximo de compactación de los granos. Describiendo el proceso paso a paso: se toma una probeta de plástico o vidrio y se determina su masa de una probeta. Se vierte en la misma una cierta masa de polvos o granos y se vuelve a pesar el conjunto probeta más materia (Kumar, 2019).

Densidad compacta: se obtiene después de golpear una probeta de plástico o vidrio de medición graduado, que contiene la misma muestra de polvo utilizada en la prueba de densidad aparente en base rítmicamente unas 20 veces para conseguir la compactación de la muestra y finalmente medir el volumen ocupado por la muestra en la probeta el volumen aparente, siendo su valor mayor a esta última por la reducción de volumen. Las ecuaciones para utilizar sobre estas dos pruebas son (Vergeylen, 2012; Gasch, 2005).

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \dots \text{Ecuación 4}$$

Posteriormente teniendo la densidad aparente ( $\rho_a$ ) y la densidad compactada ( $\rho_c$ ), se utiliza el Índice de Carr se determina por la ecuación:

$$IC = 100 \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_c} \right) \dots \text{Ecuación 5}$$

El índice de Carr o índice de compresibilidad se relaciona con la resistencia, estabilidad de los enlaces entre las partículas del polvo, la movilidad de las partículas y su capacidad de compactación ante la aplicación de una fuerza. Un índice de Carr mayor que 25 se considera como una indicación de fluidez pobre, mientras que un índice menor que 15 es una indicación de buena fluidez. También está el índice de hausner, el cual es otro indicador de polvos que caracteriza la fluidez de un polvo o material granular (Ordoñez, 2017).

$$H = \frac{100}{(100-IC)} \dots \text{Ecuación 6}$$

Si índice de Hausner es superior a 1.25 se considera una indicación de flujo deficiente pero buena compresibilidad y cohesión y un índice de Hausner de menos de 1.25 se considera una indicación de buen flujo, pero baja compresibilidad y mala cohesión, en la siguiente tabla se muestra los límites de las propiedades de los flujos (Romagnoli, 2006).

Cuadro 10: Índice de Hausner (H)

Propiedades de flujo	Índice de hausner
Excelente	1.00-1.11
Buenas	1.12-1.18
Correctas	1.19-1.25
Pasables	1.26-1.34
Pobres	1.35-1.45
Muy pobres	1.46-1.59
Extremadamente malas	>1.6

Tomado y adaptado de: Salinas, 2012.

### 3.6.3. Carbohidratos

Los carbohidratos se clasifican según el número de unidades de azúcares sencillos que contengan, como: monosacáridos que son las moléculas sencillas de los hidratos de carbono, entre los más importantes esta la glucosa, fructosa, eritrosa, xilosa, ribulosa, galactosa, manosa. Los disacáridos, estos están compuestos de dos monosacáridos unidos por un enlace glucosídico. Entre los más importantes tenemos la lactosa, sacarosa y la maltosa. Los oligosacáridos esta constituidos de dos a diez unidades de monosacáridos unidos por enlaces glucosídicos y los poligosa caridos que son polímeros formados por más de 10 monosacáridos unidos por enlaces glucosídicos (Mora, 1997).

Para determinar estos tipos de carbohidratos existen diferentes métodos analíticos basados en la espectrofotometría, la cromatografía liquida de alta resolución (HPLC),

entre otras. Estos métodos utilizan diferentes reactivos para su determinación, como antrona, fenol, orcinol o resorcinol (Nogueira *et al.*, 2005; Legard *et al.*, 2017).

El método de mayor utilidad para la determinación de carbohidratos es del investigador DuBois *et al.*, 1951, quien desarrolló un método para determinar cantidades submicro de azúcares y sustancias relacionadas, junto con la cromatografía de partición en papel, el método es útil para la determinación de la composición de polisacáridos y sus derivados de metilo, el procedimiento que se lleva a cabo es más sensible, rápido en los resultados y apropiado para cuantificar diferentes azúcares como monosacáridos, oligosacáridos y polisacáridos, ya que estos azúcares dan un color amarillo-anaranjado cuando se tratan con fenol y ácido sulfúrico concentrado. La reacción es sensible y el color es estable, mediante fenol-ácido sulfúrico. (Loewus, 1952; DuBois *et al.*, 1956).

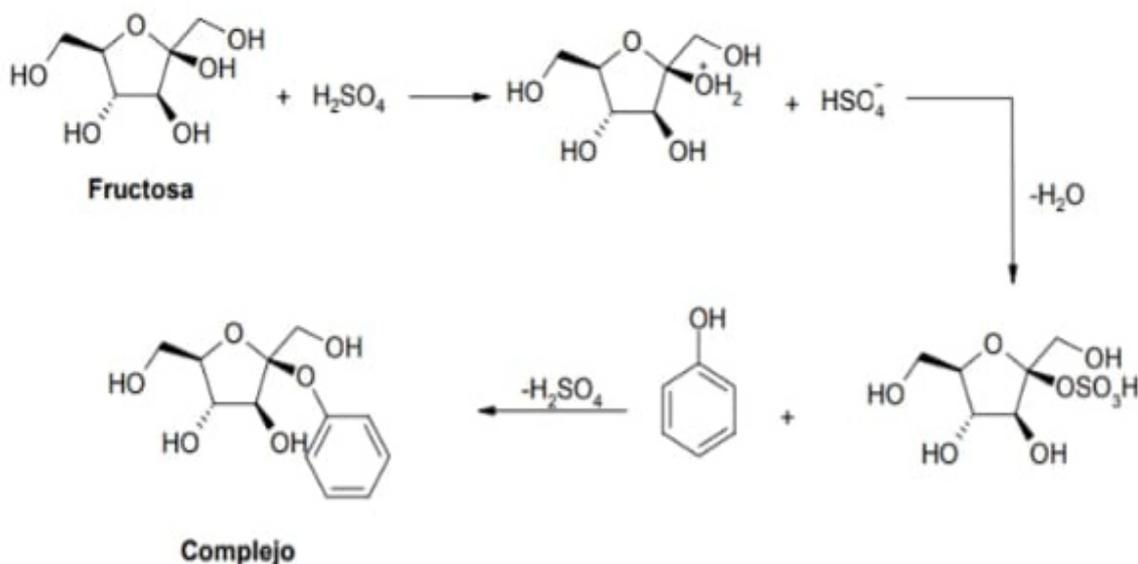


Figura 7: Estructura del complejo generado a partir de la reacción de fructosa con fenol en medio ácido

En este proceso existen una serie de reacciones complejas las cuales empiezan con la deshidratación simple, continúa con un calentamiento la catálisis ácida y se añade fenol, produciendo derivados de furano que se condensan entre sí, para producir compuestos coloridos de condensación de compuestos fenólicos y heterocíclicos. En la siguiente reacción, los carbohidratos se convierten en hidroximetilfurfural o furfural (Nieisen, 1998; Janethy Elizabeth, 2011).



El cambio de color de amarillo-naranja es estable hasta las veinticuatro horas y pasa cuando el fenol reacciona con ácido sulfúrico concentrado.

### **Fenol + carbohidratos + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> → amarillonaranja**

El proceso que lleva a cabo el proceso de la reacción fenol-ácido sulfúrico no es estequiométrico y depende de la estructura del azúcar, por lo que es necesario realizar una curva estándar de glucosa, como se muestra en la tabla 14. La absorbancia puede ser medida a distintas longitudes de onda de 490 nm a 510 nm y la concentración total de carbohidratos de las soluciones problema puede ser medida con respecto a una curva estándar preparada (Nieisen, 1998; Burlingame, 1996).

Cuadro 11: Curva Estándar de Glucosa

<b>Concentración de glucosa (µg/ml)</b>	<b>Solución madre (ml)</b>	<b>Agua destilada (ml)</b>
100	1.00	0.00
80	0.80	0.20
60	0.60	0.40
40	0.40	0.60
20	0.20	0.80
0	0.00	1.00

Tomado y adaptado de Valencia, 1992; Nigam, 2007.

### **3.7. Grupos funcionales**

Consiste en un átomo o pequeños conjuntos de átomos, que experimentan las mismas reacciones químicas independientes del resto de la estructura molecular, estos están unidos a una cadena carbonada, representada en la fórmula general por R para los compuestos alifáticos y como Ar para los compuestos aromáticos. También son responsables de la reactividad y propiedades químicas de los compuestos orgánicos. Se asocian siempre con enlaces covalentes al resto de la molécula (Stermitz, 1988; Atkins, 2007).

Cuadro 12: Principales grupos funcionales

Función	Grupo funcional	Sufijo	Prefijo (sustituyente)
ácido carboxílico	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R}-\text{C}-\text{OH} \end{array}$	-ico	Carboxi
Esteres	$\text{R}-\text{O}-\text{R}'$	-ato de alquilo	alcoxi-carbonil
halogenuros de ácidos		halogenuro de -ilo	halogeno-alcanoil
Amidas	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R}-\text{C}-\text{N}-\text{R}'' \\   \\ \text{R}' \end{array}$	-amida	Carbamoil
Nitrilos	$\text{R}-\text{C}\equiv\text{N}$	-nitrilo	Ciano
Aldehídos	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R}-\text{C}-\text{H} \end{array}$	-al	formil- (carbaldehido)
Cetonas	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R}^1-\text{C}-\text{R}^2 \end{array}$	-ona	Oxo
Alcoholes	$\text{R}-\text{O}-\text{H}$	-ol	Hidroxi
Aminas	$\begin{array}{c} \text{R}_1 \\   \\ \text{R}_3-\text{N} \\   \\ \text{R}_2 \end{array}$	-amina	Amino
Esteres	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R}-\text{C}-\text{OR}' \end{array}$	Éter	Alcoxi
Alquenos	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \diagdown \quad / \\ \text{C}=\text{C} \\ / \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	-eno	Alquenil
Alquinos	$\text{H}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{H}$	-ino	Alquinil
Nitro	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R}-\text{N}^+-\text{O}^- \end{array}$	-	Nitro

alcano		-ano	Alquil
--------	--	------	--------

Tomado y adaptado de:(Velasco, *et al.*, 2006;Walter, 1987;McMurry, 2004).

Para detectar los grupos funcionales se utilizan diferentes tipos de espectroscopia, estos permiten determinar la estructura de compuestos desconocidos sin necesidad de llevar a cabo reacciones químicas. Unas de las técnicas espectroscópicas más utilizadas es la espectroscopia de masas (EM), que suministra información acerca de la fórmula molecular del compuesto y las subunidades estructurales y la espectroscopia infrarroja (IR), la cual proporciona datos sobre la naturaleza de los grupos funcionales de la molécula (Stermitz, 1988).

### 3.7.1. Espectroscopia infrarroja (FTIR)

La espectroscopia IR es el método por el cual se estudia la absorción o emisión de energía radiante originada por la interacción entre la radiación electromagnética y el material en estudio. Consta de una fuente emisora que origina un haz de luz compuestos de todas las frecuencias de la radiación infrarroja, donde cierta adsorción se mide. Las muestras se hacen pasar por este haz y luego un monocromador, el cual selecciona las frecuencias de una en una y se hacen pasar al detector, donde emite una señal electrónica proporcional a la intensidad de la luz que recibe (Piqué y Vázquez, 2012).

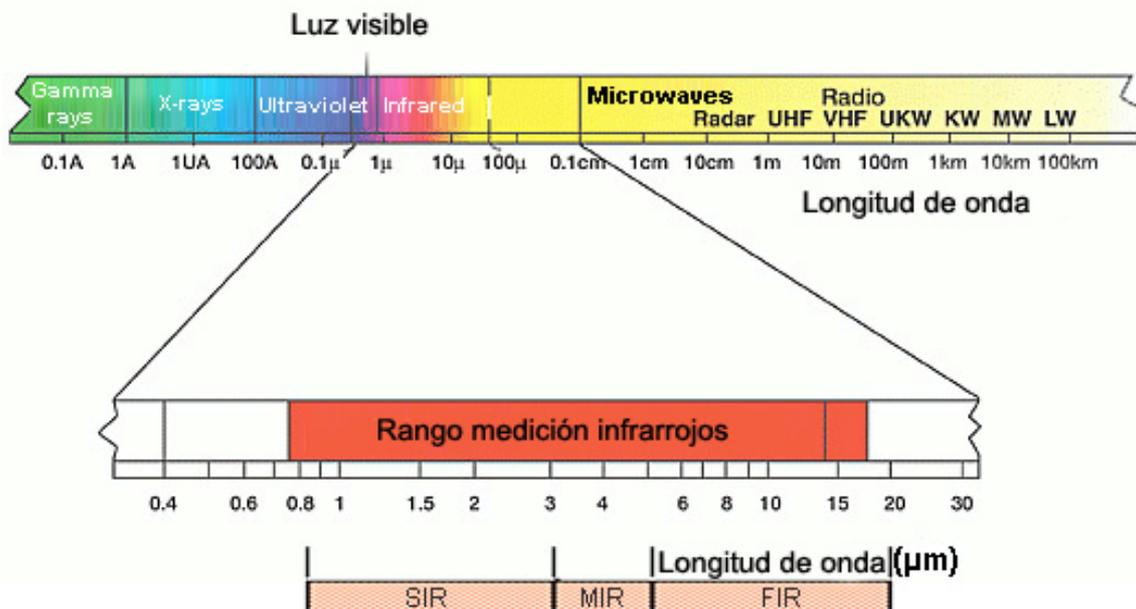


Figura 8: Espectro electromagnético (Socrates, 2006)

Uno de los datos importantes de la espectroscopia infrarroja es la espectroscopia de transformada de Fourier (FTIR) que fue desarrollada para romper las limitaciones encontradas con los instrumentos dispersivos. La técnica FTIR ha conseguido para la espectroscopia infrarroja una ventaja para el posible desarrollo de nuevas técnicas, [como FTIR-CA (de camino abierto) y FTIR-RTA (de reflectancia total atenuada)] que fueron diseñadas para solucionar los desafíos que eran planteados a la técnica (Navarta, *et al.*, 2008). Los dos usos importantes de la espectroscopia IR son:

1. Contribuir la determinación estructural de un compuesto desconocido, al dar indicaciones de la naturaleza de los grupos funcionales presentes.
2. Identificar una muestra desconocida por comparación entre su espectro IR y el de su compuesto conocido.

La porción infrarroja del espectro electromagnético se divide generalmente en tres regiones; el infrarrojo cercano, medio y lejano, llamado así por su relación con el espectro visible, (Piqué y Vázquez, 2012).

### 3.8. Pruebas de jarras

Sirve para determinar si un efluente puede ser tratado de manera rentable y con la eficiencia deseada mediante en el tratamiento coagulación, floculación y sedimentación a nivel de laboratorio y estas radican en utilizar una serie de jarras al mismo tiempo y la posibilidad de variación de la velocidad de agitación (rpm). Este consiste colocar agua residual en vasos (jarras) a una agitación rápida para homogenizar el medio y posteriormente, se disminuye la velocidad para favorecer la formación del flóculo; después se dejan los vasos en reposo y se analizan tanto en el sobrenadante como los lodos producidos. En estos ensayos es posible determinar el coagulante o floculante óptimo, mezclado necesario, pH, dosis óptima y rendimiento máximo alcanzable Es una prueba de corta duración y permite mediante observación identificar el comportamiento de los coagulantes empleados, lo que complementa los resultados de medición de parámetros en cada jarra. El correcto desarrollo y cálculo de parámetros en esta prueba permite establecer la dosis óptima a usar a nivel piloto o escala real en una PTAR (Fúquene y Yate, 2018; Acosta, 2006).

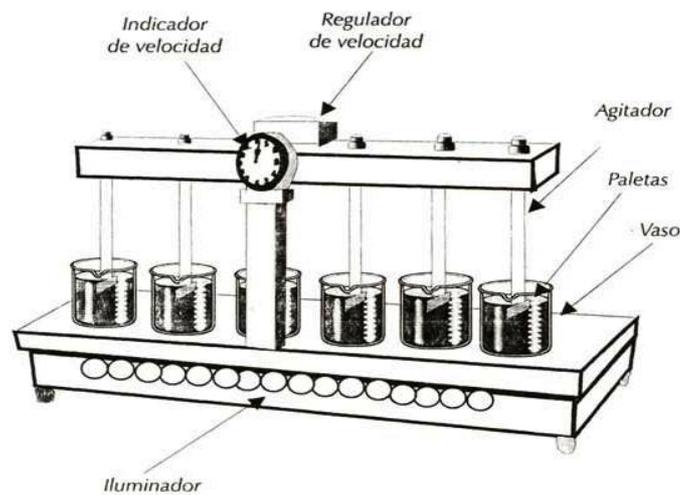


Figura 9: Pruebas de jarras (Padilla, 1999).

#### **4. Planteamiento del problema**

La coagulación es un proceso común en el tratamiento del agua para desestabilizar las impurezas coloidales y producir grandes agregados de flóculos que pueden eliminarse del agua en el proceso posterior de clarificación / filtración. Los más utilizados son cloruro de aluminio, cloruro férrico, cloruro de polialuminio (PAC) y polímeros orgánicos sintéticos como poliacrilamida (PAM). Pero el más utilizado son las sales de aluminio porque es más barato. Sin embargo, estos coagulantes generan problemas a grandes escalas como la producir grandes volúmenes de lodo de aluminio, afectar el pH del agua tratada, traer un efecto perjudicial a la salud humana y desarrollar la enfermedad de Alzheimer en el ser humano. En esta investigación se busca desarrollar un coagulante alternativo natural basado en *Aloe barbadensis* Miller para contrarrestar o minimizar el problema ambiental.

#### **5. Justificación**

Las aguas residuales contienen gran cantidad de impurezas siendo una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos en suspensión como disueltos, llamadas caracterizaciones fisicoquímicas. Las tecnologías para tratar las aguas residuales se pueden dividir en tres categorías; los métodos químicos, físicos y biológicos en tratamientos primarios, secundarios y terciarios (Noyola, *et al.*, 2013). El objetivo del tratamiento primario es eliminar toda partícula, cuyas dimensiones obstruyan los procesos consecuentes; este consta del cribado o mallas de barrera, flotación o eliminación de grasa y la coagulación floculación (Ruíz, 1897). La coagulación es un proceso común en el tratamiento de aguas residuales para desestabilizar las impurezas coloidales y producir flóculos que pueden eliminarse del agua en el proceso de clarificación y filtración. El sulfato de aluminio es ampliamente utilizado en la potabilización del agua, sin embargo; este coagulante genera grandes volúmenes de lodos que modifican el pH del agua tratada y que pueden afectar la salud humana ya que es el metal neurotóxico abundante, es biodisponible y contribuye de forma significativa a la enfermedad de Alzheimer (Tomljenovic, 2011; Pérez, *et al.*, 2002). A diferencia de estos, los coagulantes naturales como *Moringa oleifera*, *Opuntia ficus-indica*, y *Aloe barbadensis* Miller, el cual su gel, se caracteriza por poseer en el interior una sustancia viscosa activa (gel o mucilago) llamado acemanano, el cual se utiliza como coagulante-floculante en aguas residuales, que al entrar en contacto con el agua forma una sustancia para atrapar los coloides con mayor

facilidad. Este compuesto está considerado dentro de los tratamientos de agua por su mecanismo de desestabilización de materia orgánica (Valoyes, 2012; Marante, 2003; Filho, 2008; Hamman, 2008; Maqui, 2017).

Los coagulantes naturales, son biodegradables y amigables con el medio ambiente. Ya que se ha comprobado que el lodo se utiliza como fertilizante orgánico en la agricultura (Malqui, 2017). Por lo anterior, el presente proyecto tiene el objetivo de evaluar y determinar la eficiencia de remoción de turbidez y sólidos suspendidos del coagulante natural *Aloe barbadensis* Miller en aguas residuales domésticas y acuícolas.

## **6. Hipótesis**

El mucilago de *A. barbadensis* Miller, posee una sustancia activa llamada acemanano, que como coagulante natural en polvo, por sus propiedades fisicoquímicas aglomera los coloides, reduce el porcentaje de remoción de turbidez y sólidos suspendidos en aguas residuales acuícolas y domésticas.

## **7. ¿Pregunta de investigación?**

¿Cuál es la eficiencia de remoción de turbidez y sólidos suspendidos en aguas residuales acuícolas y domésticas, al emplear el mucilago de *Aloe barbadensis* Miller como coagulante natural en polvo?

## **8. Objetivo general**

Evaluar la eficiencia de remoción de turbidez y sólidos suspendidos utilizando el coagulante natural *Aloe barbadensis* Miller en aguas residuales domésticas y acuícolas.

### **8.1. Objetivos específicos**

- Caracterizar los parámetros fisicoquímicos del agua residual doméstica y acuícola, antes y después del tratamiento primario coagulación floculación.
- Determinar propiedades fisicoquímicas del coagulante en polvo obtenido a partir de la planta *Aloe barbadensis* Miller.
- Determinar las condiciones de operación (dosis y velocidad) de acuerdo con el mayor porcentaje de remoción de turbidez para el tratamiento de las aguas residuales tratadas.

## 9. Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Investigación de Recursos Acuáticos (LIRA) del Instituto Tecnológico de Boca del Rio y en el laboratorio de Unidad de Investigación y Desarrollo de Alimentos (UNIDA) del instituto Tecnológico de Veracruz, donde se realizaron las investigaciones pertinentes.

### 9.1. Caracterización de las aguas residuales

Los dos tipos de aguas residuales se recolectaron, en dos sitios diferentes. El agua residual doméstica se recolectó en residencial Lomas del Sol y el agua residual acuícola en Medellín de Bravo.

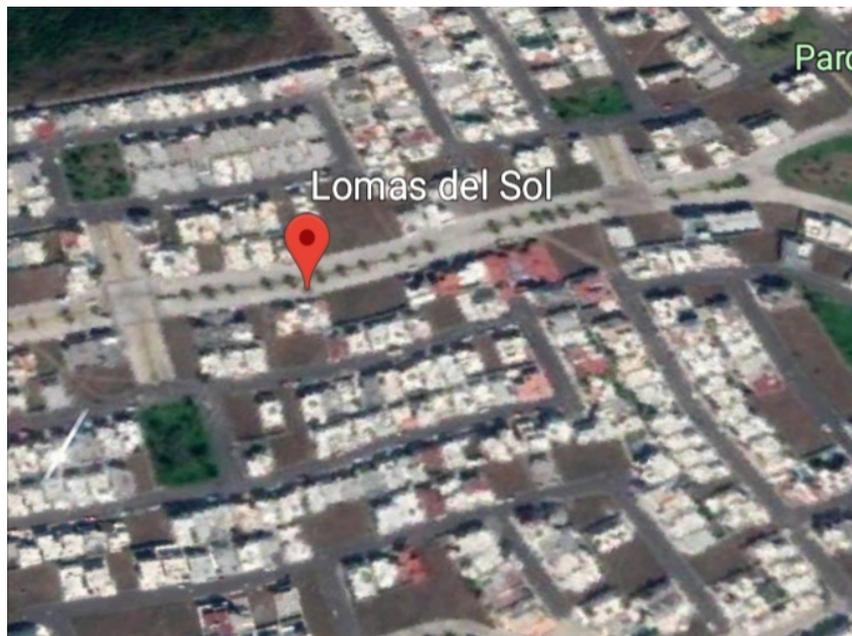


Figura 10: Localización de los sitios de muestreo del agua residual doméstica. Google Earth Pro.



Figura 11: Localización de los sitios de muestreo del agua residual acuícola.  
Google Earth Pro.

Cuadro 13: Descripción de la localización de los sitios de muestreo. Google Earth Pro.

Punto	Coordenadas	Descripción general
<b>Agua residual doméstica</b>	Latitud: 20.96 °N Longitud: 97.44 °W	Blvd. Rivera Veracruzana 5, Veracruz
<b>Agua residual acuícola</b>	Latitud: 96 °N Longitud: 09.50 °W	Medellín de Bravo

Estas aguas residuales se transportaron en bidones de 60 litros cada uno y se llevaron a cabo los lineamientos y recomendaciones de la NMX-AA-003-1980, para la toma de muestra y el transporte de descarga de aguas residuales. El efluente se preservó, analizando los parámetros fisicoquímicos de acuerdo con las técnicas señaladas en la tabla 15

Cuadro 14: caracterización establecida en el agua residual doméstica y acuícola

<b>Parámetros</b>	<b>Fundamento</b>	<b>Norma</b>
Turbidez	Se determina mediante el método cuantitativo, empleando un turbidímetro óptico, dando los resultados en NTU:(NephelometricTurbidityUnit)	NMX-AA-038-SCFI-2001
pH	Medida de la concentración de iones hidronio (H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> ) en la disolución. Se determina mediante electrometría de electrodo selectivo (potenciómetro).	NMX-AA-008-SCFI-2000
DBO	Es la cantidad de oxígeno necesaria para que los microorganismos aerobios puedan oxidar metabólicamente la materia orgánica presente en la muestra de agua. Se determina por diferencia entre el oxígeno disuelto en la muestra inicial y el medido en función del tiempo de incubación.	NMX-AA-028-SCFI-2001
DQO	Es la cantidad de oxígeno (medido en mg/L) que es consumido en la oxidación de materia orgánica y materia inorgánica oxidable, bajo condiciones de prueba. Es usado para medir la cantidad total de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales. En contraposición al BOD, con el DQO prácticamente todos los compuestos son oxidados. Ya que el dicromato es el agente que oxida la materia orgánica presente en la materia.	NMX-AA-030-SCFI-2001
Grasas y aceites	Extracción en caliente, a partir de un volumen conocido de agua a analizar, evaluando la cantidad presente por pesada, una vez eliminado el disolvente de la fase orgánica.	NMX-AA-005-SCFI-2013
Nitrógeno	Es definido como la suma del nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico los cuales son convertidos a sulfato de amonio [(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ], bajo las condiciones de digestión por el aparato digestor nitrógeno total microKjeldahl	NMX-AA-026-SCFI-2010

Fósforo	<p>En la presencia de vanadio, se forma ácido vanadomolibdofosfórico de color amarillo. La longitud de onda a la cual la intensidad del color es medida, depende de la detección requerida. La intensidad del color amarillo es directamente proporcional a la concentración de fosforo total. Su lectura es por espectrofotómetro de paso óptico de luz.</p>	NMX-AA-029-SCFI-2001
<p>ST STV SDT SST SSV SDV</p>	<p>Los sólidos totales; pueden estar en forma suspendida o en disolución. Los sólidos totales se determinan evaporando un volumen determinado de muestra y pesando el residuo remanente. Los resultados se expresan en mg/l. De los aproximadamente 500 gramos de sólidos totales, la mitad son sólidos disueltos tales como calcio, sodio y compuestos orgánicos solubles. Los 250 gramos restantes son insolubles. La fracción insoluble consiste en aproximadamente 125 gramos de material que puede sedimentarse en 30 minutos si se deja al agua en condiciones de quietud. Los 125 gramos restantes permanecerán en suspensión por mucho tiempo.</p> <p>La concentración de sólidos volátiles se suele considerar como una medida aproximada del contenido de materia orgánica, o en ciertos casos, de las concentraciones de sólidos biológicos tales como bacterias o protozoos.</p> <p>Los sólidos suspendidos son principalmente de naturaleza orgánica; están formados por algunos de los materiales más objetables contenidos en el agua residual. La mayor parte de los sólidos suspendidos son desechos humanos, desperdicios de alimentos, papel, trapos y células biológicas que forman una masa de sólidos suspendidos en el agua. Incluso las partículas de materiales inertes adsorben sustancias orgánicas en su superficie.</p>	NMX-AA-034-SCFI-2015

## **9.2. Obtención y caracterización del coagulante *Aloe barbadensis* Miller en polvo**

### **9.2.1. Procedimiento de extracción del coagulante en polvo**

Se llevo a cabo el proceso de obtención del coagulante en polvo, de acuerdo con las técnicas referenciadas, desde la extracción materia prima (mucilago), de la planta *Aloe barbadensis* Miller hasta el proceso de elaboración del coagulante natural en polvo para el tratamiento de aguas residuales y acuícolas.

**Recolección de la materia prima**, de acuerdo con cada una de las técnicas referenciadas por Ramos y Paredes, 2019; Pinto, 2017; Pedroza, *et al.*, 2009 y Muavalli, 2017, se llevó a cabo la recolección de las hojas maduras de la planta *Aloe barbadensis* Miller en la zona conurbada de Veracruz Puerto, observando su edad y dimensiones aptas para su uso, cortándolas con un cuchillo en la parte inferior de la penca. Posteriormente se lavaron y se dejó reposar por 12 horas en vertical hasta que la mayoría de la aloína drenara y solo quedara el acíbar (gel) de las hojas.

**Remoción de la cutícula**, se removió las espinas y la capa gruesa verde que cubre el gel del *A. barbadensis* Miller llamada exocarpio, separándolas cuidadosamente de la parte de gel. Se obtuvieron 8 kilos de pulpa (gel); utilizando una balanza digital para su peso. La pulpa se cortó en cubos, los cuales se colocaron en el congelador durante 12 horas.

**Liofilización**, el gel de *A. barbadensis* Miller contiene entre un 86% y 90% de agua. De acuerdo con Nindo, *et al.*, 2009, Chandegara y Varshney, 2013; una de las técnicas que favorece la preservación de sus propiedades como coagulante natural es por el método de liofilización. Se utilizó un liofilizador, modelo FreezeDryerSCIENTZ-18N, en condiciones de  $-45^{\circ}\text{C}$  a  $-60^{\circ}\text{C}$  y a una presión de  $-8\text{ Pa}$  a  $-15\text{ Pa}$ , durante 58 horas. Una vez liofilizada las muestras se retiraron del equipo y se colocaron en el desecador para evitar su hidratación.

**Molienda y tamizado**: las muestras de *A. barbadensis* Miller liofilizadas, se trituraron hasta reducir su tamaño. Se procedió a tamizar el polvo de *A. barbadensis* Miller, con un tamaño de partículas fina de 1 mm y con la facilidad de tener mayor contacto con el agua a tratar. Para evitar su hidratación y el efecto de la luz sobre los agentes bioactivos sensibles, Rahman, *et al.*, 2017.

### 9.2.2. Caracterización del coagulante

Se determinó la siguiente caracterización fisicoquímica, pH, propiedades organolépticas, color, olor, carbohidratos, proteínas y densidad a granel.

**pH:** De acuerdo con la NMX-F-317-S-1978, se analizó la muestra de aloe vera en polvo diluida en agua, para tomar el pH. (García, *et al*, 2007; y Garcia y Silgado, 2012).

**Propiedades organolépticas:** Son todas aquellas descripciones de las características físicas que tiene la materia en general sin la ayuda de un instrumento de medición.

**Color:** Se utilizó el equipo MiniScan XE Plus por el método de CIELAB, el cual da un dato exacto entre los espacios de color, calculado por medio de raíces cúbicas (Ibraheem, *et al.*, 2012).

**Valoración por granulometría:** Se obtuvo la densidad aparente y compactada, calculando el Índice de Carr y de Hausner (Ordoñez, 2017).

**Proteínas:** Se determinó por el método de nitrógeno total Kjeldahl vasado en la NMX-AA-026-SCFI-2001.

**Carbohidratos:** Se empleó el método fenol-ácido sulfúrico, para la determinación de carbohidratos totales (Dubois *et al.*, 1956), que consiste en la deshidratación de la glucosa y fructuosa en medio ácido (concentrado) para formar 5-hidroximetilfurfural. Esta reacción forma un producto coloreado marrón amarillo con el fenol que tiene máxima absorción a 510nm. En la curva de calibración se encuentra registrada las absorbancias que se obtuvieron para cada muestra.

### 9.2.3. Espectroscopia infrarroja (FTIR)

Cuando se hace un análisis IR se mide la intensidad del haz antes ( $I_0$ ) y después ( $I$ ) de que interaccione con la muestra. El resultado se expresa en función de la frecuencia de la luz incidente. Mediante espectroscopia infrarroja se determinó, una muestra en polvo de *A. barbadensis* Miller, a un rango de número de onda de  $4000\text{cm}^{-1}$  a  $400\text{cm}^{-1}$ , se obtuvo la lectura en el espectro FTIR (agilent technologie scary 600 series) y de este poder obtener, mediante los picos registrados, el compuesto del que se trataba.

## 10. Evaluar el porcentaje de remoción de turbiedad y sólidos suspendidos

### 10.1. Prueba de jarras

Para determinar el tratamiento de las aguas residuales doméstica y acuícola de esta investigación, se basó en la metodología sugerida por Malqui, 2017, quien indicó una dosificación inicial de 800 mg/L de *A. barbadensis* Miller en polvo, partiendo de esa concentración hasta encontrar una óptima. Las pruebas de jarras se realizaron por duplicado a diferentes condiciones de operación (ver cuadro 16) donde se analizaron con tres tipos de aguas; agua destilada, agua residual acuícola y doméstica.

Cuadro 15: Condiciones de operación

Volumen (mL)	Velocidad (rpm)	Tiempo de agitación (min)	Tiempo de reposo (min)
1000	100	2	40
	30	30	

## 10. Resultados

### 10.1. Caracterización de las aguas residuales

Las características fisicoquímicas iniciales de las muestras del agua residual acuícola y domestica se presentan en el cuadro 18. Con estos valores se parte de un inicio y fin en la investigación que se llevó a cabo para el tratamiento de las aguas residuales con el coagulante natural en polvo de *A. barbadensis* Miller.

Cuadro 16: Caracterización del agua acuícola y domestica

Parámetro	Agua acuícola	agua domestica	Norma-001-SEMARNAT-1996.
Ph	6.68	8.05	5-7
Turbidez (NTU)	310	114	NA
DBO (mg/L)	228	248	200
DQO (mg/L)	2167	503	NA
Fósforo (mg/L)	3.10	2.66	30
Nitrógeno (mg/L)	210	78	60
Grasas y aceites (mg/L)	52	64	25
ST (mg/L)	2520	364	NA
STV (mg/L)	201	116	NA
SDT (mg/L)	2340	239	NA
SSed (ml/L)	8.66	8	2
SST (mg/L)	170	125	200
SSV (mg/L)	57	22	NA
SDV (mg/L)	144	94	NA

La caracterización de las aguas residuales; acuícola y doméstica, varían significativamente, en comparación a los límites máximos permisibles, que establece la Norma-001-SEMARNAT-1996. Como se observa en el cuadro 17, el parámetro de turbiedad y pH del agua acuícola y doméstica desde 310 y 114 NTU, y un pH de 6.68 y 8.05 respectivamente, siendo los datos de mayor relevancia para el análisis de esta investigación. Sin embargo, al comparar de los resultados del agua residual acuícola (AA), como DQO (mg/L), Nitrógeno (mg/L), Grasas y aceites (mg/L), ST (mg/L), SDT (mg/L),

presenta mayor valoración en cuanto a la caracterización fisicoquímica, que el agua residual doméstica (AD).

## 10.2. Obtención del coagulante *Aloe barbadensis* Miller en polvo

En total, de 8 kilos de gel de *A. barbadensis* Miller, se obtuvo 164 gramos de polvo, quiere decir que 1 kilo de gel de *Aloe barbadensis* Miller, es igual a 18 gramos en polvo de coagulante natural igual a un rendimiento del 10.97%. En los siguientes cuadros se muestra los resultados de la caracterización del coagulante *A. barbadensis* Miller en polvo.

### 10.3. Caracterización del coagulante

#### 10.3.1. Color

Los experimentos demostraron que, el polvo de *A. barbadensis* Miller tiene, una luminosidad del 77.84%, una tonalidad de 89.82° grados, virando a color amarillo-verdoso y su pureza es de 15.90%.

Cuadro 17: Resultados de color

Lotes	Luminosidad %	Tonalidad	Pureza
1	77.88	90.49°	16.05
2	77.85	90.77°	16.18
3	77.80	88.22°	15.48
<b>promedio</b>	77.84	89.82°	15.90

#### 10.3.2. Valoración por granulometría

El polvo *A. barbadensis* Miller indica en la valoración, que el índice de Hausner es de 1.42, este superior a 1.25 de lo que se muestra en el rango del cuadro 20, esto quiere decir que tiene un flujo deficiente, con un 29.99% de compresibilidad y cohesión.

Cuadro 18: Rango de granulometría

Valoración por granulometría	
$IC = 29.99$	$IH = 1.42$

### 10.3.3. Proteínas

Una vez determinado el método Kjeldahl, a partir del resultado se calcula el contenido de proteínas. El cual en un gramo de polvo de *A. barbadensis* Miller tiene:

$$\% \text{ Proteína.*} = 9.36$$

### 10.3.4. Carbohidratos

Por la determinación de absorbancia en los carbohidratos se obtuvieron las siguientes concentraciones como se muestra en la tabla 20. La concentración promedio de carbohidratos que se obtuvo de las muestras fue de 5690 mg/mL por cada 100 gramos de polvo *A. barbadensis* Miller. De acuerdo con los valores de la recta que se muestra en el cuadro (21), se obtuvo una correlación de 0.9947, lo cual indica que los estándares están relacionados entre sí y poseen un ajuste de tendencia lineal aceptable.

Cuadro 19: Absorbancias y concentraciones de cada muestra

Muestra	Concentración mg/mL
a1	545.57 mg/mL
a2	603.83 mg/mL
a3	559.38 mg/mL

### 10.3.1. Espectroscopía infrarroja

El espectro FTIR, se utilizó para identificar los grupos funcionales de los componentes activos. Basados en los picos atribuidos a la liberación y flexión y de los valores de radiación de la región infrarroja  $4000\text{cm}^{-1}$  a  $400\text{cm}^{-1}$ . Los resultados de los perfiles del espectro FTIR del polvo *A. barbadensis* Miller se puede observar en la figura (13).

Los valores de absorción, que presentan las bandas son por el número de frecuencia. La lectura de  $3725.359\text{ cm}^{-1}$  y  $3534.285\text{ cm}^{-1}$ , se caracterizan por ser aminas primarias ( $\text{R-NH}_2$  y  $\phi\text{-NH}_2$ ), respectivamente. Por otro lado, el valor de  $3417.296\text{ cm}^{-1}$ , es la absorbancia del estiramiento de los grupos  $\text{-OH}$ , ya que es una característica de los monómeros de carbohidratos que incluye manosa y ácido urónico. La siguiente lectura de  $3317.296\text{ cm}^{-1}$ , está relacionada con grupos hidroxilos. Posteriormente el valor de

3234.703  $\text{cm}^{-1}$ , entra en el rango de 3320  $\text{cm}^{-1}$  3280  $\text{cm}^{-1}$  con una determinación de acetileno terminal de  $-\text{C}\equiv\text{CH}$ . Las absorbancias de 2360.347  $\text{cm}^{-1}$  y 2335.308  $\text{cm}^{-1}$ , son asimétrica y simétrica respectivamente, ambas del grupo funcional  $\text{C}=\text{C}$ . El valor de 2020.535  $\text{cm}^{-1}$ , es característica del C-H. El pico de absorción de 1969.711 se divide en aleno y es terminal de los grupos electro atrayentes (cetonas) y alenos  $>\text{C}=\text{C}=\text{C}<$ . El valor de 1729.643  $\text{cm}^{-1}$ , es característico del estiramiento de  $\text{C}=\text{O}$ , que indica la presencia de los grupos carboxílicos en la muestra de Aloe. La lectura de 1584.034  $\text{cm}^{-1}$ , representa  $-\text{NH}_2$ , siendo una flexión de tijera, presente tanto en aminas alifáticas como aromáticas. El estiramiento de 1427.510  $\text{cm}^{-1}$  se relaciona con  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$ , flavonoides y anillos aromáticos, donde las vibraciones son flexión ( $\delta$ ) de C-H y vibración de estiramiento de aromáticos. El resultado de 1365.054  $\text{cm}^{-1}$  es el estiramiento simétrico de  $\text{NO}_2$  que caracteriza los compuestos nitro-aromático. La lectura 1317.888  $\text{cm}^{-1}$ , representa los ácidos carboxílicos. El pico de 1241.497  $\text{cm}^{-1}$ , se encuentra en la banda de absorción de los grupos esteres de CO y fenoles. La señal de 1149.311  $\text{cm}^{-1}$ , corresponde a las vibraciones de estiramiento de  $\text{C}=\text{S}$ . 1095.554  $\text{cm}^{-1}$ , estas pueden ser alcoholes secundarios y/o un grupo éster de estiramiento C-O. la lectura de 1017.934  $\text{cm}^{-1}$ , es enlace C-OH primario. El valor de 911.085 es el resultado de ácidos carboxílicos. Finalmente, las señales de 633.562  $\text{cm}^{-1}$  y 610.617  $\text{cm}^{-1}$  pertenecen al grupo funcional C-OH débil (Barandozi y Enferandi, 2012; Lim y Cheong, 2015; Ravi *et al.*, 2011; Krokidaa *et al.*, 2011; Edward y Vaitheeswaran, 2014).

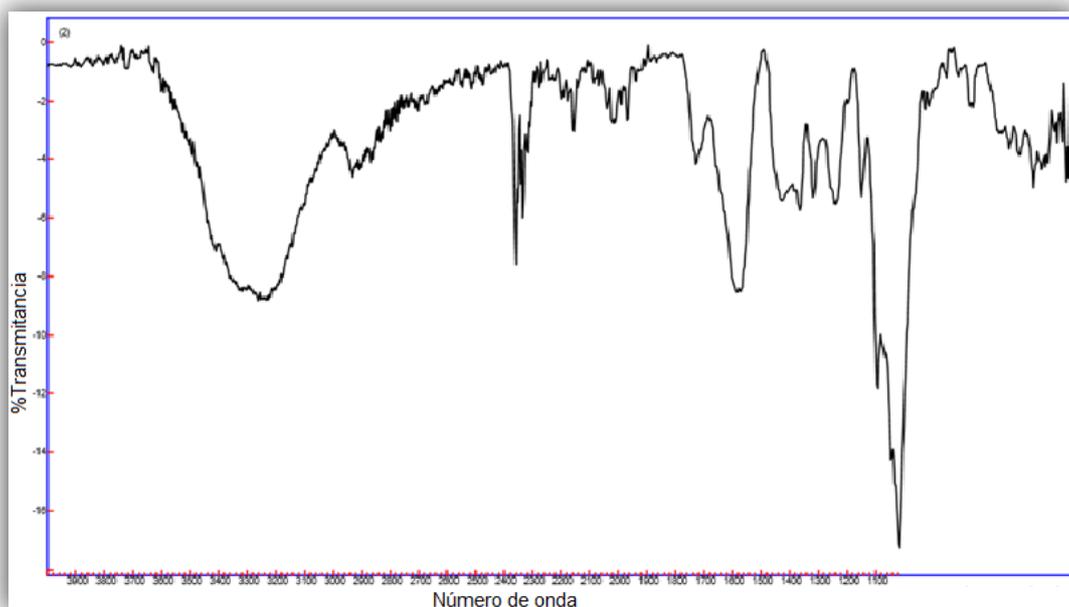


Figura 12: Espectroscopia (FTIR) *A. barbadensis* Miller

#### 10.4. Caracterizar los parámetros fisicoquímicos del agua residual doméstica y acuícola después del tratamiento primario.

##### 10.4.1. Remoción de turbiedad y sólidos suspendidos

Se evaluó el tratamiento primario de las aguas residuales acuícola y doméstica. Se analizaron dos parámetros en diferentes dosificaciones, pH y turbiedad. (ver fig. 11)

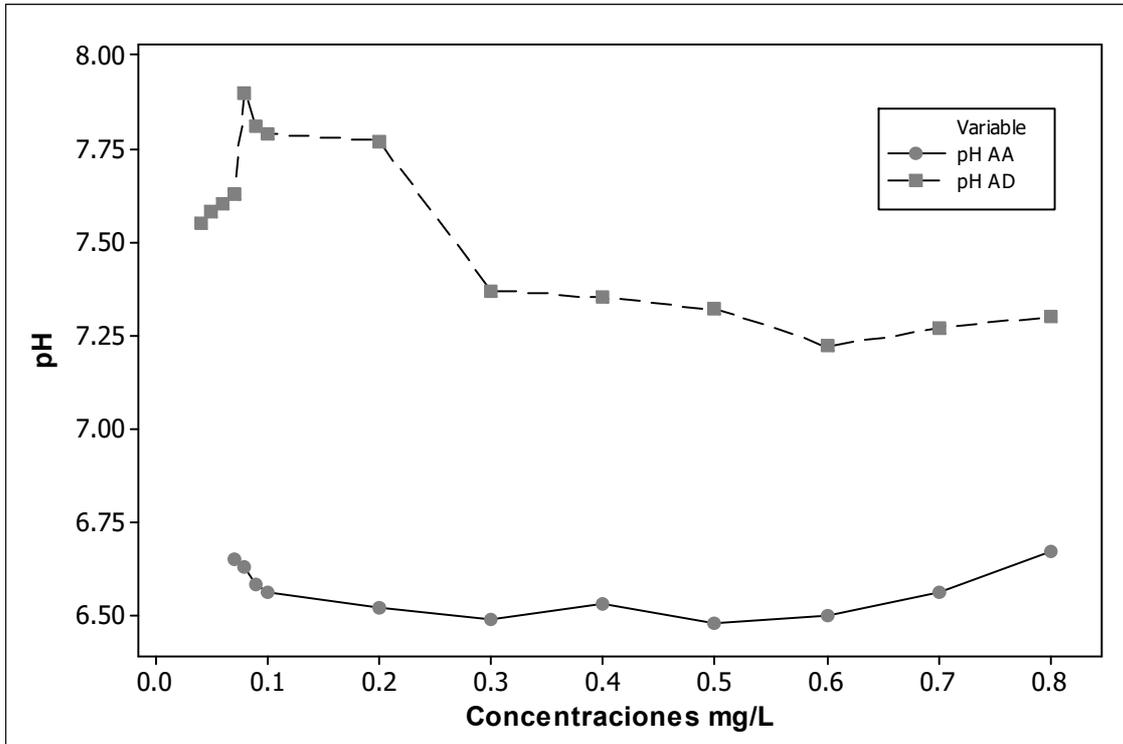


Figura 13: Evaluación de pH de las aguas residuales tratadas

La Figura 14, muestra el comportamiento del pH de los dos tipos de aguas residuales en el tratamiento primario coagulación-floculación, donde se observa que el coagulante natural en polvo *A. barbadensis* Miller en el agua residual acuícola (AA). Con esto se comprueba que el pH no tuvo variabilidad en las diferentes dosificaciones del tratamiento primario de esta agua, manteniéndose en un rango de acidez, con pH inicial de 6.68 y

final de 6.52. En comparación al agua residual domestica (AD), donde se observa que su variabilidad fue muy significativa en la aplicación del coagulante natural a un pH inicial de 8.05 y final de 7.9. Debido a que se analizaron más concentraciones hasta encontrar una dosis óptima. Como se observa anteriormente el coagulante natural en polvo *A. barbadensis* Miller, al tratar las aguas residuales acuícolas y domésticas los niveles de pH disminuyeron. Se le atribuye a que el coagulante natural se caracteriza por ser un polielectrolito catiónico, el cual actúa a condiciones óptimas y a un pH ácido, para una mejor aglomeración de coloides.

#### 10.4.2. Eficiencia de remoción de (AA)

En la figura 15, se muestra el comportamiento del porcentaje de eficiencia de remoción de turbidez con el coagulante natural en polvo de *A. barbadensis* Miller.

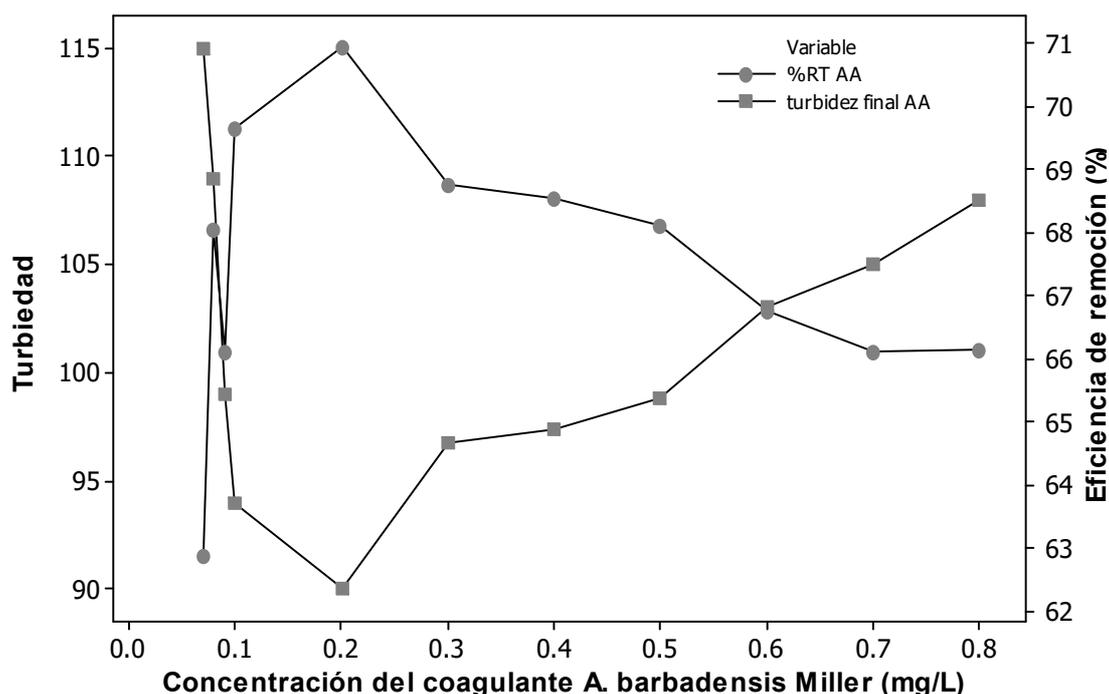


Figura 14: Remoción de la eficiencia de turbiedad en el (AA).

De acuerdo con las diferentes dosificaciones analizadas en el tratamiento coagulación floculación, se encontró la concentración óptima de 0.200 mg/L, con 70.96% de eficiencia de remoción. Como se observa en la figura 15, el comportamiento de cada una de las concentraciones muestra que, entre menor turbiedad mayor porcentaje de eficiencia de

remoción de coloide, ya que la intersección de estos dos puntos tiene mayor escala de separación. Los valores obtenidos de la variable turbiedad indican que las concentraciones aplicadas del coagulante remueven coloides en el agua acuícola (AA).

### 10.4.3. Eficiencia de remoción de (AD)

En la figura 16, la remoción de turbiedad del agua residual doméstica tratada, demuestra que se requiere una dosificación de 0.080 mg/L para remover el 95% de remoción de turbiedad.

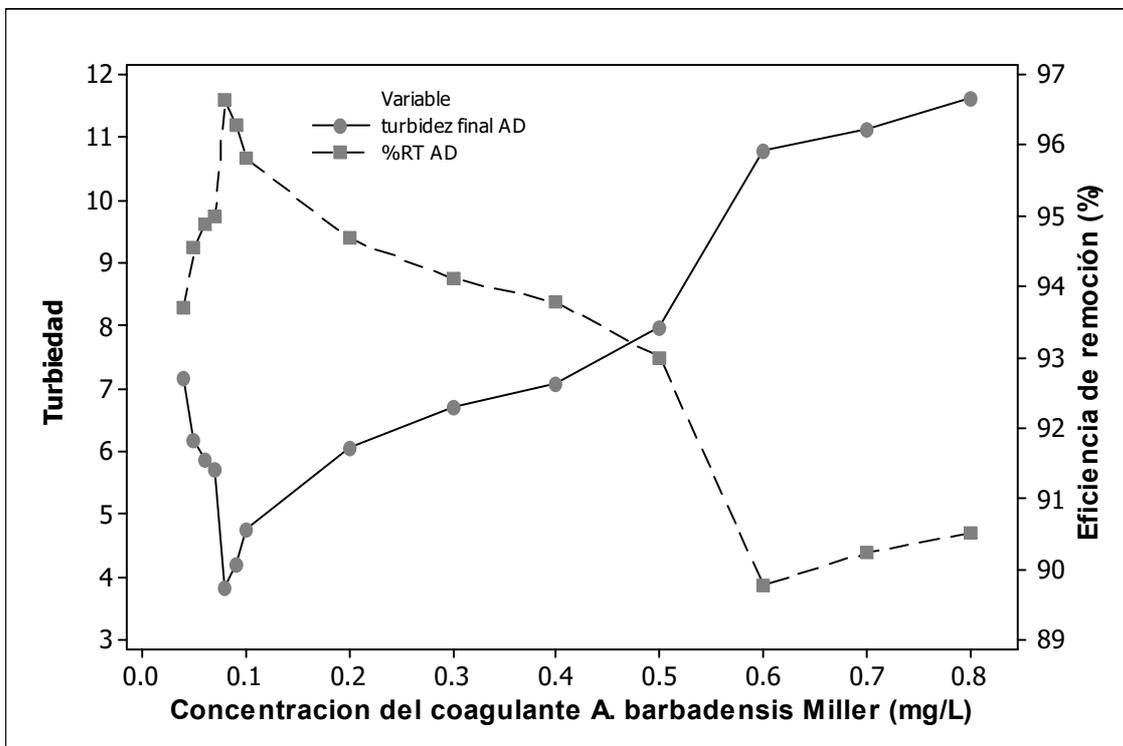


Figura 15: Remoción de la eficiencia de turbiedad en el agua residual acuícola (AD).

El comportamiento de cada una de las concentraciones, demuestran que remueven turbiedad. Sin embargo, en la tratabilidad del agua residual domestica (AD) las concentraciones fueron variadas, ya que entre menor la dosis de coagulante, menor la turbiedad. Las concentraciones en el tratamiento primario con el coagulante natural indican una diferencia significativa. Lo que significa que, el coagulante en polvo de *A. barbadensis* Miller es eficaz en la tratabilidad del agua residual doméstica (AD), al

remover turbiedad desde la primera dosificación y hasta encontrar una dosis óptima de mayor remoción en (AD).

#### 10.4.4. DBO<sub>5</sub>

En la figura 17, se muestra los resultados y comparación de la DBO<sub>5</sub> en las aguas residuales (AA) y (AD).

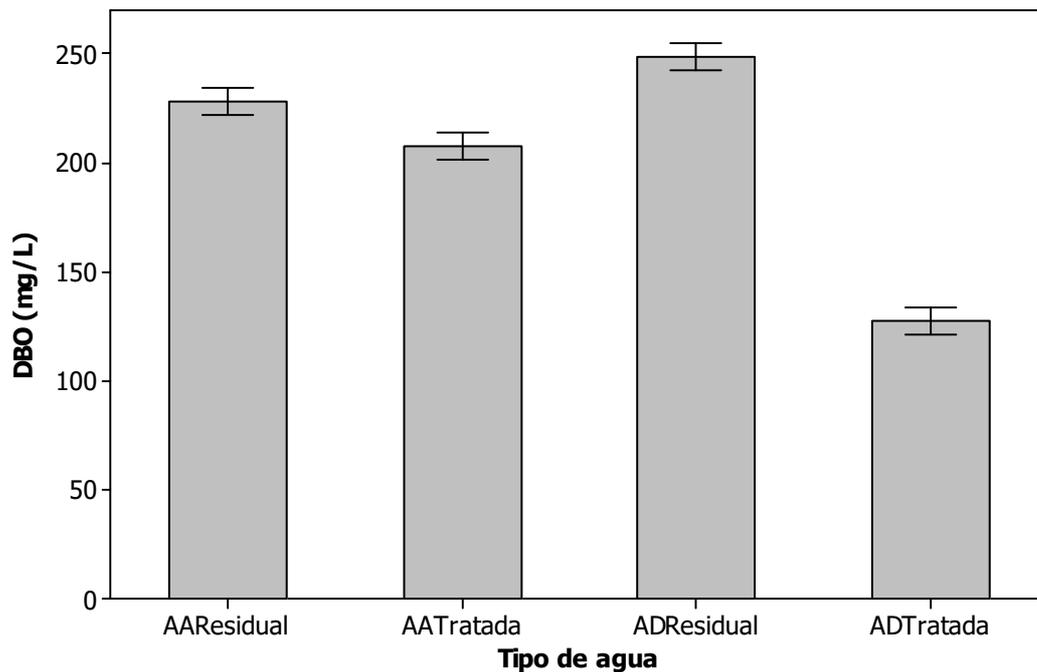


Figura 16: Comportamiento de DBO<sub>5</sub> (mg/L) antes y después del tratamiento coagulación-floculación

En el análisis de las dos aguas residuales, se obtuvo una DBO<sub>5</sub> inicial de 228 mg/L en AA y de 248 mg/L en AD. Las eficiencias de remoción de DBO<sub>5</sub> del AA y AD, fueron 8.77% y 49.19% respectivamente. Este alto porcentaje de DBO<sub>5</sub> en el AD, podría debe a las condiciones de pH y las características del agua residual.

#### 10.4.5. DQO

La DQO inicial de mayor relevancia es la de AA con 2,167 mg/L en comparación al AD con 503 mg/L, después del tratamiento con el coagulante natural, los valores de los parámetros en ambas aguas disminuyeron (ver figura 18)

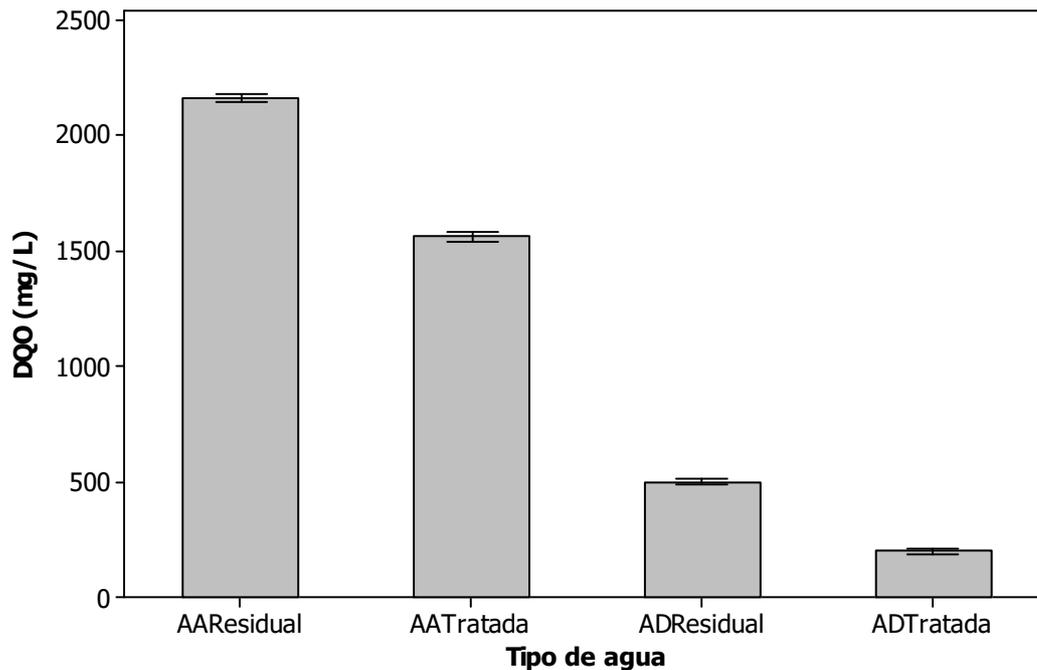


Figura 17: Valoración de DQO (mg/L) en el tratamiento del agua residual (AA) y (AD).

La remoción de DQO de las aguas residuales utilizadas en este estudio, es de 27.91 y 60.23% respectivamente. De acuerdo con los resultados comparativos, existe mayor eficiencia de DQO en el agua doméstica, ya que el coagulante natural utilizado es eficaz en aguas de menor turbiedad. Este análisis tuvo diferencia significativa, en cuanto al porcentaje de remoción de DQO en el tratamiento coagulación floculación, en los dos tipos de aguas residuales tratadas. Sin embargo, el mayor porcentaje de remoción de DQO fue en el (AD) ya que hubo mayor aglomeración de coloides, minimizando la concentración de materia orgánica y residuos.

#### 10.4.6. Nitrógeno

La concentración de nitrógeno inicial del AA y AD fue de 210 y 70 mg/L, (ver figura 19)

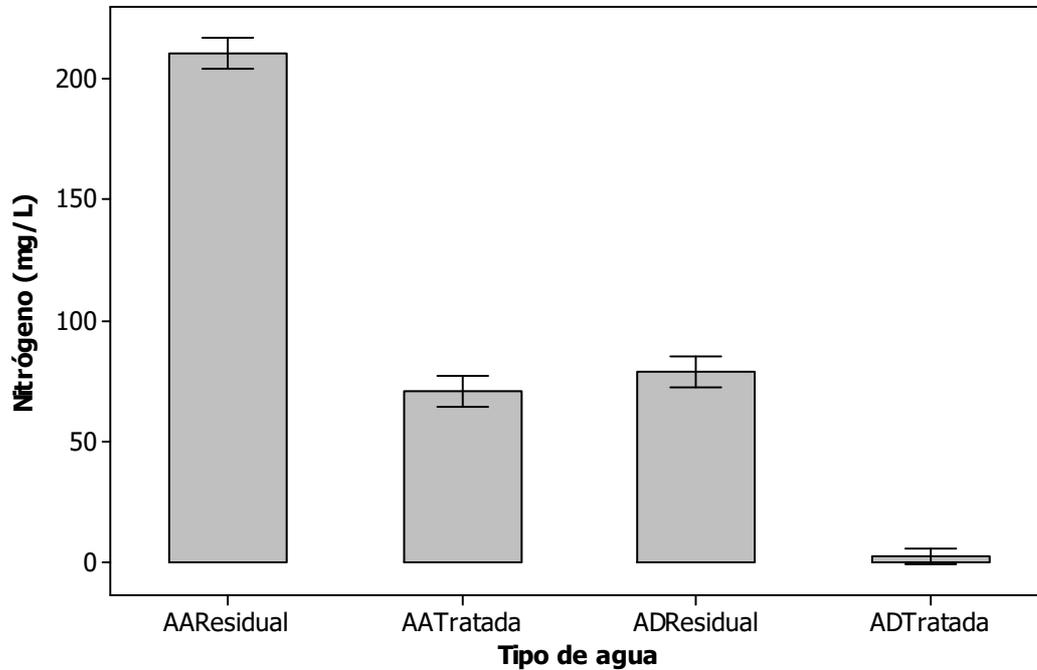


Figura 18: Niveles de nitrógeno (mg/L) del agua residual (AA) y (AD).

Después del tratamiento, la remoción de Nitrógeno para ambas aguas residuales tratadas, fue de 66.66% y 53.12%, respectivamente. El coagulante en polvo *A. barbadensis* Miller, demuestra que es eficaz para remover niveles de nitrógeno. Por lo cual, demuestra una diferencia significativa en un rango del 50-60%.

#### 10.4.7. Grasas y aceites

En la figura 20, la concentración de grasas y aceites en los dos tipos de aguas residuales fue de 52 y 64 mg/L en AA y AD. Al aplicar con el coagulante natural en polvo *A. barbadensis* Miller, las eficiencias fueron de 42.30% en el AA y de 53.12% en el AD.

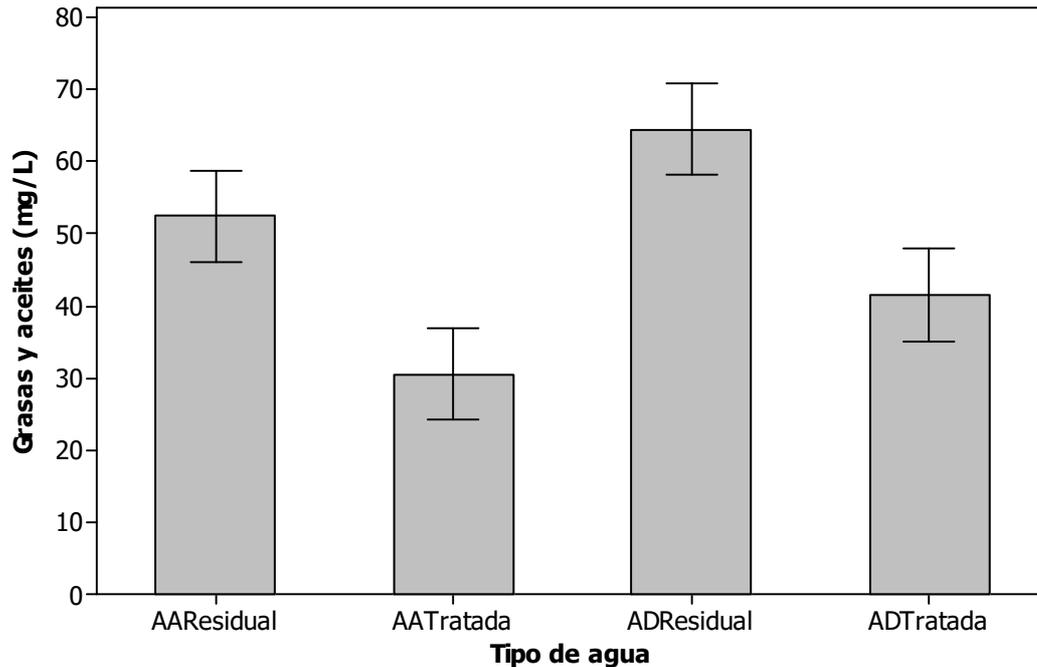


Figura 19: Eficiencia del coagulante natural en polvo *A. barbadensis* Miller para la remoción de grasas y aceites (mg/L)

Al realizar el análisis, este indicó que existe una diferencia significativa en la tratabilidad de las aguas residuales. Debido a que el mayor porcentaje de remoción obtenido (50%) con el coagulante natural, se puede utilizar para el tratamiento de grasas y aceites. Esto se debe a que las grasas y aceites con el agua residual, es una solución acuosa que se separa del efluente, hasta flotar y formar una nata. La cual, al entrar en contacto con el coagulante, atrapa esta capa por su consistencia mucilaginosa hasta sedimentarla.

#### 10.4.8. SST

En la figura 21, los valores de sólidos suspendidos totales (SST) del agua residual acuícola fue de 170 mg/L y del agua residual domestica de 125 mg/L. La dosificación del coagulante en polvo de *A. barbadensis* Miller, disminuyó los valores de los SST del agua residual acuícola a 85 mg/L y en la doméstica de 2 mg/L.

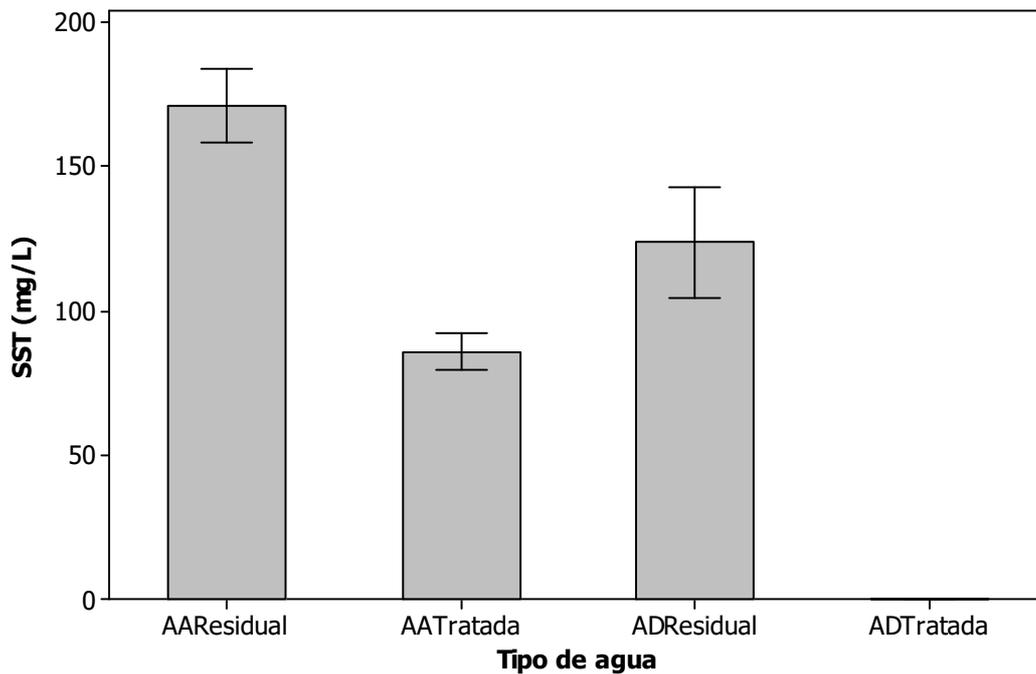


Figura 20: Resultados de SST (mg/L) de las aguas residuales (AA) y (AD).

Los resultados de mayor relevancia y eficiencia, en la tratabilidad del agua residual fue en el AA, con un porcentaje del 50 % en la eliminación de sólidos suspendidos totales.

### 10.5. Características de las aguas residuales tratadas

En el cuadro 21, se resumen las características de los dos tipos de agua residual después del tratamiento coagulación floculación.

Cuadro 20: Características del agua residual acuícola tratada y no tratada en base a la Norma-001-SEMARNAT-1996.

<b>Parámetro</b>	<b>Agua residual Acuícola tratada</b>	<b>Agua residual Doméstica tratada</b>	<b>Norma-001-SEMARNAT-1996.</b>
<b>pH</b>	6.52	7.90	<b>5-7</b>
<b>Turbiedad (NTU)</b>	90	3.84	<b>NA</b>
<b>DBO (mg/L)</b>	208	126	<b>200</b>
<b>DQO (mg/L)</b>	1562	200	<b>NA</b>
<b>Fósforo (mg/L)</b>	2.33	2	<b>30</b>
<b>Nitrógeno (mg/L)</b>	70	2	<b>60</b>
<b>Grasas y aceites (mg/L)</b>	30	32	<b>25</b>
<b>ST (mg/L)</b>	1024	279	<b>NA</b>
<b>STV (mg/L)</b>	159	81	<b>NA</b>
<b>SDT (mg/L)</b>	939	167	<b>NA</b>
<b>SSed (ml/L)</b>	0.1	0	<b>2</b>
<b>SST (mg/L)</b>	85	112	<b>200</b>
<b>SSV (mg/L)</b>	43	20	<b>NA</b>
<b>SDV (mg/L)</b>	116	61	<b>NA</b>

La caracterización del agua residual acuícola tiene diferencia significativa en los parámetros, de pH, DBO, nitrógeno y grasas y aceites de lo que establece la Norma-001-SEMARNAT-1996. En cambio, el agua residual doméstica, está por debajo de los límites máximos permisibles de esta misma, como se observa en el cuadro 21.

## 11. Discusión

### 11.1. Caracterización de los parámetros fisicoquímicos del agua residual doméstica y acuícola, antes y después del tratamiento primario coagulación-floculación

Los contaminantes en las aguas residuales son normalmente una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos, llamadas caracterizaciones fisicoquímicas (Cuenca *et al.*, 2012; Sperlig, 2017). Las aguas residuales domésticas (AD) se componen fundamentalmente de materia orgánica en forma soluble o coloidal y de sólidos en suspensión (Eckenfelder y Ford, 1970). Estos efluentes están compuestos de 98% de contaminantes como: sólidos suspendidos, compuestos orgánicos, (40-60% proteínas, 25-50% carbohidratos, 10% aceites y grasas), nutrientes (nitrógeno y fósforo), metales, sólidos disueltos inorgánicos, sólidos inertes, sólidos gruesos, compuestos no biodegradables y organismos patógenos (Ramalho, 1997; Campos, 1999).

En cambio las aguas residuales acuícolas (AA), están mayormente asociados a la elevada carga orgánica como sólidos suspendidos totales, sólidos inorgánicos totales, clorofila, altas concentraciones de nutrientes como nitrógeno y fósforo, las cuales a su vez son resultado de inadecuadas prácticas de manejo (sobre todo alimentación y fertilización) de los sistemas de cultivo (Guardado *et al.*, 2014; Casillas *et al.*, 2006, Miranda *et al.*, 2007). Estas aguas, poseen valores en un rango habitual promedio de medio a alto con una alcalinidad moderada de 7.78-9.56, turbiedad de 80-358 NTU, sólidos en suspensión 150-300 mg/L, DBO<sub>5</sub> 200-300 mg/L, DQO 300-600 mg/L, Nitrógeno 50-75 mg/L, Fósforo 15-20 mg/L, Grasas 50-100 mg/l, de acuerdo con diversos estudios (López y Campos, 2011; Yoval, 2013; Cuenca *et al.*, 2012; García *et al.*, 2006).

La caracterización de los dos tipos de aguas residuales acuícola y doméstica de esta investigación, antes del tratamiento primario, demuestran que la concentración de DQO están en un rango alto, agua residual acuícola de 2167 mg/L y doméstica de 503 mg/L, en donde la DQO se considera en un rango medio-alto cuando es de 400-800 mg/L (Metcalf y Eddy, 1995; Mantilla, 2017). Los demás parámetros analizados están por debajo o dentro de lo que rige la Norma-001-SEMARNAT-1996, excepto pH, DBO, nitrógeno, SSed, grasas y aceites, los cuales rebasan los límites de esta. Por lo que requiere de un tratamiento previo antes de ser reusados, vertidos o desechado. Ya que estos efluentes,

puede llegar a ocasionar impactos negativos ambientales a la hora de su descarga en algún cuerpo de agua como alcantarillado, riego acuícola o ríos.

## **11.2. Determinar propiedades fisicoquímicas del coagulante en polvo obtenido a partir de la planta *Aloe barbadensis* Miller.**

Para la obtención del coagulante en polvo *A. barbadensis* Miller, se llevó a cabo la recolección y extracción de la materia prima (gel) de las hojas maduras de esta planta. Esto de acuerdo con las técnicas referenciadas por Ramos y Paredes (2019), Pinto (2017), Pedroza *et al.*(2009) y Muavalli (2017).

El gel de *A. barbadensis* Miller contiene 86% a 90% de agua y una de las técnicas que favorece la preservación de sus propiedades como coagulante natural es por el método de liofilización (Nindo, *et al.*, 2009; Chandegara y Varshney, 2013). Tras algunos estudios recopilados y realizados por diferentes autores, se han determinado y caracterizado las propiedades fisicoquímicas de *A. barbadensis* Miller.

Se analizó la muestra del coagulante natural en polvo con un pH de 4.7, encontrándose dentro del rango de pH de 3.2-5.1 del gel *A. barbadensis* Miller, reportado por García *et al* (2007) Garcia y Silgado (2012), Perez *et al* (2006) y Calderon (2011), por lo que el método de liofilización no altera dicho parámetro.

La determinación de color es una propiedad organoléptica que se puede observar a simple vista, sin embargo en este estudio se analizó el color por medio de un colorímetro para el análisis del *A. barbadensis* Miller en polvo, este presenta una L\* (luminosidad del 77.84%), b\*(tonalidad de 89.82° grados, virando a color amarillo a verde) y su pureza es de 15.90%. Estos resultados son similares a los obtenidos en dos tipos de trabajos que analizaron gel y polvo de aloe vera, donde los valores para L\* fueron 85.30% y 80.79% respectivamente, siendo b\* de un color amarillo-verde, en resultados de ambas investigaciones, con un valor de a\* negativo (color verde tenue) (Pérez, *et al.*, 2006; Teran, 2011). Esto demuestra que el color del polvo de *A. barbadensis* Miller de este estudio y el de los trabajos mencionados, realizados tanto como con gel como con polvo, no son muy diferentes (Pérez, *et al.*, 2006; Teran, 2011).

En un gramo de *A. barbadensis* Miller en polvo, se determinó un 9.36% de proteína; al comparar este resultado con otros estudios de gel de la misma especie, se encontró que

otros autores llegaron a obtener de un 3.77 a 5.45% de proteína polvo, respectivamente (Varon, 2007; Ángel, 2010). Esto quiere decir que el Aloe Vera en polvo liofilizado, conserva mejor sus propiedades que en gel. Sin embargo, el exceso de proteína puede afectar el tratamiento de las aguas residuales, que son ricas en materia orgánica y nutrientes que contienen contaminantes patógenos, por lo que este porcentaje de proteína puede ayudar a su proliferación.

La Valoración por granulometría de *A. barbadensis* Miller en polvo, fue determinada por la densidad aparente y compacta, las cuales, al tener los resultados, se interpretan en el índice de Carr y Hausner. (Ordoñez, 2017; Abdullah y Geldart, 1999; Bhattachar *et al.*, 2003). El polvo *A. barbadensis* Miller indica en la valoración, que el índice de Hausner es de 1.42, este superior a 1.25, significa que tiene un flujo deficiente y en el índice de Carr, marco un 29.99% de compresibilidad y cohesión. La interpretación de estos dos índices en sus resultados, quiere decir que el Aloe no es bueno para ser comprimido, ya que la densidad, tamaño, forma, área de superficie y porcentaje de humedad pueden tener relevancia en cuanto a su compresibilidad; por lo que se recomienda el uso del polvo a granel para su aplicación como coagulante en la tratabilidad de las aguas.

Los carbohidratos totales de *A. barbadensis* Miller en polvo, tuvo una concentración promedio de glucosa de 56.90 mg/mg por 1 gramo de polvo de *A. barbadensis* Miller, es rico en carbohidratos, el cual contiene distintas cantidades de acemanano (manosa), glucosa y galactosa. El acemanano es una mezcla de polímeros de varias cadenas de longitud, donde se ha identificado la manosa como su componente activo para los tratamientos de agua residuales por su mecanismo de desestabilización de materia orgánica. El acemanano es la huella digital y señal característica de Aloe vera, ya que es el principal polisacárido natural del gel de Aloe Vera, encontrándose con un porcentaje del 82%, seguido por glucosa y galactosa con 10.5 % y 4.5 % respectivamente en el *A. barbadensis* Miller (Valoyes, 2012; Marante, 2003; Krokida, *et al.*, 2011). Cabe señalar que la determinación de los componentes o grupos funcionales de este estudio se determinó mediante espectroscopía infrarroja transformada de Fourier (FT-IR), donde se demuestra que el *A. barbadensis* Miller por el método de liofilización, aumenta la vida útil y no altera sus componentes funcionales, polisacáridos, ácidos orgánicos, vitaminas y minerales, incluso se encontró la presencia del acemanano. Como Minjares *et al.*, 2016 quien deshidrato el el *A. barbadensis* Miller por el método de liofilización y estudio los grupos funcionales de esta planta, indicando presencia de grupos -OH, -CH, C-O, COO-, CH<sub>3</sub> Otro estudio que se ha hecho sobre el Aloe, fue el análisis de su hoja en polvo

(secado al ambiente), reveló la presencia de diferentes grupos funcionales, y el espectro es similar al análisis de esta investigación, que van desde la presencia de manosa, OH, hidroxilo, estiramiento CH, alquilo, anillo aromático estiramiento C = C, CO flexión, alcoholes, éteres, ésteres, ácido carboxílico y anhídridos, SO<sub>3</sub>, sulfonatos, ácido sulfúrico y estiramiento C-Cl (Samson, 2014). De la misma forma, investigaron los grupos funcionales de toda la planta, hoja (piel), gel y flor de *A. barbadensis* Miller, explicando que la piel de la hoja, como el gel contienen mayor porcentaje de xilosa, manosa, glucosas, galactosas, rhamnosa, ácido glucurónico. Estos estudios presentan similitudes en los espectros y algunos grupos funcionales, con la investigación presente, sin embargo, el uso del gel en el tratamiento de aguas residuales a diferencia del polvo genera poco tiempo de vida a un cierto tiempo de almacén y al contacto con el ambiente, este empieza a oxidarse por lo que pierde la mayoría de sus propiedades, entre ellos manosa, la cuales el principal componente activo para la coagulación, por lo que esto le confiere ventajas al uso de *A. barbadensis* Miller en polvo (Valoyes, 2012; Marante, 2003).

### **11.3. Determinar las condiciones de operación (dosis y velocidad) de acuerdo con el mayor porcentaje de remoción de turbidez para el tratamiento de las aguas residuales tratadas.**

Para que se lleve a cabo la coagulación-floculación, hay dos factores determinantes: el tipo y dosis de coagulante y las características fisicoquímicas del efluente a tratar, como DQO (mg/L), SST (mg/L), Turbiedad (NTU), SST (mg/L) y pH (Teh, 2014).

El coagulante natural en polvo *A. barbadensis* Miller, tuvo resultados óptimos en pequeñas concentraciones, para la tratabilidad de las aguas residuales acuícolas (0.200 mg/L) y doméstica (0.080 mg/L). El método que se aplicó en la coagulación fue adsorción-desestabilización, ya que este tipo de tratamiento requiere que el coagulante sea transportado, hasta la superficie de los coloides en una fracción de segundo, con cierta velocidad (RPM) como se muestra en el cuadro 16 y así formar un flóculo en la sedimentación.

El uso de este coagulante, en el tratamiento primario, de las aguas residuales, mostraron una acidificación de 6.52 y 7.90 respectivamente, esto se debe a que el rango óptimo de pH depende del coagulante y el agua que se utilizará para el tratamiento, ya que el *A. b barbadensis* Miller requiere un pH entre 6 y 7 para el tratamiento de efluentes (Parra, 2011).

Los coagulantes naturales, tienen diferente capacidad de neutralizar las partículas y el crecimiento del floculo, el cual es inducido por el contacto y el diámetro de partícula, según Valencia (1992).

La caracterización de los dos tipos de aguas residuales después del tratamiento coagulación-floculación se encuentra por debajo de los límites máximos permisibles que establece la Norma-001-SEMARNAT-1996, como se muestra en el cuadro 21, excepto el agua residual acuícola, que se encuentra arriba del límite, en nitrógeno, DBO, grasas y aceites de esta misma. Esto se debe a que el coagulante natural es característico de polisacáridos con alto contenido en ácidos urónicos, fructosa y otros azúcares hidrolizables, por lo que puede llegar a aumentar los niveles de contaminación en cuanto a materia orgánica disuelta de estas aguas, la cual está conformada de nutrientes y microorganismos patógenos (Vega, *et al.*, 2005; Vásquez, 1994; García y Silgado, 2012).

Sin embargo, el comportamiento del coagulante *A. barbadensis* Miller en polvo, tuvo diferencia significativa en cuanto al tratamiento del AD en la remoción de DBO<sub>5</sub> (49.19%) y DQO (60.23%). Algo similar fue reportado por Malqui (2017), quien aplicó el mismo coagulante en polvo, con una dosis óptima de 800 mg/L, para el tratamiento de un canal, donde se evidenciaron altos niveles de DBO<sub>5</sub> y DQO, después del tratamiento, los valores de remoción de DBO<sub>5</sub> y DQO, fueron 80.64% y 90.11% respectivamente. Gazabon *et al.*, (2014) evaluó la eficiencia del nopal *Opuntia ficus-indica*, en comparación al sulfato de aluminio, demostrando que con una concentración de 40 mg/L, se obtuvo una remoción de turbidez de 99.30% en el coagulante sintético, mientras que con el mucílago *Opuntia ficus-indica* se logró una remoción de turbidez de 83.66%. También Martínez, 2011 para el tratamiento de aguas residuales domesticas, utilizaron una dosis optima de 300 mg/L de *Moringa oleifera* donde alcanzaron un porcentaje de remoción de turbiedad de 95.5%.

En esta investigación la remoción de turbiedad fue de del 70.96% en AA y 95% en AD, que al compararse con la turbidez obtenida con el coagulante sintético sulfato de aluminio, que remueve 95.60% de turbiedad en aguas residuales domésticas (Sandoval y Laines, 2013), demuestra que, el coagulante *A. barbadensis* Miller en polvo, es efectivo para la clarificación de aguas residuales, con la ventaja de no afectar a la salud ni al medio ambiente.

## 12. Conclusiones

Los tratamientos de los efluentes se determinan mediante las características de las aguas a tratar. De la caracterización de los dos tipos de aguas residuales AA y AD, cuatro parámetros ( $DBO_5$ , NTK, GyA y SSed), se encuentran por arriba de los límites máximos permisibles con base a la Norma-001-SEMARNAT-1996. Además de tomar en cuenta otros parámetros, como DQO, pH y Turbidez, con valores considerablemente altos. Esta caracterización permitió, aplicar un tratamiento de coagulación-floculación.

Al obtener el coagulante en polvo, se pudo determinar que el método de liofilización en el que se preservó al coagulante en polvo de *A. barbadensis* Miller, pues le permite conservar mejor sus características organolépticas. Al realizar un estudio por Espectrofotometría Infraroja por Transformada de Fourier (FTIR), se observó la presencia de varios grupos funcionales, uno de ellos asociado al compuesto activo "acemanano", reportado previamente como el agente principal en la coagulación. Este método de obtención del polvo, proporciona un producto natural con gran potencial para su uso en aplicaciones del tratamiento biotecnológico de aguas residuales.

El coagulante en polvo aplicado en el tratamiento de aguas acuícolas y domésticas, con pH neutro a velocidades de 100 y 30 rpm por 2 minutos y 30 minutos, con una dosis de 0.200 mg/L para el AA y 0.080 mg/L para AD. De estas condiciones de operación aplicadas, se determinaron las remociones de turbidez de 70 y 96% respectivamente. La aplicación de este coagulante natural, es competente con la de un coagulante químico (sulfato de aluminio) al tratar efluentes. El polvo de *Aloe barbadensis* Miller tiene excelentes eficiencias de remoción, características que lo catalogan como biodegradable, y su uso minimiza el impacto a la salud y al medio ambiente.

Anexo 1.

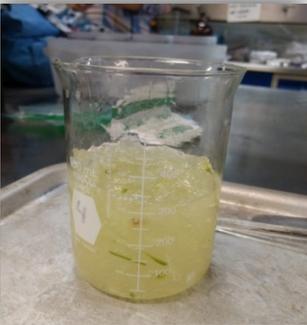
Caracterización de las aguas residuales

	Acuícola	Doméstica
pH		
DBO		
DQO		
Fósforo		

<p>Nitrógeno</p>		
<p>Turbidez</p>		
<p>Grasas y aceites</p>		
<p>Sólidos sedimentales</p>		
<p>Sólidos totales (ST) Sólidos totales volátiles (STV) Sólidos disueltos totales (SDT)</p>		

## Anexo 2

### Obtención del Gel de Aloe vera para el proceso de liofilización.

Proceso	Figura.
Materia prima.	 A photograph showing a potted Aloe vera plant on a laboratory bench. In the background, there are various lab equipment like bottles and containers.
Remoción de la cutícula	 A close-up photograph of a person's hands wearing white gloves, using a knife to peel the outer green skin (cuticle) off a slice of Aloe vera leaf on a metal tray.
Aloe vera en gel	 A photograph of a clear plastic beaker containing a thick, translucent, yellowish-green gel extracted from the Aloe vera leaf. The beaker is placed on a metal tray.

Peso de bolsa aloe vera en gel



Liofilización



Molienda

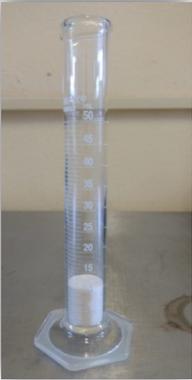


Tamizado	
Aloe vera en polvo	

### Anexo 3.

#### Caracterización del coagulante en polvo Aloe *Barbadensis* Miller

Propiedades.	Método
Propiedades organolépticas	
Color	
Carbohidratos	
Proteínas	

Densidad a granel	
-------------------	--

**Anexo 4.**

**Pruebas de jarras concentraciones optimas**

Concentraciones	Aguas domesticas
0.200	
0.080	<p data-bbox="831 1442 1050 1480"><b>Agua acuícola</b></p> 

**Anexo 5**

**Caracterización de las aguas residuales tratadas por el coagulante *Aloe barbadensis* Miller**

	<b>Acuícola</b>	<b>Doméstica</b>
<b>DBO</b>		
<b>DQO</b>		
<b>Fósforo</b>		

Nitrógeno



Grasas y aceites



Sólidos sedimentales



Sólidos totales (ST)  
Sólidos totales volátiles (STV)  
Sólidos disueltos totales (SDT)



sólidos suspendidos totales (SST)  
sólidos suspendidos volátiles (SSV)



### 13. Bibliografía

- Abdullah, & Geldart. (1999). The use of bulk density measurements as flowability indicators. *Powder Technology* , 151-165.
- Acosta, Y. L. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA* , 10-17.
- Aguilar, Saez, Llorens, Ortuño, & Soler, &. (2002). *Tratamiento fisicoquímicos de aguas residuales Coagulación-Floculación* (Primera ed.). España: F.G. Grafs S.L.
- Aguinaga, S. (1996). *Manual de procedimientos analíticos para aguas y efluentes*. DIAMA.
- Ahluwat, & Khatkar. (2011). Processing, food applications and safety of aloe vera products: A review. *J. Food Sci. Technol. Food Sci. Technol* , 525-533.
- Andrés, J. B. (2003). MANUAL DE TÉCNICAS ANALÍTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y CONTAMINANTES MARINOS. *INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS* .
- Angel, E. d. (2010). Acción biomedica y potencial economico de la sabila (*Aloe barbadensis M.*). *tesis* , 60.
- Arcila, H. R., & Peralta, J. J. (2015). Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua. *Universidad militar de nueva granada* , 135-156.
- Arias, J. L. (2017). Evaluación de alternativas de potabilización a bajo costo en comunidades palafíticas en el caribe norte colombiano. *tesis* , 8.
- Arti Nigam, A. A. (2007). *Lab Manual in Biochemistry, Immunology and Biotechnology and Biotechnology*. India: McGraw-Hill Education.
- Atkins, J. (2007). *Principios de la química*. España: panamericana.
- Aurelio, P. S., Federico, G. L., Gaxiola, S., Trejo, J. A., Ricardo, C., & José, R. T. (2009). Caracterización del proceso de industrialización y comercialización de la salla: Estudio de caso. *Chapingo Serie Zonas Áridas* , 241-246.
- Aziz, H. A., Alias, S., Assari, F., & Adlan, M. N. (2007). The use of alum, ferric chloride and ferrous sulphate as coagulants in removing suspended solids, colour and COD from semi-aerobic landfill leachate at controlled pH. . *Waste Management & Research* , 556-565.
- Báez, L. F. (2012). Determinación de la eficiencia de las características coagulantes y floculantes del *tropaeolum tuberosum*, en el tratamiento de agua cruda de la planta puengasi de la epmaps. *tesis* , 20-21.

- Barandozi, F. N., & Enferandi, S. T. (2012). FT-IR study of the polysaccharides isolated from the skin juice, and flower of aloe vera tissues affected by fertilizer treatment. *Organic and medicinal chemistry letters* , 2-33.
- Baruah, & Bordoloi. (2016). Aloe vera: A multipurpose industrial crop. *ELSEVIER* , 951-963.
- Baruah, A., Bordoloi, M., & Baruah, H. P. (2016). Aloe vera: A multipurpose industrial crop. *ELSEVIER* , 951-963.
- Baruah, A., Bordoloi, M., & Baruah, H. P. (2016). Aloe vera: A multipurpose industrial crop. *Industrial Crops and Products* , 951-963.
- Bhattachar, S., Hedden, D. B., Olsofsky, A., & Canter, K. G. (2003). Evaluation of the Vibratory Feeder Method for Assessment of Powder Flow Properties. *International Journal of Pharmaceutics* , 296-385.
- Boggio, H. B. (1966). *Liofilizacion, un metodo de secado para alimentos*. Lima, Peru: Tesis.
- bolto, B., & Gregory, J. (2007). Organic polyelectrolytes in water treatment. *ScienceDirect* , 2301-2324.
- Bolton, B. (1995). Soluble polymers in membranes in water purification. *Pergamon* , 987-1041.
- Bonilla, M. J., & Herrera, L. G. (2016). Potencial industrial del Aloe vera. *Revista Cubana de Farmacia* . , 139-150.
- Bratby, J. (1980). *Coagulation and flocculation with an emphasis on water and wastewater treatment*. England.
- Brito, N. V. (2017). Alternativa de potabilización para el agua que abastecerá a la ampliación del aeropuerto internacional de la ciudad de México. *Tesis* . Mexico.
- Brown, G., & Sallee, E. (1977). *Determinación de nitrógeno por el método de Kjeldahl*. Barcelona: REVERTE.
- Burgess, J., Parsons, S., & Stuetz, R. M. (2001). Developments in odour control and waste gas treatment biotechnology: a review. *ELSEVIER* , 35-63.
- BURLINGAME, J. M. (1996). Carbohydrates and Related Food Components: INFOODS Tagnames, Meanings, and Uses. *JOURNAL OF FOOD COMPOSITION AND ANALYSIS* , 100-118.
- Calderón, D. F. (2012). El gel de Aloe vera: Estructura, composición química, procesamiento, actividad biológica, e importancia en la industria, farmacéutica y alimentaria. *Revista Mexicana de ingeniería química* . , 24.
- Callejas, F. R. (2012). Tablas de Espectroscopía Infrarroja.

- Campa, J. A. (1994). *Cultivo alternativo para las zonas aridas y semiaridas*. Mexico: INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGIA.
- Campos, J. N. (1999). Tratamiento de esgoto sanitarios por proceso anaerobio e disposicao controlada no solo. *RECOPE* , 410.
- Cardenas, Y. A. (2000). *Tratamiento de agua coagulacion y floculacion*. SEDAPAL.
- Chandegara, & Varshney. (2013). Aloe vera L. processing and products: A review. *College of agricultura engineering and technology* , 2249-4340.
- Cheremisiuff, N. P. (2002). *Hadbook of Water and Wastewater Treatment Technologies*. United States of America: Butterworth Heinemann.
- Claros, J. N. (2014). Coagulantes-floculantes organicos e inorganicos elaborados de plantas y del reciclaje de la chatarra, para el tratamiento de aguas conntaminadas. *tesis* , 14.
- Claros, J. N. (2014). Coagulantes-floculantes organicos e inorganicos elaborados de plantas y del reciclaje de la chatarra, para el tratamiento de aguas contaminadas. *Universidad pedagogica nacional francisco morazan* .
- Cocoletzi, H., Almanza, Á., Agustin, F., Nava, V., & Cassellis, R. (2009). Obtención y caracterización de quitosano a partir de exoesqueletos de camarón. *Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales* , 57-60.
- Cotruvo, J. (2011). *humano, Guías para la calidad del agua de consumo*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud 2018.
- Cuenca, E. D., Granados, A. R., & Calzadas, K. E. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la tecnica del istema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energia. *Readalyc* , 78-97.
- Curran, W. y. (2006). Metodo para tratar las aguas residuales de la industria. *Manual del tratamiento de desechos industriales*.
- Delmoro, J., Muñoz, D., Nadal, V., Clementz, A., & Pranzetti, V. (2010). EL COLOR EN LOS ALIMENTOS: DETERMINACIÓN DE COLOR EN MIELES. *Universidad del Centro Educativo Latinoamericano* , 142-155.
- Diaz, D. I., & Rojas, D. F. (2017). Diseño conceptual de un sistema de tratamiento de aguas residuales para la empresa transportadora escolar Camargo hermanos. *Tesis* , 29-35.
- DuBois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & & Smith, F. (1956). Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Analytical Chemistry* , 350-356.
- DUBOIS, M., GILLES, K., HAMILTON, J. K., REBERS, P. A., & & SMITH, F. (1951). A Colorimetric Method for the Determination of Sugars. *Nature* , 167.

Duois, M., Gilles, A., & Smith, F. D. (1956). *Colorimetric method for determination of sugars and related substances*. Minesota.

Dweck, R. &. (1999). Aloe vera leaf gel: a review update. *ELSERVIER* , 7.

Eddy, M. &. (1995). *Ingenieria de aguas residuales* (Vol. 1). (Tercera, Ed.) Madrid: MgGRAW-HILL.

Edward, D. S., & Vaitheeswaran, M. (2014). FT-IR AND GC-MS DETERMINATION OF BIOACTIVE CONSTITUENTS OF ALOE BARBADENSIS MILLER (LILIACAE). . *World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences* .

f.

Fayos, B. G., Arnal, J. M., & Sancho, M. (2003). Uso de coagulantes naturales: analisis del potencial en el tratamiento del agua potable para paises desarrollados y en vias de desarrollo. *International Conference on Water and Sustainability* .

Femenia, A., Sánchez, E., Simal, S., & Rossello, C. (1999). Compositional features of polysaccharides from Aloe vera (Aloe barbadensis Miller) plant tissues. . *Carbohydrate Polymers* , 109-117.

Fernandez, D., Vazquez, A., Perez, C., Chanes, W., Gonzales, A., Dominguez, C., et al. (2012). El gel de aloe vera: estructura, composicion quimica, procesamiento, actividad biologica e importacia e la inndustria farmaceutica y alimetaria. *Revista mexicada de igeieria quimica* , 23-43.

Filho, M. &. (2008). An overview of mannan structure and mannan-degrading enzyme systems. *Springer Link* , 79-165.

Flaten, T. P. (2001). Aluminium as a risk factor in Alzheimer's disease, with emphasis on drinking water. *Brain Research Bulletin* , 187-196.

Fúquene, D. M., & Yate, A. V. (2018). Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. *ECAPIMA WORKING PAPER* , 8.

Furman, H. (1962). *Standard methods of chemical analysis*. Priceton .

Galvin, R. M. (2011). *Proceso fisicoquimico en depuración de aguas*. Cordoba: Universidad de cordoba.

Garcia, I. M., Rodríguez, J. R., Rodríguez, J. J., Suárez, B. P., Bocardo, J. R., & Martín, N. S. (2006). *Guía sore los tratamietos de aguas residuales uraas para pequeños ucleos de polacio. Mejora de la calidad de los efluetes*. Canarias: ICREW.

García, J. M., & Silgado, L. E. (2012). *Evaluación del poder coagulante de la tuna (Opuntia ficus indica) para la remocion de turbidez y color en aguas crudas*. CARTAGENA DE INDIAS: Tesis.

- García, J., Hernández, M. M., & Mujeriego, R. (1988). Tratamiento de aguas residuales urbanas mediante lagunas de alta carga: evaluación experimental. *Sección de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental* , 35-50.
- García, R., Becerra, H., Cornejo-Villegas, Fonseca, P., & Molina, R. (2007). Physicochemical Characterization of Nopal Pads (*Opuntia ficus indica*) and Dry Vacuum Nopal Powders as a Function of the Maturation. *Springer Science* , 107-112.
- Gasch, J. G. (2005). Densificación y flujo de lechos de partículas de cuarzo . *Universitat Jaume I de Castelló* , 13.
- Gauthier, E., Fortier, I., Courchesne, F., Pepin, P., Mortimer, J., & Gauvreau, A. D. (2000). Aluminum Forms in Drinking Water and Risk of Alzheimer's Disease. *Environmental Research Section* , 234-246.
- Gil, C. A. (2009). Estandarización y validación de una técnica para medición de la demanda bioquímica de oxígeno por el método respirométrico y la demanda química de oxígeno por el método colorimétrico. *Tesis* , 38.
- González, L. V. (2013). Remoción de turbiedad de agua con coagulantes naturales obtenidos de semillas (*Eritrina americana*, *Quercus ilex*, *Acacia farnesiana*, *Viscum album* y *Senna candolleana*). *Instituto de Estudios Ambientales, Universidad de la Sierra Juárez, Oaxaca, Mex.* , 30-41.
- González, E. C. (2003). Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. *Fundación ICA* , 1.11-1.31.
- Grattan, R. B. (1992). Instrumentation Control and automation in the control of biological effluent treatment. *ISA* , 111-123.
- Grieken, R. E., & Markowicz, A. A. (2002). *Handbook of X-Ray Spectrometry*. New York: Marcel Dekker.
- Grindlay, D. & (1986). The aloe vera phenomenon: a review of the properties and modern use of the leaf parenchyma gel. *ELSERVIER* , 117-151.
- Guardado, R. H., Córdova, L. R., Ocaña, L. F., Porchas, M. M., Baeza, A. M., & Cornejo, M. A. (2014). Efecto de efluentes de granjas camaronícolas sobre parámetros de la calidad del agua y del sedimento frente a la costa de Sonora, México. *Ciencias marinas* , 221-235.
- Gutiérrez, J. B. (2000). *Ciencia y Tecnología, Principios generales de los alimentos*. España: Díaz de Santos.
- h. (n.d.).

- Hamman, J. (2008). Composition and Applications of Aloe vera Leaf Gel . *Molecules* , 1599-1616.
- Heggors, J., Pelley, R., & Robson, M. (1993). Beneficial Effects of Aloe in Wound Healing . *Phytotherapy research* , 48-52.
- Henry, G., & Heink, G. (1999). *Ingeieria ambietal* . Mexico.
- Ibraheem, N., Hasan, M., Khan, R., & Mishra, P. (2012). Understanding Color Models: A Review. *ARNP Journal of Science and Technology* , 256-275.
- Jahn, S. A. (1988). Using Moringa Seeds as Coagulants in Developing Countries. *American Water Works Association* .
- JANETH, C. A., & ELIZABETH, P. U. (2011). "DETERMINACIÓN DE CARBOHIDRATOS TOTALES EN BEBIDAS ANALCOHÓLICAS CONSUMIDAS POR ADOLESCENTES EN LA CIUDAD DE CUENCA Y NABÓN". Ecuador.
- Jiménez C., B., & J.C. Durán, J. M. (2010). El Agua en México: cauces y encauces. *AMC-Conagua* .
- Kelderman, & Kruis. (2001). Laboratory course aquatic chemistry and its applications in enviromental engineering. *International institute for infrastructural* .
- Kiral, G., & Bautista, Q. (2015). Importancia de los coagulantes, floculantes y agentes deshidratantes de lodos en una planta de tratamiento de aguas. *Facultad de ingenieria* , 4.
- Kirchmer, C., Aroleda, J., & Castro, M. L. (1975). Polimeros naturales y su aplicacion como ayudantes de floculacion. *Centro panamericano de ingenieria sanitaria y ciencias del ambiente* , 1-31.
- Klein, A., & Penneys, N. (1988). Aloe vera. *Jourñal of the americañ academy of demartology* , 714-720.
- Kopytko, M. I., Villamizar, E. P., & Picón, Y. R. (2014). Application of Natural Product (Aloe Vera) in Coagulation-Flocculation Procedures, for Water Treatability Study. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)* , 444-456.
- Kotera, & Furusawa, a. K. (1970). Colloid chemical studies of polystyrene latices polymerized without any surface-active agents. *Kolloid-Zeitschrift & Zeitschrift Für Polymere* , 837-842.
- Krokidaa, M., Pappab, A., & Agaliofia, M. (2011). Effect of drying on Aloe's functional components . *ELSEVIER* .
- Kumar, V., & Asharuddin, S. M. (2017). Applications of Natural Coagulants to Treat Wastewater: review . *ResearchGate* , 3.

- Kumar., T. (2019). Physicochemical and organoleptic properties of spray-dried pineapple powder: Effect of maltodextrin concentration and inlet air temperature. *ResearchGate* , 1029-1034.
- Lamvistos, C. R. (2018). Valoración del impacto de diferentes biopolímeros estabilizantes en las propiedades de la naranja en polvo. *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA* .
- Legard, X. L., Gallardo, A. T., Echavarría, C. A., Sánchez, F. S., & Betancur, L. F. (2017). Comparación de métodos que utilizan ácido sulfúrico para la determinación de azúcares totales. *Rev. Cubana Química* , 180-198.
- Lim, Z. X., & Cheong, K. Y. (2015). Effects of drying temperature and ethanol concentration on bipolar switching characteristics of natural Aloe vera-based memory devices. *PCCP* .
- Loewus, F. A. (1952). Improvement in Anthrone Method for Determination of Carbohydrates . *Analytical Chemistry* , 2019.
- López, & Sarli. (2016). El modelo CIELAB, las formulas de diferencia de color y el uso de la orma europea en 12878 en morteros y hormigoes coloreados . *ciencia y tecnologia de los materiales* .
- lopez, D. C., & Rodriguez, C. A. (2014). *Quimica coloidal, Pricipios y aplicacioes*. Clomia .
- Lu, T., & Chen, Y. L. (2013). Techniques for fabrication and construction of three-dimensional scaffolds for tissue engineering. *International Journal of Nanomedicine* , 337-350.
- Machado, D. S., Cervantes, J. L., Sendón, R., & Silva, A. S. (1937). *Trends in Food Science & Technology*.
- Manfugas, J. E. (2007). *Evaluacion Sensorial*. Cuva : Uñiversitaria .
- Marante, F. J. (2003). Los polisacáridos mucilaginosos de Aloe vera (AVMP): estabilidad. *ResearchGate* .
- Martel, A. B. (2000). *Coagulacion*. Madrid.
- McMurry, J. (2004). *Química orgánica*.
- Mihelcic, J. R., & Zimmerman, J. B. (2011). *Ingenieria ambiental*. New Jersey, USA.: Alfaomega.
- Minolta, K. (2012). <http://sensing.konicaminolta.com.mx/2014/09/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>. Retrieved from <http://sensing.konicaminolta.com.mx/2014/09/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>: <http://sensing.konicaminolta.com.mx/2014/09/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>

- Mondragon, R., Julia, E., BARBA, A., & Jarque, J. C. (2014). Preparación y caracterización de nanofluidos: Influencia de variables sobre su estabilidad, estado de aglomeración y propiedades físicas. *Cerámica y Vidrio* , 103.
- Mora, R. (1997). *NutricioN CeNtral Espacial. EN soporte NutrucioNal especial*. Bogotá Colombia: Médica internacional.
- Muttamara, S. (1996). Wastewater characteristics. *Elsevier* , 147.
- Namazi, F. (2009). Aloe vera in dermatology: a brief review. *pubmed* , 85-91.
- Navarta, M. d., Ojeda, C. B., & Rojas, F. S. (2008). Aplicación de la Espectroscopia del Infrarrojo Medio en Química Analítica de Procesos. *Sociedad Química de México* , 1870-1809.
- Navas, J. S. (2006). *Liofilizacion*. Colombia: ReCiTeLa.
- Nielsen, S. (1998). *Food Analysis*. Ruth Bloom.
- Nindo, Powers, & Tang. (2009). Termal properties of aloe vera powder and rheology of reconstituted gels. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* , 1193-1200.
- Nogueiraa, L., Silvab, F., & Ferreirab, I. (2005). Separation and quantification of beer carbohydrates by high-performance liquid chromatography with evaporative light scattering detection. *Journal of Chromatography A* , 207-210.
- Noloya, A., Sagastume, J. M., & Guereca, L. P. (2013). *Seleccion de tecnologias para el trata miento de aguas residuales municipales* . Mexico: ResearchGate.
- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J. M., & Guereca, L. P. (2013). *Selesccion de tecnologias para el tratamiento de aguas residuales municipales*. Mexico: Univercidad Nacional Autonoma de Mexico.
- Odegard, H. (1998). Optimised particle separation in the primary step of wastewater traetment. *Pergamon* , 43-53.
- Okamura, N., Asai, M., Hine, N., & Yagi, A. (1996). High-performance liquid chromatographic determination of phenolic compounds in Aloe species . *Journal of Chromatography* , 225-231.
- Oliag, P. T. (2012). *Evaluación del color y tolerancia de color en alimentos a través del espacio CIELAB*. Valeñcia : Universitat Politècnica de València.
- OLMOS, L. N. (2017). EFECTO DEL EXTRACTO DE GEL LIOFILIZADO DE Aloe Vera SOBRE Listeria monocytogenes EN LA ELABORACIÓN DE QUESO CAMPESINO. . *UNIVERSIDAD DE LA SALLE* , 37.

- Ordoñez, P. G. (2017). Aplicación del método SeDeM en la caracterización de sustancias pulverulentas para la preformulación y formulación de formas farmacéuticas por vía oral. *Universidad Técnica Particular de Loja* , 12.
- Orellana, J. (2005). Características de los líquidos residuales . *Igeiería sanitaria* , 1.
- Ortiz, D. G., & Picornell, E. L. (2009). *La familia aloaceae en la flora aloctona valencia*. Valencia: Bouteloua.
- Osorno, H. A. (2009). Evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de tratamiento de agua potable. *Universidad nacional de Colombia* , 7.
- Padilla, N. B. (1999). *Operación y mantenimiento de plantas de potabilización de agua*.
- Pérez, M. V., Villavicencio, M. B., & Priscila, G. A. (2002). COAGULANTES NATURALES COMO COADYUVANTES EN LA CLARIFICACIÓN DE AGUA RESIDUAL. *Universidad Autónoma Metropolitana* .
- Piqué, T., & Vázquez, A. (2012). USO DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) EN EL ESTUDIO DE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO. *CONCRETO Y CEMENTO. INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO* , 62-71.
- Piqué, T., & Vázquez, A. (2012). USO DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) EN EL ESTUDIO DE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO. *CONCRETO Y CEMENTO. INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO* , 62-71.
- Puentes, N. A. (2005). Coagulación-floculación. *Facultad de ingeniería y arquitectura* , 17.
- Qiang, & Feng, Q. (2006). Preparation of 3-D regenerated fibroin scaffolds with freeze drying method and freeze drying/foaming technique. . *Springer Science* , 1349-1356.
- Rahman, S., Carter, P., & Bhattarai, N. (2017). Aloe Vera for Tissue Engineering Applications. *Funct Biomater* , 1-17.
- Ramalho, R. S. (1997). *Introduction to Wastewater Treatment Processes*. New York: Academic Press.
- Ramos, F. S., & Paredes, I. V. (2019). *Efecto de la concentración de A. barbadensis Miller (Savila) y tiempo de floculación en la remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica biodegradable de aguas residuales municipales sector el cerrillo, Santiago de Chuco*. Peru: Universidad Nacional de Trujillo.
- Ramos, R. L. (2017). *Importancia y aplicaciones de la adsorción en fase líquida* . San Luis Potosí.

- Ravi, S., Kabilar, P., Velmurugan, S., Kuma, R. A., & Gayathiri, M. (2011). Spectroscopy Studies on the Status of Aloin in Aloe vera and Commercial Samples . *Journal of Experimental Sciences* , 10-13.
- REYES, C. E. (2015). USO DE POLÍMEROS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO. *Tesis* , 57.
- Reynolds, T. (2004). The Genus Aloe. Medicinal and Aromatic Plants. *Journal of Ethnopharmacology* , 3013.
- Robles, A. N., Gonzales, E. V., Hernandez, J. R., & Molgora, C. C. (2000). *Alternativas de tratamiento de aguas residuales*. Mexico: IMTA.
- Rodriguez, E. E., & Velasquez, C. S. (2015). ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS PROCESOS: COAGULACIÓN FLOCULACIÓN, FILTRACIÓN Y SU COMBINACIÓN, PARA DETERMINAR. *tesis* , 12.
- Romagnoli, M. (2006). ESTUDIO DEL EFECTO DE LOS ADITIVOS EN LA FLUIDEZ DE LOS POLVOS CERÁMICOS. *Departamento de Ingeniería de los Materiales y del Medio Ambiente* , 256.
- Ronzano, E., & Dapena, J. L. (2002). *Tratamiento biológico de las aguas residuales*. pridesa.
- Ronzano, E., & Dapena, J. L. (2002). *Tratamiento iológico de las aguas residuales*. PRIDESA.
- Ruíz, R. L. (1897). *Tratamiento de aguas residuales*. Mexico: Continental.
- Saccu, D., & Procida, P. B. (2001). Aloe Exudate: Characterization by Reversed Phase HPLC and Headspace GC-MS. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* , 4526-4530.
- Sahu, P., Giri, D. D., Sigh, R., Padey, P., Gupta, S., Shrivastava, A. K., et al. (2013). Therapeutic and medicinal uses of Aloe vera: a review. *Pharmacology & Pharmacy* , 599-610.
- Salinas, K. G. (2012). Valoración cualitativa de la calidad en Cápsulas Fitomedicinales comercializadas en Farmacias y Establecimientos botánicos en el país, en el período comprendido de Enero. *Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua* , 15.
- Sawyer, C., Mccarthy, P., & Parkin, G. (2001). *Química para ingeniería ambiental*. Colombia: Mc Graw Hill.
- Schweizer, M. (1994). *Aloe vera la planta que cura*. Paris.
- Shah, R., Tawakkul, M., & Khan, M. (2008). Comparative Evaluation of Flow for Pharmaceutical Powders and Granules. *SpringerLink* , 250-258.

- Shelton, R. (1991). Aloe Vera Its Chemical and Therapeutic Properties. *International Journal of Dermatology* , 689-673.
- Silvan, R. S., & Barajas, J. R. (2018). MEZCLAS CON POTENCIAL COAGULANTE PARA CLARIFICAR AGUAS SUPERFICIALES. *Rev. Int. Contam. Ambie.* , 229-236.
- Socrates, G. (2006). *Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies*. London.
- Sonune, A., & Ghate, R. (2004). Developments in wastewater treatmet methods. *Desaliation* , 55-63.
- Sotheeswaran, S., Nand, V., & Maata, M. (2011). Moringa oleifera and other local seeds in water purification in developing countries. *Research Journal Chemistry Enviromental* , 135-138.
- Sperlig, M. V. (2017). *wastewater characteristics, treatmet ad disposal*. India: Lighting Source.
- Stermitz, W. (1988). *Quimica organica*. España: Reverter.
- Surjushe, Vasani, & Saple. (2008). Aloe vera: A short review. *Indian Journal of Dermatol* , 163-166.
- Tomljenovic, L. (2011). Aluminum and Alzheimer's Disease: After a Century of Controversy, Is there a Plausible Link? . 567-598.
- Topare, N., & Manfe, A. &. (2011). SEWAGE/WASTEWATER TREATMENT TECHNOLOGIES : A REVIEW. *ResearchGate* , 18-24.
- Topare, N., & Manfe, M. (2011). Sewage/watewater treatment technologies: a review. *Scientific reviews y chemical communications* , 18-24.
- Torres, A. C. (2016). *Identificacion de las etapas de secado durante el proceso de liofilización*. Valencia: tesis.
- Troconis, A. (2010). *Tratamiento de aguas residuales*. Belzona Inc.
- Trussell, J., Saber, E., & Vrhel, M. (2005). Color image processing: Basics and special issue overview. *Rochester Institute of Technology* , 14-22.
- Tzoupanos, N., & Zouboulis, A. (2008). Coagulation-floculation processes in water/wasterwater treatment: the aplication of new generation of chemical reagents. *ResearcheGate* , 309-317.
- Utset, E. Z. (2007). *Evaluacioñ odjetiva de la calidad señsorial de aliemñtos procesados* . Cuva: Uñiversidad .
- Vaez, L. F. (2012). Determinacion de la eficiencia de las características coagulantes y floculantes del Tropaeolum, en el tratamiento del agua cruda de la planta de puengasi de la epmaps. *Tesis* , 20.

- Valdez, E. C., & González, A. V. (2003). *Ingeniería de los sistemas de tratamientos y disposición de aguas residuales*. Mexico: ICA.
- Valdez, E. C., & González, A. V. (2003). *Ingeniería de los sistemas de tratamientos y disposición de aguas residuales*. Mexico: ICA.
- Valencia, J. A. (1992). *Teoría de la coagulación del agua*. Colombia: Acodal.
- Valencia, J. A. (1992). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Sao Paulo: McGRAW-HILL.
- Valencia, J. A. (1992). *Teoría de la coagulación del agua*. Colombia.
- Valoyes, A. T. (2012). estudio comparativo por cromatografía líquida de alta eficiencia del producto de hidrólisis ácida de los polisacáridos del mucílago de aloe vera (ALOE BARBADENSIS) de diferentes cultivos del departamento de risaralda, Colombia. *UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA*.
- Vargas, L. d. (1972). *coagulación*. Venezuela.
- Vega, A., Ampuero, N., Díaz, L., & Lemus, R. (2005). El aloe vera (*Aloe barbadensis miller*) como componente de alimentos funcionales. *Revista chilena de nutrición*, 716-1549.
- Velasco, M. A., Velasco, Y. C., Quezada, Y. G., & Horcasitas, R. P. (2006). *Grupos funcionales, nomenclaturas y reacciones principales*. Mexico: unan.
- Veloz, M. Á. (2018). Evaluación de la eficiencia del sistema Tratamiento Primario Químicamente Mejorado (CEPT, Chemically Enhanced Primary Treatment), para aguas residuales de Guayaquil. *Tesis*, 27.
- Vergeylen, E. (2012). Investigations on miniaturized powder flow measurements. *Universiteit Gent*.
- Vogler, & Ernst. (1999). Aloe vera: a systematic review of its clinical effectiveness. *British Journal of General Practice*, 823-828.
- Walter, & Weber. (1979). *Control de calidad del agua procesos fisicoquímicos*. New York: REVERTE.
- Walter, W. (1987). *Manual de química orgánica*. Barcelona: Reverte.
- Whyte, J. (1987). Biochemical composition and energy content of six species of phytoplankton used in mariculture of bivalves. *Aquaculture*, 231-241.
- Wu, Liu, Li, Wen, Zhang, & Long. (2010). Preparation of aligned porous gelatin scaffolds by unidirectional freeze-drying method. *ELSERVIER*, 1167-1177.
- Xiomara, C. B., Marisol, F. R., & Ana, C. M. (2009). ESTUDIO DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE LA EMPRESA

TEXTIL "DESEMBARCO DEL GRANMA" A ESCALA DE LABORATORIO .  
*Tecnología química* , 64-73.

X-Rite. (2002). Entender la Comunicación del color . 12.

Zurbrügg, C., Williams, C., & Parkinson, J. (2011). *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento*.