



**UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO**  
**División Académica de Ciencias Biológicas**



---

---

**“COAGULACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES MEDIANTE MEZCLAS  
COAGULANTES DE *CROTALARIA LONGIROSTRATA* (CHIPILÍN)  
Y SULFATO DE ALUMINIO”**

**Trabajo recepcional, en la modalidad de:**

Tesis de Maestría

**Para obtener el grado de:**

Maestría en Ciencias Ambiental

**Presenta:**

Ing. Alicia Pastrana Pacho

**Directores:**

M. en C. Israel Ávila Lázaro  
Dr. Rudy Solís Silva

Villahermosa, Tabasco, México

Noviembre, 2021



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN**

**NOVIEMBRE 18 DE 2021**

**C. ALICIA PASTRANA PACHO  
PAS. DE LA MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES  
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales titulado: **"COAGULACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES MEDIANTE MEZCLAS COAGULANTES DE CROTALARIA LONGIROSTRATA (CHIPILIN) Y SULFATO DE ALUMINIO"**, asesorado por el M. en C. Israel Ávila Lázaro y Dr. Rudy Solís Silva sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado integrado por el Dr. José Ramón Laínez Canepa, M.I.P.A. Rosalinda Frías de la O, M. en C. Israel Ávila Lázaro, Dr. Francisco Javier Félix Torres y M.E.S. Wencio magaña Magaña.

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

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

**ATENTAMENTE  
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE**

**DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR**

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

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



**DIRECCIÓN**

## CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Maestría denominado: **"COAGULACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES MEDIANTE MEZCLAS COAGULANTES DE CROTALARIA LONGIROSTRATA (CHIPILIN) Y SULFATO DE ALUMINIO"**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

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

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

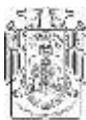
Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el día 18 de noviembre del dos mil veintiuno.

AUTORIZO



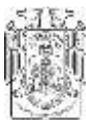
---

ALICIA PASTRANA PACHO



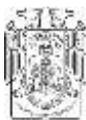
## Contenido

Resumen.....	1
1.- INTRODUCCIÓN.....	2
2.- REVISION BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 Aguas residual .....	3
2.2 Teoría de la coagulación.....	11
2.3 Floculación.....	15
2.4 Pruebas de tratabilidad .....	20
2.5 Chipilín ( <i>Crotalaria longirostrata</i> ) .....	23
3. JUSTIFICACION .....	27
4.- OBJETIVOS GENERALES .....	28
Objetivos específicos.....	28
5. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	28
6.- METODOLOGIA .....	30
6.1. Obtención de chipilín en polvo .....	30
6.2 Preparación del chipilín en polvo para su uso como coagulante.....	30
6.3 Preparación del sulfato de aluminio (coagulante químico) .....	31
6.4 Medición inicial de SST y color del agua constituida .....	31
6.5 Determinación de la dosis optima del coagulante químico.....	32
6.6 Determinación de la dosis optima de la mezcla de chipilin en polvo y sulfato de aluminio ....	34
6.7 Análisis estadístico .....	35
6.8 Diseño experimental .....	35
6.8.1 Diseño Experimental para dosis optima de sulfato de aluminio .....	35
6.8.2 Diseño Experimental para dosis optima de mezcla de sulfato de aluminio y polvo de chipilín .....	35
7.- RESULTADOS.....	36
7.1 Parámetros iniciales del agua constituida.....	36



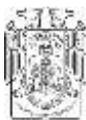
---

7.2 Dosis Óptima De Sulfato De Aluminio Para La Remoción De Turbiedad .....	36
7.3 Dosis Optima De Sulfato De Aluminio Para La Remoción De Color .....	37
7.4 Dosis de mezclas de chipilín en polvo y sulfato de aluminio para la remoción de color. ....	38
7.5 Dosis De Mezclas De Chipilin En Polvo Y Sulfato De Aluminio Para La Remoción De Turbiedad .....	39
7.6 CONCLUSIÓN .....	40
8.- REFERENCIA BIBLIOGRAFICA.....	41
ANEXO.....	44
Secado de chipilín.....	44
Preparación de soluciones .....	45
Prueba de jarras .....	45
Medición de parámetros.....	46
Resultados de microscopia electrónica de barrido.....	47
Propuesta de artículo.....	48
Resumen.....	49
Palabras clave.....	50
Abstract .....	50
Keywords.....	50
Introducción .....	50
Materiales y métodos (metodología).....	52
Resultados y discusiones.....	54
Conclusiones y/o recomendaciones (discusión) .....	58
Agradecimientos .....	59
Referencias.....	59



## Índice de Figuras

Figura 1 Esquema de Procesos Unitarios en Tratamiento Físico Químico (Carrasco, 2007). .....	8
Figura 2. Esquema del fenómeno de la coagulación (Gómez, 2005). .....	11
Figura 3 Representación de la estabilidad de los coloides presentes en el agua, cuando se adiciona un coagulante (Programa regional OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano, 1992). .....	12
Figura 4. Distribución de tamaños de las partículas en el agua (Barrenechea, 2004). .....	13
Figura 5 Aglomeración de partículas coloidales empleando floculante (Gómez, 2005). .....	16
Figura 6 Prueba de Jarras con seis paletas. ....	22
Figura 7 Arbusto de Chipilín ( <i>Crotalaria longirostrata</i> ) .....	24
Figura 8. Ubicación de toma de muestra, en Río Seco, Comalcalco, Tab. ....	29
Figura 9. Recolección de muestras en río seco .....	29
Figura 10 a) Secado de chipilín ..... b) Molienda de chipilín ..... c) Tamizado de chipilín. ....	30
Figura 11 a) Pesado de chipilín ..... b) Aforo de chipilín a 1 litro .....	31
Figura 12. A) pesado de sulfato de aluminio ..... b) Aforo de sulfato de aluminio .....	31
Figura 13. Medición de parámetros iniciales de SST y color .....	32
Figura 14. a) colocación de 800 ml de agua residual ..... b) Dosificación de sulfato de aluminio. ....	33
Figura 15. a) Proceso de mezclado ..... b) Medición de los parámetros finales .....	34
Figura 16 Valores promedios ( $\pm$ DE) de la variable turbiedad de las diferentes dosis de sulfato de aluminio evaluados .....	37
Figura 17 Valores promedios ( $\pm$ DE) de la variable color de las diferentes dosis de sulfato de aluminio evaluada .....	38
Figura 18 Valores promedios ( $\pm$ DE) de la variable color de las diferentes mezclas de polvo de chipilín y sulfato de aluminio evaluadas .....	39
Figura 19 Valores promedios ( $\pm$ DE) de la variable turbiedad de las diferentes mezclas de polvo de chipilín y sulfato de aluminio evaluadas .....	40
Figura 20 Secado de <i>C. Longirostra</i> .....	44

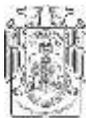


---

Figura 21. C. Longirostra secado y pulverizado.....	44
Figura 22. Preparación de las distintas concentraciones de variación de C. Longirostra con el sulfato de aluminio.....	45
Figura 23 Prueba de jarras de agua residual con las soluciones preparadas en las distintas variaciones del sulfato de aluminio.....	45
Figura 24 Prueba de jarras de agua residual con las soluciones preparadas en las distintas variaciones del C.Longirostra y sulfato de aluminio .....	46
Figura 25. Medición de parámetros después de la aplicación del tratamiento sulfato de aluminio y chipilín .....	46
Figura 26 Composición de elementos disponibles en el chipilín por microscopia de barrido.....	47
Figura 27. Valores promedios ( $\pm$ DE) de la variable turbiedad de las diferentes dosis de sulfato de aluminio evaluados .....	55
Figura 28. Valores promedios ( $\pm$ DE) de la variable color de las diferentes mezclas de polvo de chipilín y sulfato de aluminio evaluadas .....	57

## Índice de Tablas

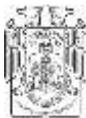
Tabla 1 Comparación de Eficiencias de Remoción entre Tratamiento Físico Químico y Tratamiento Primario Simple .....	8
Tabla 2 Tratamientos para el sulfato de aluminio .....	33
Tabla 3 Tratamiento con chipilín en polvo y sulfato de aluminio .....	34
Tabla 4. Turbiedad y color del agua residual a analizar. ....	36
Tabla 5 % de elementos obtenidos de la microscopia de barrido .....	47



## Resumen

Los coagulantes naturales a base de plantas y almidones se han usado para el tratamiento de aguas por muchos siglos. La mayoría de estos se derivan de almidones, semillas, hojas, cortezas, savia, raíces, frutos de árboles y plantas. En este trabajo se evaluó el polvo de la hoja de chipilín (*Crotalaria longirostrata*) como coagulante natural para el tratamiento de agua residuales. En plantas de tratamiento de agua residuales, se utilizan comúnmente dosis óptimas de sulfato de aluminio para la remoción de turbiedad y color, sin embargo, al no reaccionar al 100% quedan residuos de aluminio en las aguas residuales. Lo mencionado es dañino para los ecosistemas acuáticos y terrestres. Es por eso que en el presente estudio se propuso un coagulante de origen natural ya que es amigable con el ambiente, llegan a ser alternativas de bajo costo y seguros en el proceso de tratamiento de aguas residuales. En este trabajo se evaluó la capacidad de remoción de turbiedad y color (variables dependientes) de un agua residual mediante el uso de sulfato de aluminio y mezcla coagulante de chipilín y sulfato de aluminio.

Se realizaron pruebas con dos tratamientos; uno de sulfato de aluminio con seis variaciones en la concentración de este (0, 100, 150, 200, 250 y 300 mg/L) y el segundo tratamiento con mezclas de chipilín en polvo y sulfato de aluminio, siendo igual de seis variaciones en su concentración (125S.A-125CH, 150S.A 100CH, 150S.A-75CH, 200S.A-50CH, 225SA-25CH y 250S.A mg/L). Estas fueron realizadas en un equipo de pruebas de jarras. Utilizando el método de mezcla Letterman y Villegas (2000) para el mezclado de los coagulantes, en donde se comprobó que en el caso de las mezclas de chipilín en polvo y sulfato de aluminio S.A150-CH75 tuvieron mejores eficiencias de remoción de SST (67.6%) y color (71.6%) que la dosis de sulfato de aluminio (SST =56.31% y Color =61.7%). En este estudio se pudo comprobar que el polvo del chipilín es factible como ayudante de coagulación en el tratamiento de agua superficial en la remoción de SST y color.

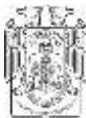


## 1.- INTRODUCCIÓN.

El agua residual es cada vez más difícil de sanear por las diversas características de sus constituyentes (físicos, químicos y biológicos). Uno de los procesos fisicoquímicos más utilizados para el tratamiento de aguas residuales es la coagulación-floculación. La coagulación-floculación se utiliza principalmente para la remoción de sólidos suspendidos totales (SST), color aparente o color verdadero, eliminación de bacterias virus, organismos patógenos separados, eliminación de sustancias productoras de sabor y olor (CONAGUA,2015).

El proceso de coagulación-floculación implementa sales metálicas para la remoción de contaminantes. Los floculantes pueden clasificarse en dos tipos: inorgánicos y orgánicos. Los inorgánicos suelen estar compuestos de sales metálicas, normalmente de aluminio o hierro, mientras que los orgánicos son polímeros, que se refieren a una gran variedad de compuestos macromoleculares, solubles en agua, de origen natural o sintético. Estos productos químicos no reaccionan de todo con los contaminantes, por lo que quedan inmersos en el agua residual, los cuales pueden ser muy peligrosos para la salud (Gurdian & Coto, 2011).

Algunos estudios mencionan que las trazas de estas sales metálicas contenidas en las aguas tratadas pueden causar enfermedades en animales y humanos (Quipse et al.,2018). Otro problema es que el uso de estas sales metálicas en las aguas residuales genera grandes cantidades de lodos de desechos, las cuales son difíciles de tratar (Donato *et al.*, 2006). Desde los años 70 en varios países latinoamericanos se están utilizando coagulantes naturales a bases de diferentes especies vegetales locales para disminuir en parte o en su totalidad el consumo de coagulantes químicos (Olivero, *et al.*, 2017). Debido a lo mencionado, el objetivo del presente trabajo es evaluar el uso de un coagulante natural a base de polvo de chipilín mezclado con sulfato de aluminio que reduzca las concentraciones óptimas de sulfato de aluminio usadas comúnmente en el tratamiento de aguas residuales. Los resultados de este trabajo serán de gran importancia para las instituciones gubernamentales encargadas de la potabilización y saneamiento del agua.



## 2.- REVISION BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aguas residual

La NOM-001-1996-SEMARNAT establece la siguiente definición para aguas residuales: Aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales comerciales, de servicios, agrícolas pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellos.

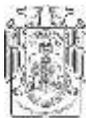
Cabe destacar que estas aguas poseen características que la diferencian de otras, dichas características son parámetros importantes para el tipo de tratamiento, así como para la gestión técnica de la calidad ambiental de las mismas y por ende se mencionan brevemente a continuación.

#### 2.1.1. Características del agua residual

##### Características físicas

**Turbiedad:** La turbiedad en el agua puede ser causada por una gran variedad de materiales en suspensión, que varían en tamaño desde dispersiones coloidales hasta partículas gruesas, arcillas, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, organismos planctónicos, microorganismos, entre otros (Letterman, 2011). La medición de la turbiedad se realiza mediante un turbidímetro o nefelómetro. Las unidades utilizadas son, por lo general, unidades nefelométricas de turbiedad (UNT) (Barrenechea, 2004).

**Sólidos y residuos:** Se denomina así a los residuos que se obtienen como materia



remamente luego de evaporar y secar una muestra de agua a una temperatura dada. Según el tipo de asociación con el agua, los sólidos pueden encontrarse suspendidos o disueltos.

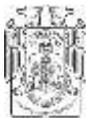
Sólidos totales: Corresponden al residuo remanente después de secar una muestra de agua. Equivalen a la suma del residuo disuelto y suspendido. El residuo total del agua se determina a 103–105 °C.

Sólidos disueltos: Mejor conocidos como sólidos filtrables, son los que se obtienen después de la evaporación de una muestra previamente filtrada. Comprenden sólidos en solución verdadera y sólidos en estado coloidal, no retenidos en la filtración, ambos con partículas inferiores a un micrómetro (1  $\mu$ ).

Sólidos en suspensión: Corresponden a los sólidos presentes en un agua residual, exceptuados los solubles y los sólidos en fino estado coloidal. Se considera que los sólidos en suspensión son los que tienen partículas superiores a un micrómetro y que son retenidos mediante una filtración en el análisis de laboratorio (Barrenechea, 2004).

Color: Históricamente, la palabra condición se utilizó junto con composición y concentración para describir el agua residual. La condición se refiere a la edad del agua residual y se determina cualitativamente por su color y olor. El agua residual reciente suele ser gris; sin embargo, como quiera que los componentes orgánicos sean descompuestos por las bacterias, el oxígeno disuelto en el agua residual se reduce a cero y el color cambia a negro. En esta condición, se dice que el agua residual es séptica. Algunas aguas residuales de tipo industrial añaden color al agua residual doméstica (Metcalf & Eddy, 2000).

Olor: El olor de un agua residual fresca es en general inofensivo, pero una gran variedad de compuestos malolientes son liberados cuando se produce la



degradación biológica bajo condiciones anaerobias de las aguas residuales. El principal compuesto de olor indeseable es el sulfuro de hidrogeno (olor a huevo podrido) (Díaz, 2012).

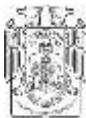
Temperatura: La temperatura del agua residual es por lo general mayor que la temperatura del agua para abastecimiento como consecuencia de la incorporación de agua caliente proveniente del uso doméstico e industrial (Díaz, 2012). La determinación exacta de la temperatura es importante para diferentes procesos del tratamiento y análisis de laboratorio. Por ejemplo, el grado de saturación de oxígeno disuelto, la actividad biológica (Romero-Rojas, 1999).

pH: Aunque podría decirse que no tiene efectos directos sobre la salud, sí puede influir en los procesos de tratamiento del agua, como la coagulación y la desinfección. Cuando se tratan aguas ácidas, es común la adición de un álcali (por lo general, cal) para optimizar los procesos de coagulación. Por lo general, este rango permite controlar sus efectos en el comportamiento de otros constituyentes del agua (Barrenechea, 2004).

#### Características químicas

Materia orgánica: Según Barrenechea (2004) la materia orgánica puede ser, en muchos casos, la responsable del color, el olor y el sabor del agua, los cuales deben ser eliminados durante el tratamiento a fin de hacerla apta para el consumo humano. Como es muy difícil determinar analíticamente la presencia de estas sustancias orgánicas en el agua, se han establecido métodos globales de determinación. Estos son los siguientes:

Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ): Corresponde a la cantidad de oxígeno necesario para descomponer la materia orgánica por acción bioquímica aerobia. Se expresa en mg/L. Esta demanda es ejercida por las sustancias carbonadas, las



---

nitrogenadas y ciertos compuestos químicos reductores.

**Demanda Química de Oxígeno (DQO):** La demanda química de oxígeno es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por la fracción de materia orgánica existente en la muestra y que es oxidable por un agente químico oxidante fuerte (Romero-Rojas, 1999). La eliminación de la materia orgánica se lleva a cabo mediante la coagulación-floculación, la sedimentación y la filtración (Barrenechea, 2004).

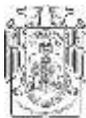
**Fosforo:** Es un componente inorgánico de las aguas residuales y naturales que tiene importancia para el establecimiento y control de calidad del agua. El fósforo es también esencial para el crecimiento de las algas y otros organismos biológicos. La forma más frecuente en que se encuentra el fósforo en soluciones acuosas son ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico (Gómez, 2005).

**Conductividad eléctrica:** La conductividad de una solución es una medida de su capacidad para transportar una corriente eléctrica y varía con el tipo y número de iones que contiene la solución (Sawyer et al., 2001).

#### Características microbiológicas

**Organismos coliformes totales:** Los coliformes por sí mismos no constituyen un riesgo para la salud, sin embargo, su determinación se usa para indicar la presencia de bacterias nocivas. Su presencia es indicio de contaminación por heces fecales humanas o de animales de sangre caliente cuyos microorganismos patógenos presentes pueden causar diarrea, dolor breve y agudo en los intestinos, náuseas, dolor de cabeza u otros síntomas (González Camacho, 2008).

***E. coli* o coliformes fecales:** No constituyen en sí un riesgo para la salud, pero su determinación se debe a que pueden estar presentes bacterias nocivas. Con la *E.*



---

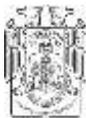
*coli* su presencia indica que el agua puede estar contaminada con heces fecales humanas o de animales de sangre caliente (González Camacho, 2008).

### 2.1.2 Tratamiento fisicoquímico

El tratamiento fisicoquímico de aguas servidas o tratamiento primario avanzado, conocido como CEPT o APT por sus siglas en inglés (Chemical Enhanced Primary Treatment, Advanced Primary Treatment), es un sistema que busca aumentar la tasa de sedimentación gravitacional y la eficiencia de remoción de contaminantes en el tratamiento primario de aguas servidas, mediante la adición de pequeñas dosis de sales metálicas como coagulante (Carrasco, 2007).

Según Gómez (2005) el proceso fisicoquímico puede ser aplicado al comienzo, en medio o al final del tratamiento de las aguas residuales. La estrategia que brinda los mayores beneficios económicos y ambientales es su aplicación al comienzo, o como etapa única del tratamiento. Gracias a las numerosas ventajas técnicas y económicas, el proceso físico-químico se convirtió prácticamente en un tratamiento universal para el agua potable. Sin embargo, su aplicación a las aguas residuales municipales sólo se consolidó en las dos últimas décadas, basado en un desarrollo tecnológico intenso de las etapas de coagulación, floculación y separación de sólido - líquido de las aguas residuales.

La aplicación del tratamiento fisicoquímico no es nueva en el mundo, de hecho a principios del siglo veinte era una tecnología muy difundida, pero las altas dosis de coagulante utilizadas, en la mayoría de los casos cal, generaban una alta cantidad de lodos y los sistemas de tratamiento físico químico empezaron a ser desplazados por sistemas de tratamiento biológico, que generan menos lodos y tienen una mejor eficiencia en términos de remoción de contaminantes (Bourke, 2000). En la Figura 1 se muestra un esquema con los procesos y secuencias involucrados en el



tratamiento fisicoquímico.

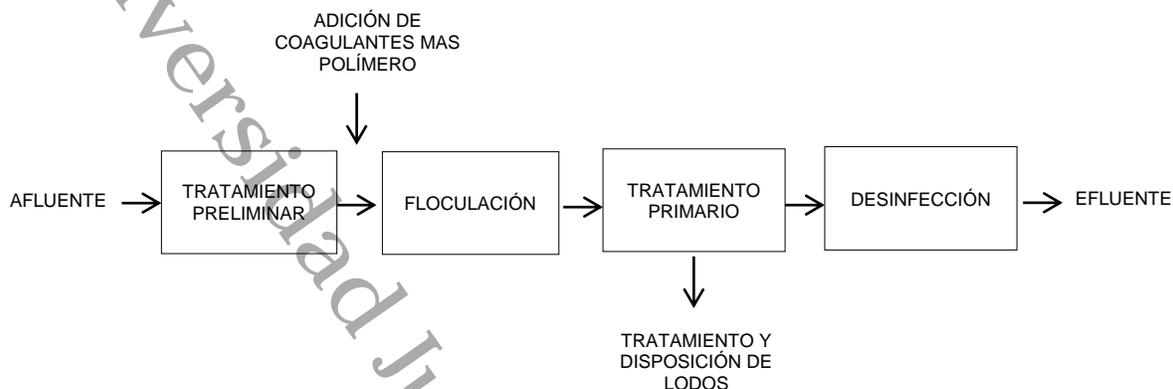


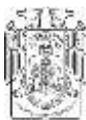
Figura 1 Esquema de Procesos Unitarios en Tratamiento Físico Químico (Carrasco, 2007).

Bourke (2000) menciona que junto a la adición de un coagulante en ocasiones se utiliza una pequeña dosis de polímero que en algunos casos permite reducir la dosis de coagulante utilizada mejorando la eficiencia de remoción en el tratamiento. Hoy en día el tratamiento físico químico utiliza dosis pequeñas de coagulante, acompañado en ocasiones con una mínima dosis de polímero, lo que implica bajos costos de operación y un aumento pequeño en la cantidad de lodos generados respecto a los tratamientos convencionales. En la Tabla 1 se compara la eficiencia de remoción de contaminantes del tratamiento fisicoquímico con el tratamiento primario simple para algunos parámetros.

Tabla 1 Comparación de Eficiencias de Remoción entre Tratamiento Físico Químico y Tratamiento Primario Simple

Contaminante	Tratamiento Físico Químico	Tratamiento Primario Simple
SST	75%-85%	60%
DBO <sub>5</sub>	55%-65%	30%
N <sub>2</sub>	30%	30%
P	55%-85%	30%

Fuente: Bourke, 2000



### 2.1.3 Proceso de Coagulación-Floculación

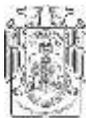
La Coagulación-Floculación es el proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del agua llamadas flocs y por lo tanto pueden ser separadas del agua mediante procesos físicos de sedimentación (Arboleda, 2000). La eficiencia del proceso de coagulación-floculación depende de muchas variables. Para un agua particular, estos pueden incluir: tipo de coagulante utilizado, dosis de coagulante, el pH final, tipo y dosificación de aditivos químicos distintos de coagulantes primarios; por ejemplo polielectrolitos sintéticos o naturales, secuencia de adición de productos químicos y el tiempo que transcurre entre los puntos de dosificaciones, intensidad y duración de la mezcla en la etapa de mezcla rápida, tipo de dispositivo de mezcla rápida, y gradientes de velocidad aplicada durante la etapa de floculación (Thrinh y Kang, 2010).

- Constituyentes del agua residual que se remueven con la coagulación-floculación

Entre estos constituyentes se encuentran algunos de características tanto físicas como químicas. En las características físicas el más importante es el contenido total de sólidos (el cual está compuesto por materia flotante y materia en suspensión, en dispersión coloidal y en disolución) y el color. En las características químicas se tienen nutrientes como el fósforo componente de materia inorgánica y la materia orgánica (Gómez, 2005).

- Coagulación

La coagulación consiste en la desestabilización de las partículas suspendidas mediante la adición de un producto químico, lo que provoca la neutralización de la carga de los coloides presentes en el agua y, por lo tanto, la disminución de las fuerzas que mantienen separadas las partículas. Este fenómeno ocurre debido a una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de la



partícula, la alcalinidad del agua y el agua misma. Este proceso sólo dura una fracción de segundo (Arboleda, 2000).

Rodríguez (1995) señala que esta operación se efectúa en unidades y tanques de mezcla rápida, en los cuales el agua se somete a agitación muy intensa para formar una solución homogénea de los coagulantes con el agua en el menor tiempo posible. Menciona que tres mecanismos pueden actuar en el fenómeno de coagulación:

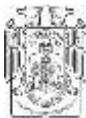
Adsorción-desestabilización, basado en las fuerzas electrostáticas de atracción repulsión.

Puente químico, que establece una relación de dependencia entre las fuerzas químicas y la superficie de los coloides.

Sobresaturación de la concentración de coagulante en el agua, basado en el barrido producido por los productos generados al agregar el coagulante.

En la Figura 2 se muestra como las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide, permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos (Gómez, 2005). La coagulación es el tratamiento más eficaz pero también es el que representa un gasto elevado cuando no está bien realizado. Es igualmente el método universal porque elimina una gran cantidad de sustancias de diversas naturalezas y de peso de materia que son eliminados al menor costo, en comparación con otros métodos. El proceso de coagulación mal realizado también puede conducir a una degradación rápida de la calidad del agua y representa gastos de operación no justificadas.

Por lo tanto, que se considera que la dosis del coagulante condiciona el funcionamiento de las unidades de decantación y que es imposible de realizar una clarificación, si la cantidad de coagulante está mal ajustada (Andía, 2000). Para la evaluación de este proceso es necesario tener en cuenta las características físicas



y químicas del agua, la dosis del coagulante, la concentración del coagulante, el punto de aplicación del coagulante, la intensidad y el tiempo de mezcla y el tipo de dispositivo de mezcla (Restrepo, 2009).

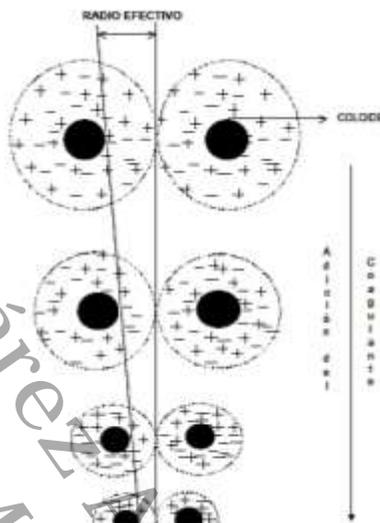


Figura 2. Esquema del fenómeno de la coagulación (Gómez, 2005).

## 2.2 Teoría de la coagulación

La mayoría de los coloides están cargados negativamente, por lo que en agua son estables debido a la repulsión electrostática entre estas partículas invisibles. Esta repulsión sobrepasa las fuerzas de atracción de Van der Waals, por lo que no se aglomeran y, por lo tanto, no precipitan (Jan, 1990; Programa regional OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano, 1992). Mediante el proceso de coagulación se neutraliza la carga eléctrica del coloide anulando las fuerzas electrostáticas repulsivas (ver Figura 3), esta neutralización suele realizarse aplicando al agua determinadas sales de aluminio o hierro (coagulantes); de forma que los cationes trivalentes de aluminio o hierro neutralizan las cargas eléctricas negativas que suelen rodear a las partículas coloidales dispersas en el agua (Programa regional OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano, 1992).

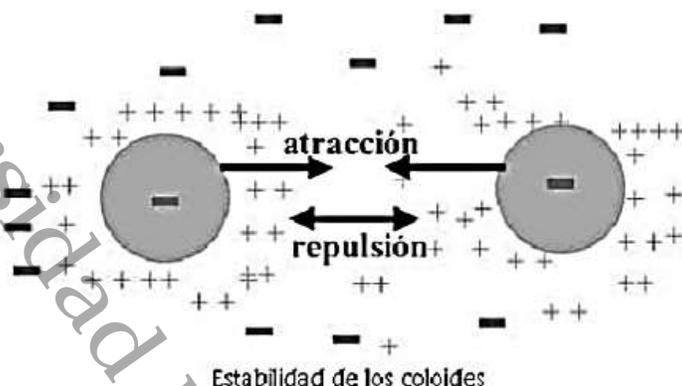
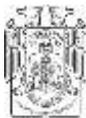
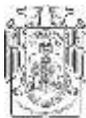


Figura 3 Representación de la estabilidad de los coloides presentes en el agua, cuando se adiciona un coagulante (Programa regional OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano, 1992).

La coagulación y la floculación tienen lugar en sucesivas etapas, de forma que, una vez desestabilizadas las partículas, la colisión entre ellas permita el crecimiento de los micro flóculos, apenas visibles a simple vista, hasta formar mayores flóculos. Al observar el agua que rodea a los micro flóculos, ésta debería estar clara; si esto no ocurre, lo más probable es que todas las cargas de las partículas no han sido neutralizadas y por tanto la coagulación no se ha completado, en este caso será necesario añadir más coagulante (Fontanills, 1998; Water treatment, 2003).

### 2.2.1 Partículas coloidales

Las partículas coloidales en el agua por lo general presentan un diámetro entre 1 y 1.000 mili micrómetros y su comportamiento depende de su naturaleza y origen. Estas partículas presentes en el agua son las principales responsables de la turbiedad. En términos generales, los denominados coloides presentan un tamaño intermedio entre las partículas en solución verdadera y las partículas en suspensión. La Figura 4 ilustra sobre el tamaño aproximado de las partículas y su distribución (Barrenechea, 2004). En general, los coloides inorgánicos son



hidrófobos mientras que los coloides orgánicos son hidrófilos. Un ejemplo de un coloide inorgánico son las partículas de arcilla que causan turbiedad en el agua natural, y un ejemplo de un coloide orgánico son las partículas coloidales en las aguas residuales domesticas (Sincero y Sincero, 2003).

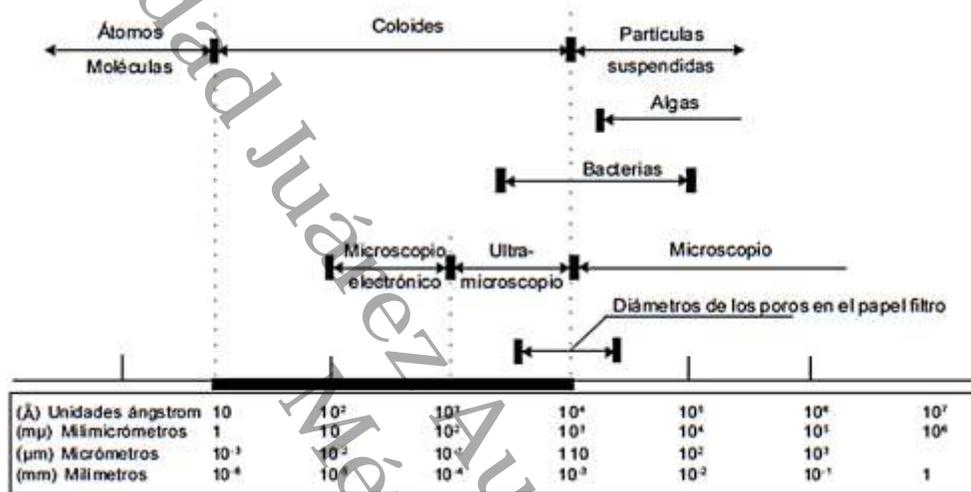
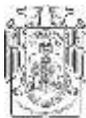


Figura 4. Distribución de tamaños de las partículas en el agua (Barrenechea, 2004).

### 2.2.2 Naturaleza de la turbiedad y el color

Las sustancias responsables de la turbiedad del agua son las partículas en suspensión, tales como arcilla, minerales, sedimentos, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, plancton, bacterias y otros microorganismos. Estas partículas causantes de la turbiedad pueden ser coloidales o materia insoluble de mayor tamaño. Los componentes más frecuentes y comunes de las aguas turbias son las arcillas, que constituyen un material natural, terroso, de gránulos muy finos (Barrenechea, 2004). Para el caso del color la mayoría de los investigadores estiman que el color orgánico en el agua es de naturaleza coloidal. Sin embargo, algunos autores sugieren que se encuentra en solución verdadera. El color existente en el agua no se deriva únicamente de la descomposición de productos naturales sino también de hidróxidos metálicos, como el del hierro, además de compuestos



orgánicos desconocidos presentes en los desechos domésticos e industriales (Barrenechea, 2004).

### 2.2.3 Estabilidad e inestabilidad de los coloides

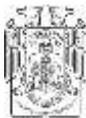
Los coloides son normalmente estables en solución. En general priman los factores estabilizantes sobre los desestabilizantes. Entre los factores estabilizantes se cuentan a todas las fuerzas o fenómenos que generan repulsión entre ellos y por tanto, las fuerzas electrostáticas y la hidratación son favorables. Las fuerzas de atracción, en cambio, cumplen un papel opuesto y desestabilizan (Gómez, 2005). En Barrenechea (2004) los factores de atracción o desestabilización son los siguientes: la gravedad, el movimiento browniano (que permite que las partículas entren en contacto, lo que constituye un requerimiento para la desestabilización) y la fuerza de Van der Waals.

### 2.2.4 Sustancias químicas empleadas en la coagulación

En el trabajo de Barrenechea (2004) a la variedad de productos químicos empleados en la coagulación se los clasifica como coagulantes, modificadores de pH y ayudantes de coagulación.

Coagulantes: Según Barrenechea (2004) los productos químicos más usados como coagulantes en el tratamiento de las aguas son el sulfato de aluminio, el cloruro férrico, el sulfato ferroso y férrico y el cloro- sulfato férrico.

Sulfato de aluminio:



Puede estar en forma sólida o líquida. La sólida se presenta en placas compactas, gránulos de diverso tamaño y polvo. Su fórmula teórica es  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$ . Su concentración se define, en general, por su contenido en alúmina, expresada en  $Al_2O_3$ , es decir, 17% aproximadamente. La densidad aparente del sulfato de aluminio en polvo es del orden de  $1.000 \text{ kg/m}^3$ .

Cloruro férrico,  $FeCl_3$ :

Se presenta en forma sólida o líquida; esta última es la más utilizada en el tratamiento del agua. La forma sólida es cristalina, de color pardo, delicuescente, de fórmula teórica  $FeCl_3 \cdot 6 H_2O$ . Se funde fácilmente en su agua de cristalización a  $34 \text{ }^\circ\text{C}$ , por lo que es necesario protegerla del calor.

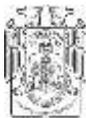
Modificadores de pH: Para lograr mejores resultados en el tratamiento, en algunos casos será necesario regular la alcalinidad del agua o modificar su pH; para ello se emplean el óxido de calcio o cal viva, hidróxido de sodio, gas carbónico, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, hidróxido de calcio, carbonato de sodio y bicarbonato sódico (Barrenechea, 2004).

Hidróxido de calcio,  $Ca(OH)_2$ :

Se usa para elevar la alcalinidad del agua. Se obtiene apagando la cal viva con agua. Su concentración está entre 82% y 99%. Es poco soluble en el agua y su solubilidad disminuye al aumentar la temperatura.

### 2.3 Floculación

La floculación es el mecanismo mediante el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras formando coágulos mayores denominados flocs; en este proceso los flocs aumentan su peso específico hasta superar el del líquido que los contiene, lo cual permite la sedimentación del aglomerado (Arboleda, 2000). Tiene dos objetivos: reunir los coloides desestabilizados para formar agrupaciones de



partículas o flóculos con peso específico superior al del agua y compactar los flóculos para disminuir su grado de hidratación y conseguir características adecuadas tales como mayor peso y buena consistencia para su fácil remoción. En la Figura 6 se observa que, en la floculación, el floculante tiende un puente entre las partículas coloidales aglomeradas para formar flóculos más grandes fácilmente sedimentables (Gómez, 2005).

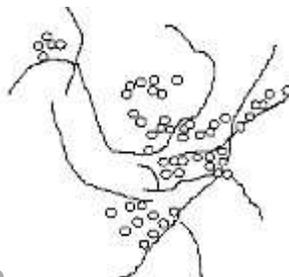
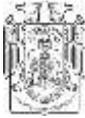


Figura 5 Aglomeración de partículas coloidales empleando floculante (Gómez, 2005).

### 2.3.1 Teoría de la floculación

La formación de los flóculos es consecuencia de la agrupación de las partículas descargadas al ponerse en contacto unas con otras. Puede ser causada por la colisión entre las partículas, debido a que cuando se acercan lo suficiente las superficies sólidas, las fuerzas de Van der Waals predominan sobre las fuerzas de repulsión, por la repulsión, por la reducción de la carga eléctrica que trae como consecuencia la disminución de la repulsión eléctrica. La floculación puede ser ortocinética, que es la inducida por la energía comunicada al líquido por fuerzas externas (paletas giratorias) y es cuando los contactos son producidos por el movimiento del fluido, o pericinética que es la promovida dentro del líquido por el movimiento que tienen las partículas en él, debido a la agitación y por la gravedad y el peso de las partículas, las que se aglomeran al caer y es cuando el contacto entre las partículas es producido por el movimiento Browniano. El coagulante aplicado da lugar a la formación del flóculo, pero es necesario aumentar su volumen, su peso y especialmente su cohesión. Para favorecer el engrosamiento del flóculo



---

será necesaria una agitación homogénea y lenta del conjunto, con el fin de aumentar las posibilidades de que las partículas descargadas eléctricamente se encuentren con una partícula flóculo (Fontanills, 1998).

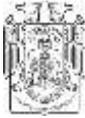
### 2.3.2 Mecánica del proceso de floculación

Normalmente, la floculación se analiza como un proceso causado por la colisión entre partículas. En ella intervienen, en forma secuencial, tres mecanismos de transporte:

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

### 2.3.3 Tipos de Floculación

Según Gómez (2005) la floculación puede presentarse mediante dos modelos: floculación ortocinética y pericinética, según sea el tamaño de las partículas desestabilizadas (en general todas las partículas se ven afectadas por ambos mecanismos). Las partículas pequeñas ( $< 1\mu\text{m}$ ) están sometidas a floculación pericinética, motivada por el movimiento browniano, mientras que las que presentan un tamaño mayor, están afectadas principalmente por el gradiente de velocidad del líquido, predominando en ella la floculación ortocinética.



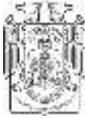
- Floculación pericinética: Esta producido por el movimiento natural de las moléculas del agua y esta inducida por la energía térmica, este movimiento es conocido como el movimiento browniano (Andía, 2000). El modelo de floculación pericinética se diferencia del modelo de floculación ortocinética en que su fuente de agitación es interna. Principalmente importarán el movimiento browniano y la sedimentación. Su efecto es principalmente sobre partículas de tamaño inferior a 1 micrón (<http://cabierta.uchile.cl/>).
- Floculación ortocinética: Se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, el que es inducido por una energía exterior a la masa de agua y que puede ser de origen mecánico o hidráulico. Después que el agua es coagulada es necesario que se produzca la aglomeración de los microfloculos; para que esto suceda se produce primero la floculación pericinética luego se produce la floculación ortocinética (Andía, 2000).

#### 2.3.4 Floculantes más usados. Mecanismo de acción

En la coagulación, dosis fuertes de coagulantes producen un exceso de fangos que generalmente crean problemas. Por otro lado, no se consigue siempre un precipitado que posea las características deseadas para una buena separación (Chedoba, Menéndez y Pérez Olmo, 1996). Estos floculantes pueden ser de naturaleza: mineral, orgánico natural y orgánico de síntesis (Andía, 2000):

- Floculantes Minerales:

Sílice activada: Fue el primer floculante empleado y sigue siendo el que mejores resultados puede dar cuando se emplean sales de aluminio. Consiste en una solución de ácido polisilícico ( $(H_2SiO_3)_4$ ), procedente de una polimerización controlada del silicato de sodio ( $NaSiO_2$ ) en medio ácido. Su mayor desventaja es su inestabilidad.



Arcillas: Bentonitas, caolinitas son añadidas como lechadas para aumentar frecuencia de colisiones y aumentar el peso en el flóculo.

Otros floculantes minerales: carbón activado en polvo, arena fina (diatomeas), blanco de mendón ( $\text{CaCO}_3$  precipitado), etc.

- Floculantes Orgánicos Naturales:

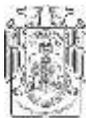
Son principalmente almidones (polisacáridos) extraídos de granos semillas y corteza de origen vegetal, así como varios tipos de suelos. Generalmente no tienen un peso molecular tan alto como los polímeros sintéticos (Chedoba, Menéndez y Pérez Olmo, 1996).

- Floculantes Orgánicos de Síntesis:

Son los más utilizados y son macromoléculas de una gran cadena, obtenidos por asociación de monómeros sintéticos con masa molecular elevada de 106 a 107 gr/mol (Andía, 2000).

Chedoba, Menéndez y Pérez Olmo (1996) señalan que, según el carácter iónico de su grupo activo, los polímeros sintéticos, llamados "polielectrolitos" comprenden:

- Polímeros no iónicos: Las poliacrilamidas ( $2-4 \times 10^6$  g/mol) son usadas en clarificación y deshidratación de lodos, incrementan la resistencia del flóculo y frecuentemente se utilizan también como ayudantes de filtración en línea. Las poliaminas de cadenas más cortas (menor de  $1 \times 10^6$  g/mol), son usadas sólo en clarificación como coagulantes primarios y como ayudante de coagulación la de alto peso molecular.
- Polímeros aniónicos: Son polielectrolitos cargados negativamente y caracterizados por la coexistencia de grupos que permiten la adsorción y



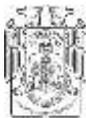
grupos ionizados negativamente (carboxílicos o sulfúricos), cuyo papel consiste en provocar la extensión del polímero. Entre éstos podemos mencionar las poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas con sosa cáustica (Water quality treatment).

- Polímeros catiónicos: Son polielectrolitos cargados positivamente que poseen en sus largas cadenas una carga eléctrica positiva, debido a grupos aminos, amonio cuaternario, capaz de remover la turbidez y el color, acondicionador de lodos, con peso molecular entre 104-106 g/mol y pueden usarse junto a coagulantes inorgánicos, resistentes al cloro, su densidad de carga no es sensible a cambios de pH. Las poliaminas cuaternarias con peso molecular más bajo (104-105 g/mol) son usadas mayormente como coagulante primario para la remoción de color. Las poliaminas (104-107 g/mol) menos frecuente es usada como coagulante primario, reacciona con el dicloro y es sensible a cambios de pH.

## 2.4 Pruebas de tratabilidad

Las pruebas de tratabilidad consisten en someter el agua a los procesos y operaciones que se supone puedan eliminar o reducir los contaminantes que exceden la norma. Las pruebas de tratabilidad son independientes de la aplicación de una determinada tecnología o marca ya que éstas sirven para definir si un determinado mecanismo de remoción aplica para los fines deseados y no tiene nada que ver con la forma ingenieril en la cual el mecanismo es puesto en práctica. Por ello es necesaria la realización de la prueba de tratabilidad para los procesos físico-químicos, conocida con el nombre de “Prueba de Jarras” (Comisión Nacional del Agua, 2007).

### 2.4.1 Prueba de jarras



La coagulación química y la dosificación apropiada de reactivos deben ser seleccionadas por la simulación del paso de clarificación en un laboratorio a escala (Restrepo, 2009). La prueba más representativa para determinar el comportamiento de los coagulantes y floculantes a escala pequeña es el Ensayo de “Prueba de Jarras” (Gómez, 2005). La Prueba de Jarras es la que mejor simula la química de la clarificación y la operación llevada a cabo. Un arreglo simple de vasos de precipitado y paletas permite comparar varias combinaciones químicas, las cuales todas están sujetas a condiciones hidráulicas similares (Restrepo, 2009). El objetivo fundamental es determinar las variables físicas y químicas de los procesos de coagulación; floculación y sedimentación; tales como: selección del coagulante; selección del pH óptimo; gradientes y tiempos de mezcla rápida y floculación y correlación de las velocidades de sedimentación y la eficiencia de remoción, entre otros (Gómez, 2005). Esta prueba se realiza con el fin de determinar la concentración óptima de coagulante necesaria para obtener un floc de las mejores características (Restrepo, 2009).

El equipo de prueba de jarras consiste esencialmente en un armazón impulsado por un motor y que permite la rotación simultánea de cuatro a seis agitadores dispuestos en igual número de contenedores (Figura 6). Estos contenedores tienen una capacidad mínima de 600 mL aunque se prefieren jarras o vasos de precipitado de 1 L. Los contenedores de capacidad menor a 600 mL no deben ser utilizados ya que no se aseguran con ellos la reproducibilidad de los resultados debido a dificultades en la precisión durante la adición de agentes químicos. Los contenedores más comunes son las jarras cuadradas con capacidad de 2 L (Bratby, 2006).

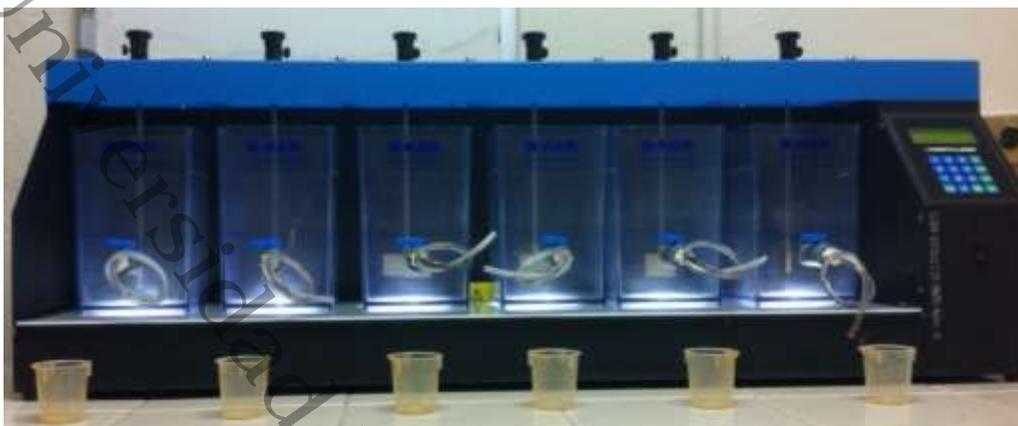
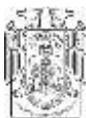


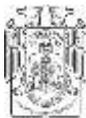
Figura 6. Prueba de Jarras con seis paletas

En el caso de coagulación-floculación, los contaminantes que desean ser eliminados son, principalmente, la turbiedad y el color aparente. Las condiciones de operación tales como la turbiedad inicial del agua, las velocidades de rotación durante la coagulación y la floculación, el pH y la temperatura del agua, pueden ser estudiadas para establecer intervalos de operación que permitan optimizar el proceso de remoción de estos contaminantes (Bratby, 2006).

#### 2.4.2 Condiciones de la prueba de jarras

Debido a que la prueba de jarras es sólo una simulación del proceso, es necesario mantener las condiciones operacionales que existen en el proceso industrial como son: gradiente hidráulico y tiempo en la mezcla lenta y rápida, punto de aplicación de los reactivos, el orden y el tiempo de dosificación de los mismos (Lorenzo-Acosta, 2006).

**Mezcla rápida:** El objetivo de la mezcla rápida es crear la turbulencia o movimiento necesario en el líquido contenido en la jarra para poner en contacto los reactivos químicos con las partículas coloidales del agua, modo de neutralizar sus cargas,



desestabilizarlas y hacer que se aglomeren en un corto período de tiempo. El tiempo de aplicación de la mezcla rápida depende de la clase del coagulante (Programa regional OPS/CEPIS, 1992). El tiempo y las rpm que se utilizan son las siguientes (Márquez, 1994): 1-3 min, 30-100 rpm. Si la planta posee una razón de mezcla rápida. Si la planta no posee mezcla rápida definida se recomienda de 15-60 segundos entre 40-60 rpm.

Mezcla lenta: Generalmente, el tiempo de mezcla no excede de 15 minutos. Un tiempo excesivo puede crear calentamiento de la muestra originando una floculación más eficiente, pero a su vez una pobre sedimentación, ya que ocurre la liberación de los gases disueltos en el agua, formando burbujas que se adhieren a los flóculos y los hacen flotar (<http://www.gemini.udistrital.edu.co>). Es práctica de 3-15 min, 20-40 rpm (Lorenzo-Acosta, 2006). Reposo (Sedimentación): Se recomiendan 30 min (Programa regional OPS/CEPIS, 1992).

## 2.5 Chipilín (*Crotalaria longirostrata*)

Es una planta comestible de olor penetrante originaria de Centroamérica. Utilizada para preparar arroces, guisos, sopas y tamales. Es un arbusto de 1.5m de alto, el tallo es recto y se ramifica abundantemente. Las hojas están compuestas por tres hojas pequeñas de forma ovalada, color verde oscuro en la cara superior y verde claro en el envés y alternas en las ramas. Las flores son de forma mariposada, de color amarillo intenso agrupadas en la punta de las ramas. Las hojas contienen calcio, hierro, tiamina, riboflavina y ácidos ascórbico. (Figura 7)

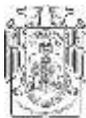
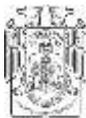


Figura 7 Arbusto de Chipilín (*Crotalaria longirostrata*)

Son plantas ramificadas. Su tallo es verde con franjas púrpuras, con muy poca pubescencia es erecto y delgado, a veces tiene muchas ramas. Mide aproximadamente un metro de alto, poco áspero, pocas o ninguna estipula. Foliolo superior de cuatro – seis centímetros de largo, de dos – tres centímetros de ancho y con un largo de la base a la parte más ancha de tres – cinco centímetros, los foliolos inferiores de cuatro – siete centímetros de largo de dos – tres centímetros de ancho y con un largo de la base a la parte más ancha de dos – cuatro centímetros, abobados, agudos y obtusos en el ápice, 3 glabros en haz con poca pubescencia en el envés, pecíolos de cinco – ocho centímetros de largo con poca pubescencia estípulas pequeñas. Racimos principalmente terminales de 18 – 45 centímetros de largo con 28 – 58 flores por inflorescencia, brácteas ausentes, pedúnculos con muy poca o poca pubescencia. Flores con corola amarilla brillante con franja púrpuras en el exterior del estandarte. Corola de 0.9 – 1.7 centímetros de largo, glabra. Cáliz de 0.5 – 1.0 centímetros de largo con poca pubescencia. Vaina de color verde cuando tierna y café negruzca cuando madura oblonga de 1.6 – 2.3 centímetros de largo por 0.3 – 0.7 centímetros de ancho, dehiscentes cuando están completamente secas, pubescencia fuertemente apresa, textura rugosa. Semillas



arriñonadas de 0.4 -0.5 centímetros de largo por 0.2 – 0.3 centímetros de ancho, color amarillo brillante (Monterroso, 1986)

Nombres populares en Guatemala: chipilín de caballo, chipilín de zope, chop (en Huehuetenango). Nombre popular en Chiapas: chipilín. Nombre popular en Oaxaca: chepíl. Nombre popular en Guerrero: chípíle

#### Composición Bromatológica del chipilín

La hoja de chipilín contiene 7.0gr de proteína, 0.8g de grasa y 2.0g de fibra cruda. Posee 0.029g de riboflavina el cual es muy bueno para producción de glóbulos rojos y tratamientos articulares.

#### Componentes anti nutricionales de la hoja del chipilín

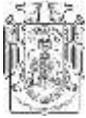
Al chipilín se le atribuye propiedad hipnótica, mineralizante, narcótica, purgante y vomitiva. Las hojas crudas son eméticas y purgantes. Se considera una planta de uso seguro en cocimiento por el amplio uso popular como alimento. Algunas plantas de la familia de las *crotalarias* son tóxicas. Ha habido casos de personas que se han envenenado al ingerir otra planta en confusión por el parecido al chipilín. En Australia está prohibida la importación de chipilín.

#### 2.5.1 Origen y distribución

Crece en suelos francos arcillosos, arenosos y es de climas cálidos y no muy húmedos. Está distribuida en Guatemala, El Salvador hasta Costa Rica. Se encuentra hasta 2,500 metros sobre el nivel del mar.

#### 2.5.2 Usos

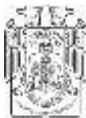
Con el chipilín se cocinan diferentes platillos según la región. En El Salvador son muy populares las sopas con chipilín, sopas de huevo con chipilín, sopa de pollo



---

con chipilín, sopa de res con chipilín y tamales de masa de maíz y chipilín rellenos de frijoles. En Guatemala son preparados con esta planta los tamalitos de chipilín: tamales de masa de maíz revuelta con la hoja de chipilín, que generalmente se mezcla con carne deshebrada de puerco o pollo y que se envuelven en hojas de plátano o de mazorca (tuza). El cocimiento de las hojas se usa por vía oral para el tratamiento de blenorragia, insomnio y reumatismo. Por vía tópica, el cocimiento de tallos y frutos se usa para lavados. El zumo de la planta cruda se aplica como cataplasmas y emplastos para la curación de heridas en corto tiempo. La decocción de la raíz se usa para tratar pacientes con alcoholismo e insomnio. A las hojas se le atribuyen propiedades hipnóticas, mineralizante, narcótica, purgante y vomitiva.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.



### 3. JUSTIFICACION

El proyecto se realizó en el laboratorio de Química Analítica del Instituto Tecnológico Superior de Centla y del Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco, en el cual se pretende implementar un sistema en la cual se pueda obtener un coagulante natural a base de flor de chipilín para la limpieza de las aguas residuales, se utilizó esta especie como materia prima para dicho proyecto ya que se deseaba verificar si es viable para la implementación en un proceso de tren de tratamientos de aguas residuales o potabilización de aguas ya que al ser una materia prima natural es biodegradable y su degradación es inofensiva así que es más amigable para el ser humano.

Además, se comparó un coagulante convencional y uno natural, para determinar la opción viable y económica, así como amigable con el ambiente para utilizarse más adelante en los tratamientos de aguas residuales.

La materia prima propuesta para el tratamiento del agua se extrae de la naturaleza sin ningún proceso invasivo, de esta manera se rompe el paradigma de la exclusividad de los productos químicos industriales tales como el sulfato de aluminio y el sulfato férrico para tratar el agua y se abre la posibilidad a nuevas tecnologías a bajo costo, inocuas para la salud humana y respetuosa con el medio ambiente. Esta revisión sirve como base para conocer los agentes naturales y sus principales aplicaciones en el tratamiento del agua.

El creciente desarrollo y uso de coagulantes naturales, extraídos a partir de microorganismos, tejidos de plantas o animales; son biodegradables y seguros para la salud humana, producen menos volumen de lodos, generando cantidades que van entre el 20-30 %, mucho menores a las generadas por el empleo de agentes coagulantes metálicos, como el alumbre (Sciban et al, 2009).



## 4.- OBJETIVOS GENERALES

Evaluar la capacidad de remoción de turbiedad y color en aguas residuales mediante la aplicación de una mezcla de polvo de chipilín y sulfato de aluminio, para el tratamiento de aguas residuales.

### Objetivos específicos

- Obtener la dosis óptima de sulfato de aluminio que remueva la mayor cantidad de turbiedad y color
- Obtener el polvo del *C. longirostrata* (chipilín) mediante una operación unitaria
- Obtener las dosis óptimas de una mezcla de sulfato de aluminio y el polvo de *C. longirostrata* que remueva la mayor cantidad de turbiedad y color
- Evaluar la comparativa de la capacidad coagulante de las mezclas de sulfato de aluminio con polvo de *C. longirostrata* versus dosis óptima de sulfato de aluminio.

## 5. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área seleccionada para la toma de muestras de las aguas residuales fue un dren de río seco, en el municipio de Comalcalco ubicado en la calle Mariano Arista por el boulevard Adolfo López Mateo. Como se puede observar en la figura 8 donde se muestra la localización del dren donde se recolectó la muestra.

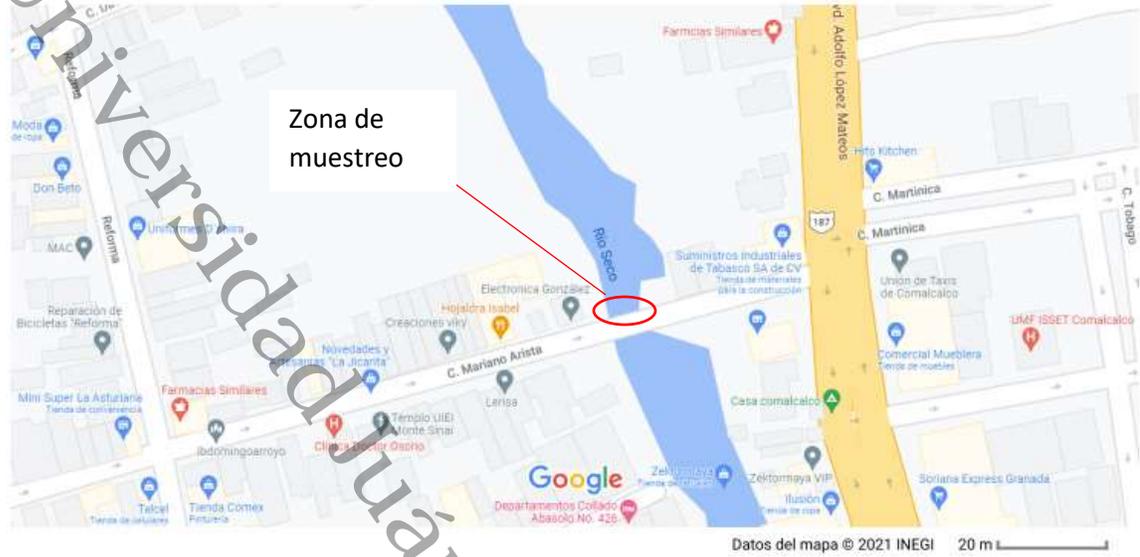
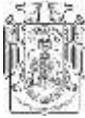
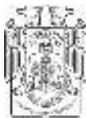


Figura 8. Ubicación de toma de muestra, en Río Seco, Comalcalco, Tab.



Figura 9. Recolección de muestras en río seco



## 6.- METODOLOGIA

El proceso consta de 7 etapas en las cuales se evaluó la eficiencia que presenta el chipilín en polvo en combinación con sulfato de aluminio para la remoción de sólidos suspendidos.

### 6.1. Obtención de chipilín en polvo

Se recolectaron las hojas de chipilín hasta juntar 1kg proveniente de un árbol doméstico, en el laboratorio se lavó, se escurrió y se colocaron en unas charolas metálicas con medidas de 33cm X 26.8cm X 6.3cm, por 2 días en un horno de secado marca FELISSA modelo FE-291 a una temperatura de 50°C (figura a). Se trituro en un mortero con la ayuda de un pistilo hasta quedar fino (figura 8 b). Posteriormente se procedió a tamizar con la ayuda de dos tamices (20  $\mu$ m y 40 $\mu$ m) (figura 8 c). Se procedió a guardar en un desecador para evitar que se rehumedeciera por contacto con el ambiente.



Figura 10 a) Secado de chipilín



b) Molienda de chipilín



c) Tamizado de chipilín

### 6.2 Preparación del chipilín en polvo para su uso como coagulante

Se pesó 1 gr de chipilín en polvo en una balanza analítica marca OHAOS modelo CS-200 13123 (figura a) y se diluyo en un litro de agua destilada en un matraz aforado de un litro para dosificarlo en mg/ml (figura 9 b).

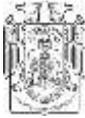


Figura 11 a) Pesado de chipilín

b) Aforo de chipilín a 1 litro

### 6.3 Preparación del sulfato de aluminio (coagulante químico)

Se pesaron 10 gramos de sulfato de aluminio en una balanza analítica modelo OHAOS CS-200 13123 (figura a) y se diluyeron en un litro de agua destilada en un matraz aforado para su dosificación en mg/ml (figura 10 b).

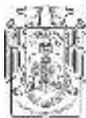


Figura 12. A) pesado de sulfato de aluminio

b) Aforo de sulfato de aluminio

### 6.4 Medición inicial de SST y color del agua constituida

Para determinar la dosis óptima de sulfato de aluminio se midieron antes las concentraciones iniciales de SST y color del agua recolectada de un dren



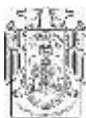
localizado en el río Seco. Los SST y color se midieron con un colorímetro marca HACH modelo DR900 (figura 11).



Figura 13. Medición de parámetros iniciales de SST y color

### 6.5 Determinación de la dosis óptima del coagulante químico

Para determinar las dosis de sulfato de aluminio se tomaron en cuenta las concentraciones promedios iniciales del agua constituida. Las dosificaciones se llevaron a cabo en un equipo de pruebas de jarras marca PHIPSS Y BIRDS, el cual cuenta con seis paletas agitadoras y seis espacios para colocar 6 vasos de precipitado de un litro. Las paletas agitadoras del equipo de jarras son automáticas y programables para mezclar las soluciones. En cada vaso de precipitado del equipo de prueba de jarra se colocaron 800 ml de agua residual obtenida del dren de río seco (figura 12 a). De acuerdo a las concentraciones iniciales de SST y color se empezó a dosificar en cada uno de los vasos (6) el sulfato de aluminio en concentraciones como se muestra en la con ayuda de una pipeta de 10 ml (figura 12 b). Posteriormente se procedió al mezclado de las dosis de sulfato de aluminio con ayuda de los agitadores automáticos del equipo de prueba de jarras. El proceso de mezclado se llevó de acuerdo al método Letterman & Villegas (1976), el cual consiste en una mezcla rápida de 200 rpm durante 15 segundos, una mezcla lenta de 25 rpm durante 25 minutos y finalmente un reposo de 30 minutos (figura 13 a). Una vez terminado el tiempo de reposo se procedió a medir en cada uno de los vasos las concentraciones de



SST y color con el colorímetro para determinar la mejor dosis del sulfato de aluminio (figura 13 b). Las pruebas se llevaron a cabo por cuadruplicado para tener una mayor precisión.

Tabla 2 Tratamientos para el sulfato de aluminio

Nomenclatura	Concentraciones
S.A0	0mg/L
S.A100	100 mg/L
S.A150	150 mg/L
S.A 200	200 mg/L
S.A250	250 mg/L
S.A300	300 mg/L

S.A= Sulfato de aluminio



Figura 14. a) colocación de 800 ml de agua residual

b) Dosificación de sulfato de aluminio

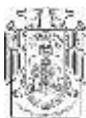


Figura 15. a) Proceso de mezclado

b) Medición de los parámetros finales

automático en el equipo

## 6.6 Determinación de la dosis óptima de la mezcla de chipilin en polvo y sulfato de aluminio

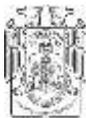
En base a la dosis óptima de sulfato de aluminio obtenida se procedió a hacer las mezclas que se muestran en la tabla 3. Se llevó a cabo la misma metodología que se utilizó para obtener la dosis óptima de sulfato de aluminio. Una vez terminado el mezclado y el tiempo de reposo se llevó a cabo la medición de SST y color de cada uno de los vasos con ayuda del colorímetro y se procedió a determinar cuáles fueron las mejores mezclas. Este procedimiento se llevó a cabo 4 veces para tener una mejor precisión.

Tabla 3 Tratamiento con chipilín en polvo y sulfato de aluminio

Nomenclatura	Concentraciones
S.A250	250mg/L
S.A125-CH125	250 mg/L
S.A150-CH100	250 mg/L
S.A150-CH75	225 mg/L
S.A200-CH50	250 mg/L
S.A225-CH25	250 mg/L

S.A= Sulfato de aluminio

CH=Chipilin en polvo



## 6.7 Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza para encontrar diferencias estadísticas significativas, entre los diferentes tratamientos evaluados ( dosis optima de sulfato de aluminio y mezclas coagulantes de polvo de chipilín con sulfato de aluminio) y un contraste múltiple de Tukey para determinar entre que tratamientos se encontraba la diferencia.

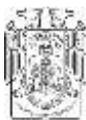
## 6.8 Diseño experimental

### 6.8.1 Diseño Experimental para dosis optima de sulfato de aluminio

Se llevo a cabo un diseño completamente aleatorizado de un factor. Los factores consistieron de diferentes dosis de sulfato de aluminio 0,100,150,200, 250 y 300 mg/l), que tenían un efecto sobre las concentraciones de turbiedad y color (variable de respuesta) de un agua residual. Las unidades experimentales fueron un equipo de pruebas de jarra, el cual contenia 6 vasos de precipitado para dosificar los factores. El equipo de prueba de jarras contaba con paletas de agitación automática programables para la mezcla de los coagulantes.

### 6.8.2 Diseño Experimental para dosis optima de mezcla de sulfato de aluminio y polvo de chipilín

Se llevo a cabo un diseño completamente aleatorizado de un factor. Los factores consistieron de diferentes dosis de sulfato de aluminio con polvo de chipilín (125S.A -125CH, 150S.A-75CH, 250S.A, 200S.A-50CH, 225S.A-25CH y 150S.A-100CH) que tenían un efecto sobre las concentraciones de turbiedad y color (variable de respuesta) de un agua residual. Las unidades experimentales fueron un equipo de pruebas de jarra, el cual contenía 6 vasos de precipitado para dosificar los factores. El equipo de prueba de jarras contaba con paletas de agitación automática programables para la mezcla de los coagulantes.



## 7.- RESULTADOS

### 7.1 Parámetros iniciales del agua constituida

El agua residual analizada que se utilizó para las pruebas de jarra realizadas, nos dio los dos parámetros siguientes, se pueden observar en la tabla 5, que son los que se evaluaron al momento de utilizar los dos tratamientos (Sulfato de aluminio y sulfato de aluminio con chipilín).

Tabla 4. Turbiedad y color del agua residual a analizar.

Parámetro	Concentraciones
Turbiedad	55.9 mg/l
Color	657 U.C

### 7.2 Dosis Óptima De Sulfato De Aluminio Para La Remoción De Turbiedad

El resultado que se obtuvo al realizar el análisis de varianza de una vía muestra que existen diferencias altamente significativas ( $P < 0.001$ ) entre los promedios de la variable turbiedad (NTU) del agua residuales, bajo los efectos diferentes tratamientos de dosis de sulfato de aluminio evaluadas (0, 100S.A, S.A150A, 200S.A, 250S.A y 300S.A) con un 95% de confianza. El contraste múltiple de medias de Tukey, indica con letras diferentes diferencias significativas entre tratamientos ( $P < 0.05$ ). El tratamiento que mostro el valor promedio más bajos de turbiedad (NTU) fue el 250S.A con  $9.92 \pm 1.28$ , seguido por los tratamientos 300S.A y 200S.A con promedios de  $14.47 \pm 0.69$ ,  $18.07 \pm 1.09$  respectivamente. Los valores promedios más altos de turbiedad se apreciaron en los tratamientos 0, 100S.A y 150S.A con  $47.4 \pm 3.09$ ,  $28.9 \pm 2.19$  y  $21.4 \pm 1.93$  respectivamente, como se puede apreciar en la figura 8.

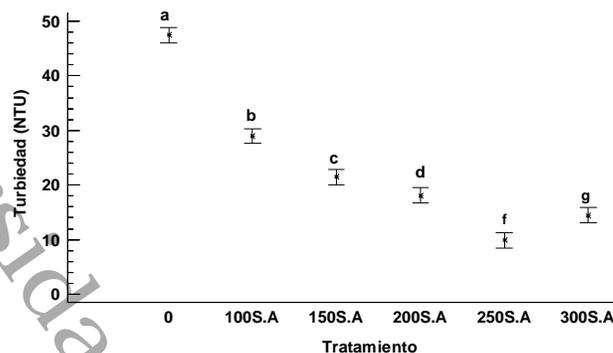
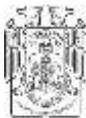


Figura 16 Valores promedios ( $\pm$  DE) de la variable turbiedad de las diferentes dosis de sulfato de aluminio evaluados

### 7.3 Dosis Optima De Sulfato De Aluminio Para La Remoción De Color

En el análisis de varianza de una vía realizados nos muestran que existen diferencias altamente significativas ( $P < 0.001$ ) entre los promedios de la variable color (U.C) del agua residual, cuando se les aplica diferentes tratamientos de dosis de sulfato de aluminio evaluadas (0, 100S.A, 150S.A, 200S.A, 250S.A Y 300S.A) con un 95% de confianza. El contraste múltiple de medias de Tukey, indica con letras diferentes diferencias significativas entre tratamientos ( $P < 0.05$ ). El tratamiento que mostro el valor promedio más bajo de color fue el 250S.A con  $233.5 \pm 6.45$ , seguido por los tratamientos 300.S.A y 200S.A con  $255.7 \pm 5.8$ ,  $299.5 \pm 9.88$  respectivamente. Los tratamientos que mostraron los valores promedios más altos de color fueron 0, 100S.A y 150S.A con  $639.5 \pm 5.80$ ,  $529.0 \pm 5.94$ ,  $387.5 \pm 7.76$  respectivamente, tal cual se observa en la figura 9.

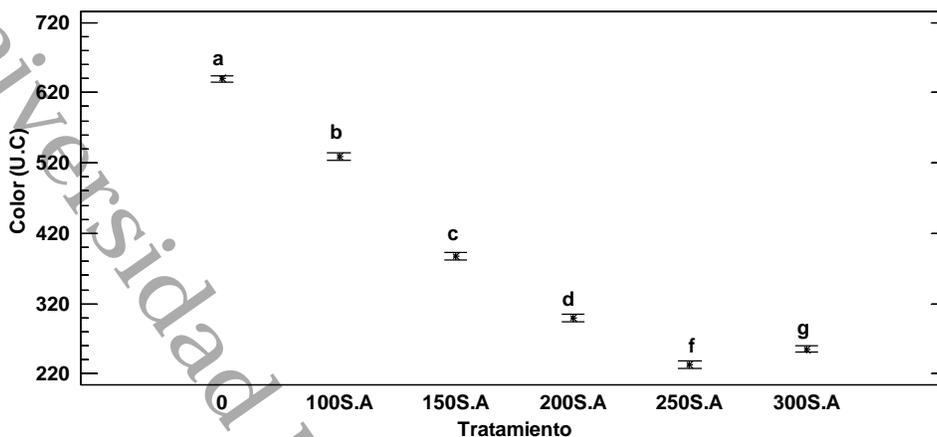
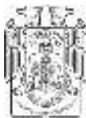


Figura 17 Valores promedios ( $\pm$  DE) de la variable color de las diferentes dosis de sulfato de aluminio evaluada

#### 7.4 Dosis de mezclas de chipilín en polvo y sulfato de aluminio para la remoción de color.

El análisis de varianza de una vía muestra que existen diferencias altamente significativas ( $P < 0.001$ ) entre los promedios de la variable color (U.C) del agua residual cuando están bajo el efecto de diferentes tratamientos de mezclas de chipilín en polvo y dosis de sulfato de aluminio evaluadas (125S.A -125CH, 150S.A-75CH, 250S.A, 200S.A-50CH, 225S.A-25CH y 150S.A-100CH) con un 95% de confianza. El contraste múltiple de medias de Tukey, indica con letras diferentes diferencias significativas entre tratamientos ( $P < 0.05$ ). El tratamiento que mostro el valor promedio más bajos de color fue el 150SA-75CH con  $230.5 \pm 4.20$ , seguido por los tratamientos 250SA, 200SA-50CH y 225S.A-25CH con promedios de  $247.0 \pm 4.96$ ,  $274.0 \pm 5.47$ ,  $281.5 \pm 8.10$  respectivamente. Los valores promedios más altos de color se observaron en los tratamientos 125S.A-125CH y 150S.A-100CH con promedios de  $380.2 \pm 6.99$ ,  $288.7 \pm 5.56$  respectivamente, como se ve en la figura 10.

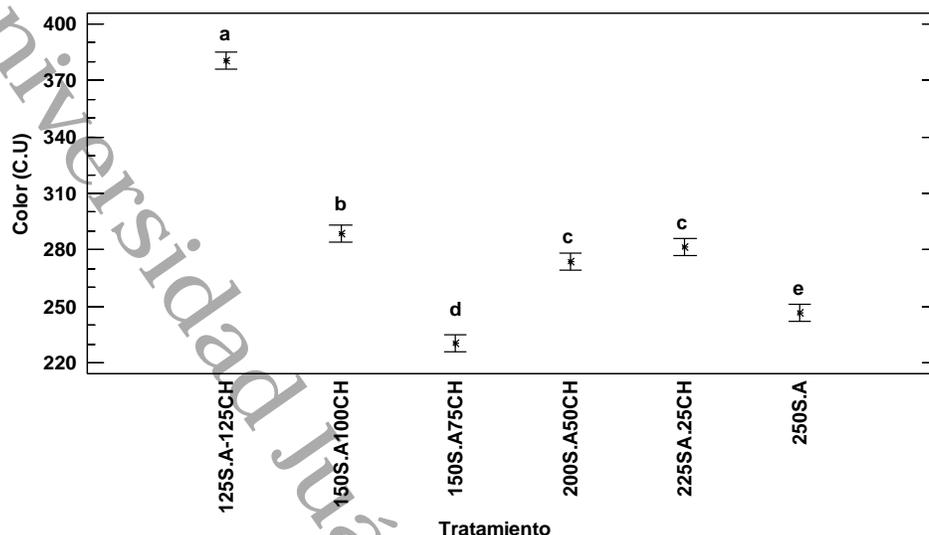
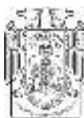


Figura 18 Valores promedio ( $\pm$  DE) de la variable color de las diferentes mezclas de polvo de chipilín y sulfato de aluminio evaluadas

### 7.5 Dosis De Mezclas De Chipilín En Polvo Y Sulfato De Aluminio Para La Remoción De Turbiedad

El análisis de varianza de una vía muestra que existen diferencias altamente significativas ( $P < 0.001$ ) entre los promedios de la variable turbiedad (NTU) del agua residual cuando están bajo el efecto de diferentes tratamientos de mezclas de chipilín en polvo y dosis de sulfato de aluminio evaluadas (125S.A -125CH, 150S.A-75CH, 250S.A, 200S.A-50CH, 225S.A-25CH y 150S.A-100CH) con un 95% de confianza. El contraste múltiple de medias de Tukey, indica con letras diferentes diferencias significativas entre tratamientos ( $P < 0.05$ ). Los tratamientos que mostraron los valores promedio más bajos de turbiedad fueron 150SA-75CH y 250S.A  $9.4 \pm 0.96$ ,  $9.07 \pm 5.22$  respectivamente, seguido por los tratamientos 200SA-50CH, 150S.A-100CH y 225SA-25CH con  $13.9 \pm 1.20$ ,  $14.3 \pm 1.79$ ,  $15.1 \pm 1.53$  respectivamente. El valor promedio más alto de turbiedad se observó en el tratamiento 125S.A-125CH con  $21.75 \pm 1.91$ , tal cual se observa en la figura 11.

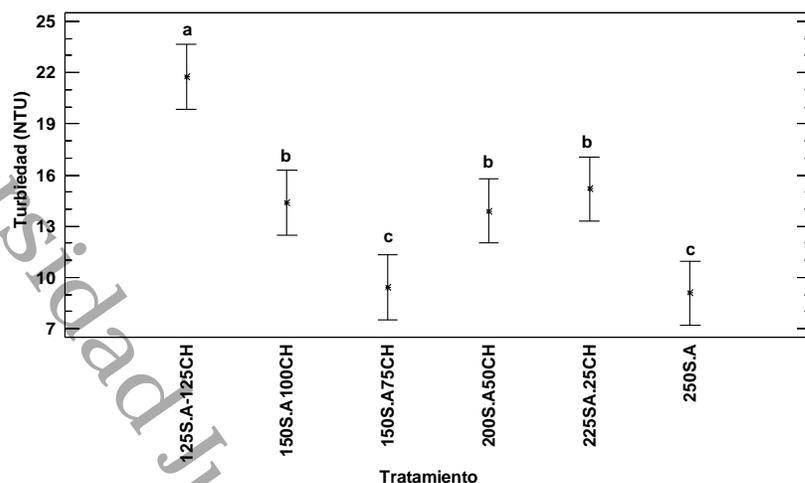
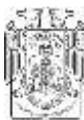
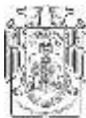


Figura 19 Valores promedio ( $\pm$  DE) de la variable turbiedad de las diferentes mezclas de polvo de chipilín y sulfato de aluminio evaluadas

## 7.6 CONCLUSIÓN

Este trabajo comprobó que las mezclas de polvo de chipilín (*Crotalaria longirostrata*) con sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3$  removieron una mayor cantidad de turbiedad y color que la dosis óptima de sulfato de aluminio en aguas residuales. La mezcla coagulante 150S.A75CH (175 mg/L de sulfato de aluminio y 75 mg/L polvo de chipilín) mostro el porcentaje más alto de remoción de turbiedad y color (83.4% NTU y 64.9% U.C respectivamente) que la dosis óptima de sulfato de aluminio (82.5% NTU y 62.4% U.C). Los resultados de este trabajo lograron reducir en un 35% el uso del sulfato de aluminio, lo cual es de suma importancia, ya que las dosis de sulfato de aluminio utilizadas comúnmente en el tratamiento de aguas para la reducción de turbiedad y color dejan residuos de aluminio en el agua, que causan daños a la salud y los ecosistemas. El uso del polvo del chipilin como coadyuvante en la remoción de turbiedad y color no tiene efectos tóxicos ya que es un arbusto comestible. Es recomendable seguir haciendo estudios con el polímero de chaya en diferentes tipos de aguas residuales por ejemplo aguas residuales industriales, aguas residuales domésticas y aguas residuales urbanas ya que en este estudio solo se utilizó agua superficial.



## 8.- REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

Argueta A. Atlas de la Medicina Tradicional Mexicana (Vol. 1). México, D.F.: Instituto Nacional Indigenista; 1994.

Barrenechea, A. (2004). Tratamiento de aguas para consumo humano. In Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: teoría. (Vol. 1). Lima -Perú.

Bratby J. (2006) Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment. IWA Publishing; 2a Ed. 424 p.

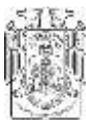
Bourke, Mike. Full Scale Study of Chemically Enhanced Primary Treatment in Riviera de Sao Lourenco, Brazil. (Master's thesis) Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering. Cambridge, USA. (2000)

Carrasco Quiroz C. A (2007). Tratamiento fisicoquímico de aguas residuales. Universidad de Chile. [www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2007/carrasco\\_c/sources/carrasco-c.pdf](http://www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2007/carrasco_c/sources/carrasco-c.pdf)

Chedoba, Juan; Menéndez, Carlos y Pérez Olmo, J. Fundamentos teóricos de algunos procesos para la purificación en aguas residuales. 1996

Díaz-Cuenca, Elizabeth y Alvarado-Granados, Alejandro Rafael y Camacho-Calzada, Karina Elizabeth (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. Quivera. Revista de Estudios Territoriales, 14 (1), 78-97. [Fecha de Consulta 28 de Septiembre de 2020]. ISSN: 1405-8626. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=401/40123894005>

Fontanills Seisdodos, Luis Antonio. Una tecnología apropiada para la clarificación de aguas de consumo humano en poblaciones periurbanas y rurales. Tesis de Maestría. 1998



Gomez Puentes N.A- (2005). Tesis: Remoción de materia orgánica por coagulación – floculación. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2841>

[http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/43806/3/TFM\\_AdrianUrrusunoGonzalez.pdf](http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/43806/3/TFM_AdrianUrrusunoGonzalez.pdf)

<https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3290/1/nom-001-semarnat-1996.pdf>

Mabberley's Plant Book 3rd ed. London: Cambridge University Press; 2008.

McKenzie R. Australia's Poisonous Plants, Fungi and Cyanobacteria. Victoria, Australia: CSIRO Publishing; 2012.

NOM-001-1996-SEMARNAT.

<https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3290/1/nom-001-semarnat-1996.pdf>

Olivero Verbel, Rafael, Florez Vergara, Alexy, Vega Fellizola, Luis, & Villegas de Aguas, Glenda. (2017). Evaluación de una mezcla para coagulantes naturales, *Opuntia ficus* y *Moringa oleífera* en clarificación de aguas. Producción + Limpia, 12(2), 71-79. <https://dx.doi.org/10.22507/pml.v12n2a6>

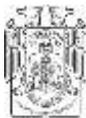
Pfrohne D, Pfander J. Poisonous Plants 2nd ed. Portland OR: Timber Press; 2005.

Quattrocchi, U. World Dictionary of Medicinal and Poisonous Plants (Vol.1). Boca Raton, FL: CRC Press; 2012.

Restrepo Osorno H. A. (2009). Tesis: Evaluación Del Proceso De Coagulación – Floculación De Una Planta De Tratamiento De Agua Potable. Universidad Nacional de Colombia. <http://www.bdigital.unal.edu.co/877/>

Romero Rojas, Jairo Alberto (1999). Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización. 3 ed. Ed. Alfa omega. México, D. F.: 281 p

Sánchez Gonzalez , Julie Andrea (2011). Estudio de hojas de *chelonanthus alatus* (*gentianaceae*). Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá Facultad de Ciencias Departamento de Química <http://bdigital.unal.edu.co/7287/>



---

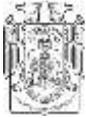
Sawyer, C. P.; McCarty, A; Parkin, G. 2001. Química para Ingeniería Ambiental. Cuarta Edición. Ed. Me Graw Hill.

SOLÍS SILVAN, Rudy, LAINES CANEPA, José Ramón, & HERNÁNDEZ BARAJAS, José Roberto. (2012). Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(3), 229-236. Recuperado en 07 de octubre de 2020, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992012000300005&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000300005&lng=es&tlng=es).

Wagstaff J. *International Poisonous Plant Checklist: An Evidence-Based Reference*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2008.

Water quality treatment. *A Handbook of public water supplies*, 3er edition, Cap. 6.J

White R. *Elsevier's Dictionary of Plant Names of North America Including Mexico*. Amsterdam: Elsevier; 2003.



## ANEXO

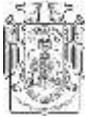
### Secado de chipilín



Figura 20 Secado de *C. Longirostra*



Figura 21. *C. Longirostra* secado y pulverizado



## Preparación de soluciones

Figura 22. Preparación de las distintas concentraciones de variación de *C. Longirostra* con el sulfato de aluminio

## Prueba de jarras

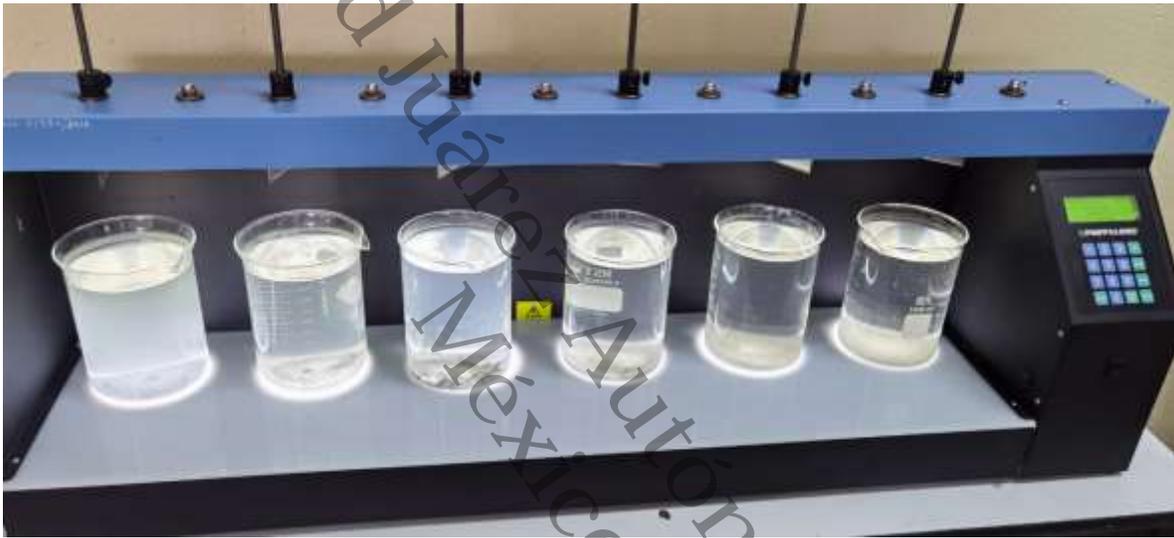


Figura 23 Prueba de jarras de agua residual con las soluciones preparadas en las distintas variaciones del sulfato de aluminio

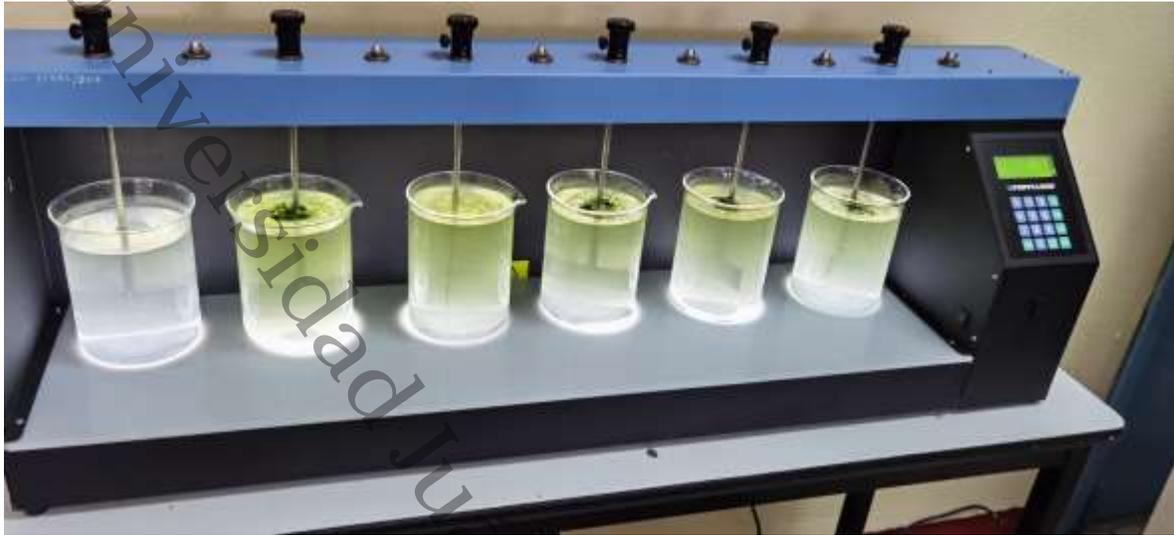
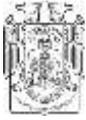
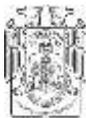


Figura 24 Prueba de jarras de agua residual con las soluciones preparadas en las distintas variaciones del *C. Longirostra* y sulfato de aluminio

### Medición de parámetros



Figura 25. Medición de parámetros después de la aplicación del tratamiento sulfato de aluminio y chipilin



## Resultados de microscopia electrónica de barrido

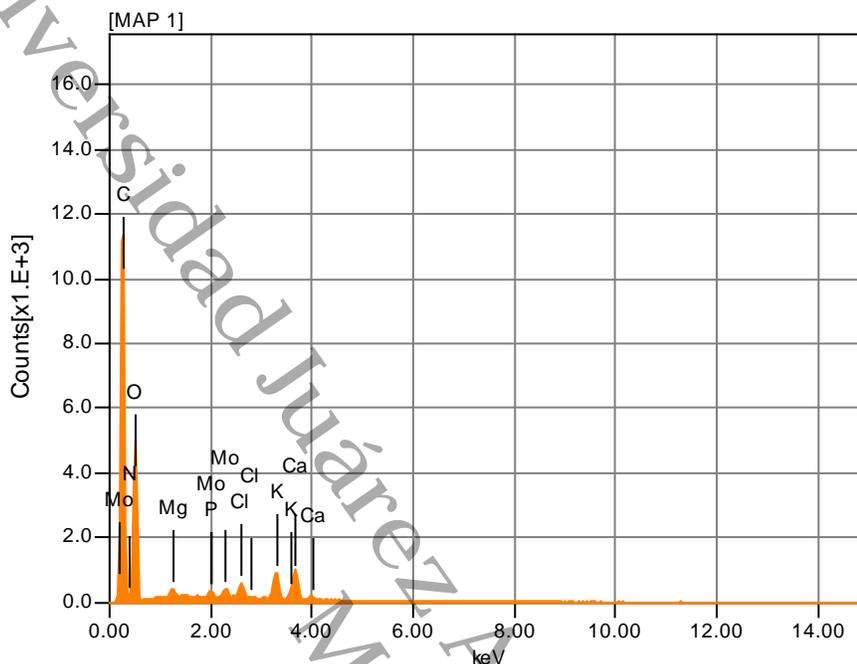
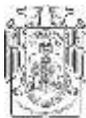


Figura 26 Composición de elementos disponibles en el chipilín por microscopia de barrido

Tabla 5 % de elementos obtenidos de la microscopia de barrido

Chemical formula	ms%	mol%	Sigma	Net	K ratio	Line
C	45.31	52.75	0.12	245644	0.0985368	K
N	16.51	16.48	1.79	12639	0.0679944	K
O	33.35	29.15	0.66	103409	0.1408748	K
Mg	0.31	0.18	0.18	8486	0.0037821	K
P	0.23	0.10	0.16	7637	0.0051535	K
Cl	0.54	0.21	0.16	19016	0.0122923	K
K	1.36	0.49	0.23	41582	0.0314914	K
Ca	1.43	0.50	0.24	44838	0.0344469	K
Mo	0.96	0.14	0.48	18506	0.0170960	L
Total	100.00	100.00				



## Propuesta de artículo

Coagulación de aguas residuales mediante una mezcla de polvo de *Crotalaria longirostrata* y sulfato de aluminio

Coagulation of wastewater using a mixture of *Crotalaria longirostrata* powder and aluminum sulfate

**Alicia Pastrana Pacho**

Instituto Tecnológico Superior de Centla. México

[aliciapastrana10@gmail.com](mailto:aliciapastrana10@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0002-8120-4341>

**Dr. Rudy Solís Silvan**

Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco. México

[Rudy.solisilvan@gmail.com](mailto:Rudy.solisilvan@gmail.com)

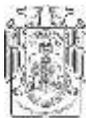
<https://orcid.org/0000-0001-6373-0893>

**M. C. A Israel Ávila Lázaro**

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

[rasrabond@gmail.com](mailto:rasrabond@gmail.com)

ORCID



---

Dr. José Ramón Laínez Canepa

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México

[josra\\_2001@yahoo.com.mx](mailto:josra_2001@yahoo.com.mx)

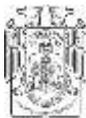
Dr. Baltazar Sánchez Días

Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco. México

[baltazar.sanchez@comalcalco.tecnm.mx](mailto:baltazar.sanchez@comalcalco.tecnm.mx)

## Resumen

Los coagulantes naturales a base de plantas se han usado para el tratamiento de aguas desde tiempos remotos y son amigables con el medio ambiente. El objetivo de este trabajo fue evaluar la capacidad de remoción de turbiedad y color de una mezcla coagulante de polvo *Crotalaria longirostrata* y sulfato de aluminio vs sulfato de aluminio. Se evaluó la dosis optima de sulfato de aluminio comercial y las mezclas coagulantes natural de polvo de *C. longirostrata* y sulfato de aluminio (tratamientos) que tuvieran la mayor remoción de turbiedad y color (variable respuesta) de un agua residual doméstica. Se utilizó un equipo de prueba de jarras marca Philes<sup>MR</sup> para la determinación de las dosis optimas de coagulantes. La turbiedad y color se midieron con un turbidímetro marca Lamote<sup>MR</sup>. Se usó un diseño simple completamente aleatorizado de un factor y un análisis de varianza seguido de un contraste múltiple de Tukey para encontrar diferencias estadísticas significativas entre los diferentes tratamientos. Las mezclas de polvo de *C. longirostrata* con sulfato de aluminio (75 mg/L de polvo de *C. longirostrata* + 175 mg/L de sulfato) removieron una mayor cantidad de turbiedad y color que la dosis optima de sulfato de aluminio (250 mg/L), con remociones de 83.4% de turbiedad y 64.9% de color respectivamente. Los resultados lograron reducir un 30% el uso del sulfato de aluminio. El uso de polvo *C. longirostrata* como coadyuvante en la remoción de turbiedad y color no tiene efectos tóxicos ya que es un arbusto comestible.



---

## Palabras clave

Coagulante; floculación, turbiedad, color, prueba de jarras, agua residual

## Abstract

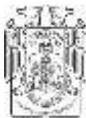
Natural plant-based coagulants have been used for water treatment since ancient times, and they are friendly with the environment. The objective of this work was to evaluate the turbidity and color removal capacity of a coagulant mixture of *Crotalaria longirostrata* powder and aluminum sulfate vs aluminum sulfate. The optimal dose of commercial aluminum sulfate (treatments) and the natural coagulant mixtures of *C. longirostrata* powder and aluminum sulfate were evaluated, that had the highest turbidity and color (independent variable) removal of a domestic wastewater. A Philes<sup>MR</sup> brand jar test kit was

used to determine optimal coagulant dosages. Turbidity and color were measured with a Lamote brand turbidimeter<sup>MR</sup>. A simple one-factor completely randomized design was used and an analysis of variance followed by a multiple Tukey test to find statistically significant differences between the different treatments. Mixtures of *C. longirostrata* powder with aluminum sulfate (75 mg / L of *C. longirostrata* powder + 175 mg / L of sulfate) removed a greater amount of turbidity and color than the optimal dose of aluminum sulfate (250 mg/L) with removals of 83.4% of turbidity and 64.9% of color respectively. The results managed to reduce the use of aluminum sulfate by 30%. The use of *C. longirostrata* powder as an aid in the removal of turbidity and color does not have toxic effects since it is an edible shrub.

## Keywords

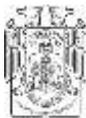
Coagulant; flocculation, turbidity, color, jar test, residual water

## Introducción



Los coagulantes químicos son sustancias de origen natural o artificial que se adicionan al agua para remover la carga orgánica, inorgánica y biológica, mediante la formación de productos insolubles que tienden a precipitar, eliminándole olor, color y turbiedad. Desde los años 70 en varios países latinoamericanos están utilizando coagulantes naturales a bases de diferentes especies vegetales locales para disminuir en parte o en su totalidad el consumo de coagulantes químicos [1]. En el proceso de coagulación / floculación, algunos productos químicos se utilizan como coagulantes primarios y neutralizan las partículas coloidales cargadas. El coagulante reduce la fuerza de repulsión presente entre las partículas coloidales y, por lo tanto, las partículas entran en contacto entre sí y forman pequeños flóculos. En la naturaleza están presentes varios coagulantes eficaces que pueden usarse directamente o después de la modificación [2]. Se ha estudiado que los altos niveles de aluminio remanente en las aguas tratadas ponen en riesgo la salud pública debido a que grandes cantidades pueden ser causante del síndrome del Alzheimer, así mismo menciona que investigaciones realizadas en Inglaterra muestran que el riesgo de contraer esta enfermedad es 1.5 veces mayor en los sitios donde las concentraciones de aluminio exceden los 0.110mg/l [3].

Los coagulantes de origen vegetal (PCB) se utilizan en el tratamiento de agua pero no son eficaces a escala industrial debido a su mayor coste en comparación con los coagulantes sintéticos [2]. Estos coagulantes son más efectivos en el tratamiento de aguas residuales, que tienen un rango de turbidez bajo o medio (50-500 NTU). Los bio-floculantes naturales o utilizados en el tratamiento de aguas residuales se aíslan de diversas fuentes naturales. Estos coagulantes se utilizan como coagulantes / floculantes primarios o auxiliares en el proceso de coagulación / floculación. Estos son económicos y también se utilizan como coagulantes / floculantes alternativos. La mejora de muchos parámetros en las aguas residuales tratadas es la función principal de los coagulantes-biocoagulantes o coagulantes naturales son ciertamente seguros, amigables con el ambiente y libres de toxicidad (bajo condiciones adecuadas de uso). Sus compuestos bioactivos son proteínas, polisacáridos, mucílagos, taninos y alcaloides [4]. En la actualidad se buscan mezclas de ambos tipos (sintéticos y naturales), entre los coagulantes naturales que se han utilizado se tiene referencias de Moringa oleífera y Benincasa hispida [5], Mangifera indica L [6], Moringa Oleifera -Cactus Opuntia-mezcla de alumbre [7], efluente del molido para la obtención del aceite de palma con el Aloe Vera [8] Tamarindo (Tamarindus Indica) [9].



A pesar de los avances de los polímeros naturales, las plantas de tratamientos siguen utilizando polímeros sintéticos a pesar de las consecuencias a la salud y contaminación los ecosistemas. El objetivo principal de esta investigación fue evaluar la capacidad de remoción de turbiedad y color en aguas residuales mediante la aplicación de una mezcla de polvo de *Crotalaria longirostrata* (Chipilin) y sulfato de aluminio, para el tratamiento de aguas residuales. En base a los resultados obtenidos se pueden realizar propuestas para ser utilizado en las plantas de tratamientos de aguas residuales municipales buscando disminuir la dosis de sulfato de aluminio.

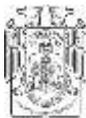
## Materiales y métodos (metodología)

### Caracterización del Agua Residual

La muestra de agua residual a utilizar se tomó del biodigestor principal del Instituto Tecnológico Superior de Centla, en donde se recolectó un volumen de 100 litros siendo depositados en contenedores de 200 litros cada uno. El análisis de las aguas se realizó en el laboratorio del Instituto Tecnológico superior de Comalcalco, donde se midieron los parámetros fisicoquímicos de turbiedad y color. Con el uso de un turbidímetro marca Hanna HI 93703 con precisión 0.01 NTU-turbiedad por el método EPA 180.1 (EPA 1983, NOM-041-SSA1 1993, ISO 1990) se midió la turbiedad. El color fue medido con el mismo equipo con una precisión 0.1 CU-color por el método estándar 2120B. Los parámetros iniciales del agua cruda residual fueron de: turbiedad de 167.7 NTU y color 657 U.C

### Obtención del Sustrato de *C. Longirostrata*

El *C. Longirostrata* se obtuvo 1 kg de hojas frescas, mismas que fueron colocadas en charolas de aluminio para ser secadas a temperatura ambiente en un tiempo aproximado de 2 semanas, siguiendo la metodología propuesta por [\[10\]](#). Siendo trituradas por un mortero y posteriormente



tamizadas en malla de plástico para dejar homogénea el tamaño de las partículas, se enfrascó en botellas de plástico de tereftalato de polietileno (acrónimo en inglés, PET). En la figura 1 se presenta la fotografía del polvo del *C. longirostrata* obtenido por microscopia de barrido.

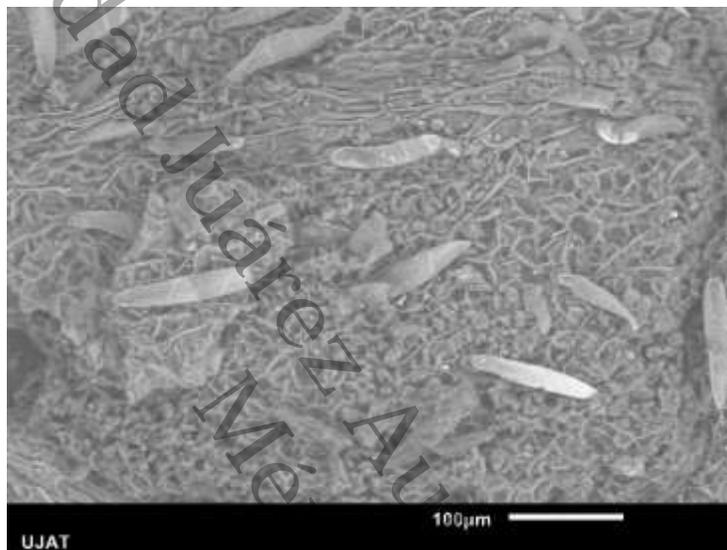
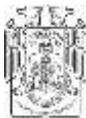


Figura 1. Corpúsculos de *C. longirostrata* obtenida en microscopio de barrido.

Se prepararon dos soluciones de referencia. Para la solución del sulfato de aluminio se pesaron 2 g de sulfato de aluminio (J.T. Baker, Nueva Jersey, EUA) con un grado de pureza del 98.5 % y se disolvieron en un litro de agua destilada. De la misma forma, se preparó la solución de referencia del polvo de la *C. longirostrata*, pesando 2 g y disolviendo en un litro de agua destilada [\[11\]](#)

#### Procedimientos de Coagulación-Floculación

Se realizan ensayos de jarras, para las diferentes concentraciones del coagulante a ensayar. Se toma como base la concentración óptima del sulfato de aluminio comercial (30 mg/L) (tratamiento 1), se prepararon las mezclas *C. longirostrata* -sulfato en las proporciones de concentración siguientes; 2:28 mg/L (tratamiento 2); 4:26 (tratamiento



3); 6:24 (tratamiento 4); 8:22 (tratamiento 5); 10:20 (tratamiento 6) y 12:18 (tratamiento 7). Las velocidades de mezclado y de sedimentación durante la prueba de jarras con las mezclas coagulantes, se realizan de la misma manera que como se obtuvo la dosis óptima del sulfato de aluminio comercial, con la diferencia que primero se agregan las concentraciones de sulfato de aluminio en la mezcla rápida y durante la mezcla lenta se agregaron las concentraciones del *C. longirostrata*. Al final del experimento a cada mezcla se le midieron los parámetros de caracterización de la calidad del agua (turbiedad, color, pH y temperatura).

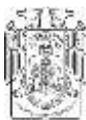
### **Análisis Estadístico**

Se utilizó un análisis de varianza para encontrar diferencias estadísticas significativas entre el coagulante sulfato de aluminio y las mezclas de polvo de *C. longirostrata* y sulfato de aluminio. Se llevó a cabo un contraste múltiple de medias de Tukey para ver que tratamientos eran diferentes entre sí.

## **Resultados y discusiones**

### **Dosis Óptima de Sulfato de Aluminio para la remoción de Turbiedad**

El análisis de varianza de una vía muestra que existen diferencias altamente significativas ( $P < 0.001$ ) entre los promedios de la variable turbiedad (NTU) del agua residuales, bajo los efectos diferentes tratamientos de dosis de sulfato de aluminio evaluadas (0,100S.A, S.A150A, 200S.A, 250S.A y 300S.A) con un 95% de confianza. El contraste múltiple de medias de Tukey, indica con letras diferentes diferencias significativas entre tratamientos ( $P < 0.05$ ). El tratamiento que mostro el valor promedio más bajos de turbiedad (NTU) fue el 250S.A con  $9.92 \pm 1.28$ , seguido por los tratamientos 300S.A y 200S.A con promedios de  $14.47 \pm 0.69$ ,  $18.07 \pm 1.09$  respectivamente. Los valores promedios más altos de turbiedad se apreciaron en los



tratamientos 0, 100S.A y 150S.A con  $47.4 \pm 3.09$ ,  $28.9 \pm 2.19$  y  $21.4 \pm 1.93$  respectivamente, como se puede apreciar en la figura 2.

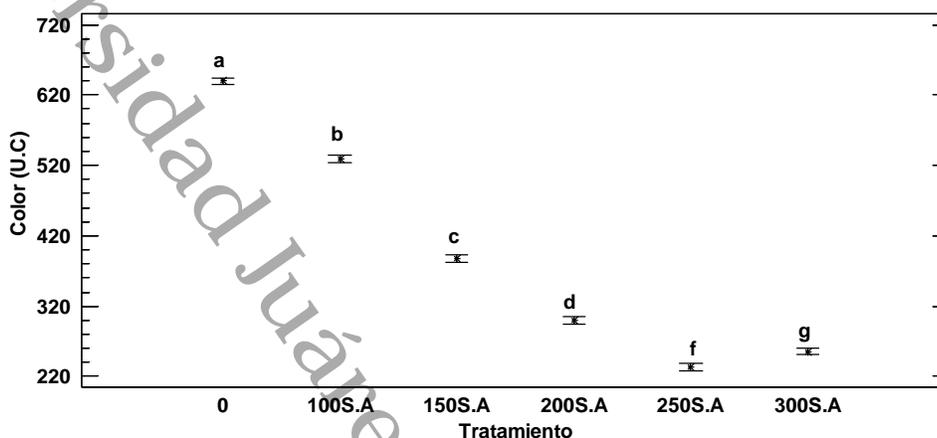


Figura 27. Valores promedios ( $\pm$  DE) de la variable turbiedad de las diferentes dosis de sulfato de aluminio evaluados

### Dosis Optima de Sulfato de Aluminio para la Remoción de Color

En el análisis de varianza de una vía realizados nos muestran que existen diferencias altamente significativas ( $P < 0.001$ ) entre los promedios de la variable color (U.C) del agua residual, cuando se les aplica diferentes tratamientos de dosis de sulfato de aluminio evaluadas (0, 100S.A, 150S.A, 200S.A, 250S.A Y 300S.A) con un 95% de confianza. El contraste múltiple de medias de Tukey, indica con letras diferentes diferencias significativas entre tratamientos ( $P < 0.05$ ). El tratamiento que mostro el valor promedio más bajo de color fue el 250S.A con  $233.5 \pm 6.45$ , seguido por los tratamientos 300.S.A y 200S.A con  $255.7 \pm 5.8$ ,  $299.5 \pm 9.88$  respectivamente. Los tratamientos que mostraron los valores promedios más altos de color fueron 0, 100S.A y 150S.A con  $639.5 \pm 5.80$ ,  $529.0 \pm 5.94$ ,  $387.5 \pm 7.76$  respectivamente, tal cual se observa en la figura 3.

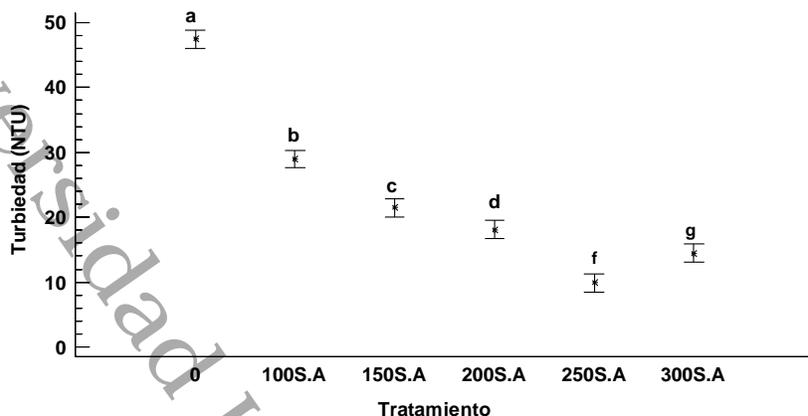
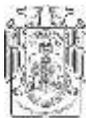


Figura 3. Valores promedios ( $\pm$  DE) de la variable color de las diferentes dosis de sulfato de aluminio evaluada

#### Dosis de Mezclas de Polvo *C.longirostrata* y Sulfato de Aluminio para la Remoción de Color.

El análisis de varianza de una vía muestra que existen diferencias altamente significativas ( $P < 0.001$ ) entre los promedios de la variable color (U.C) del agua residual cuando están bajo el efecto de diferentes tratamientos de mezclas de *C. longirostrata* en polvo y dosis de sulfato de aluminio evaluadas (125S.A -125CH, 150S.A-75CH, 250S.A, 200S.A-50CH, 225S.A-25CH y 15 y0S.A-100CH) con un 95% de confianza. El contraste múltiple de medias de Tukey, indica con letras diferentes diferencias significativas entre tratamientos ( $P < 0.05$ ). El tratamiento que mostro el valor promedio más bajos de color fue el 125SA-75CH con  $230.5 \pm 4.20$ , seguido por los tratamientos 250SA, 200SA-50CH y 225S.A-25CH con promedios de  $247.0 \pm 4.96$ ,  $274.0 \pm 5.47$ ,  $281.5 \pm 8.10$  respectivamente. Los valores promedios más altos de color se observaron en los tratamientos 125S.A-125CH y 150S.A-100CH con promedios de  $380.2 \pm 6.99$ ,  $288.7 \pm 5.56$  respectivamente, como se ve en la figura 4.

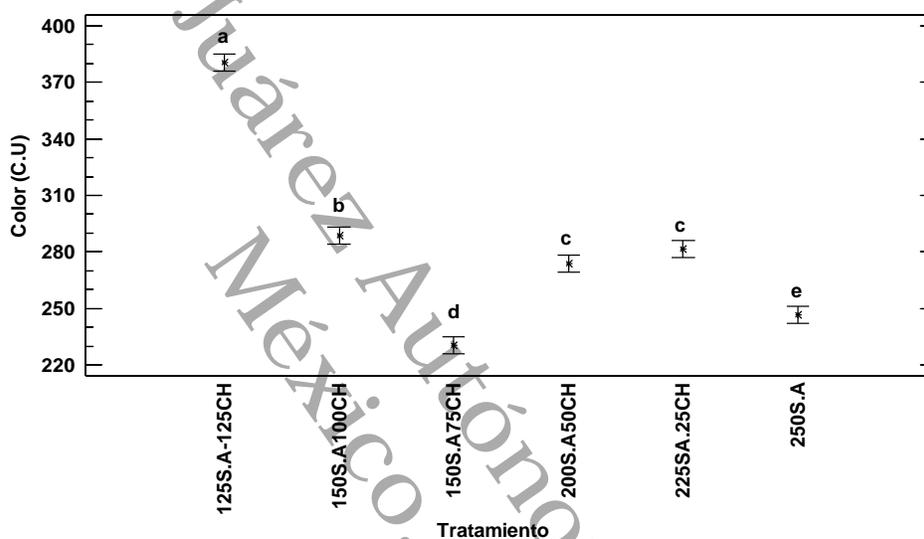
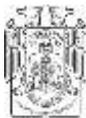
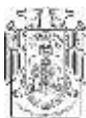


Figura 28. Valores promedios ( $\pm$  DE) de la variable color de las diferentes mezclas de polvo de chipilín y sulfato de aluminio evaluadas

### Dosis de Mezclas de polvo *C.longirostrata* en Polvo y Sulfato de Aluminio para la Remoción de Turbiedad

El análisis de varianza de una vía muestra que existen diferencias altamente significativas ( $P < 0.001$ ) entre los promedios de la variable turbiedad (NTU) del agua residual cuando están bajo el efecto de diferentes tratamientos de mezclas de *C.longirostrata* en polvo y dosis de sulfato de aluminio evaluadas (125S.A -125CH, 150S.A-75CH, 250S.A, 200S.A-50CH, 225S.A-25CH y 150S.A-100CH) con un 95% de confianza. El contraste múltiple de medias de Tukey, indica con letras diferentes



diferencias significativas entre tratamientos ( $P < 0.05$ ). Los tratamientos que mostraron los valores promedios más bajos de turbiedad fueron 150SA-75CH y 250S.A  $9.4 \pm 0.96$ ,  $9.07 \pm 5.22$  respectivamente, seguido por los tratamientos 200SA-50CH, 150S.A-100CH y 225SA-25CH con  $13.9 \pm 1.20$ ,  $14.3 \pm 1.79$ ,  $15.1 \pm 1.53$  respectivamente. El valor promedio más alto de turbiedad se observó en el tratamiento 125S.A-125CH con  $21.75 \pm 1.91$ , tal cual se observa en la figura 5.

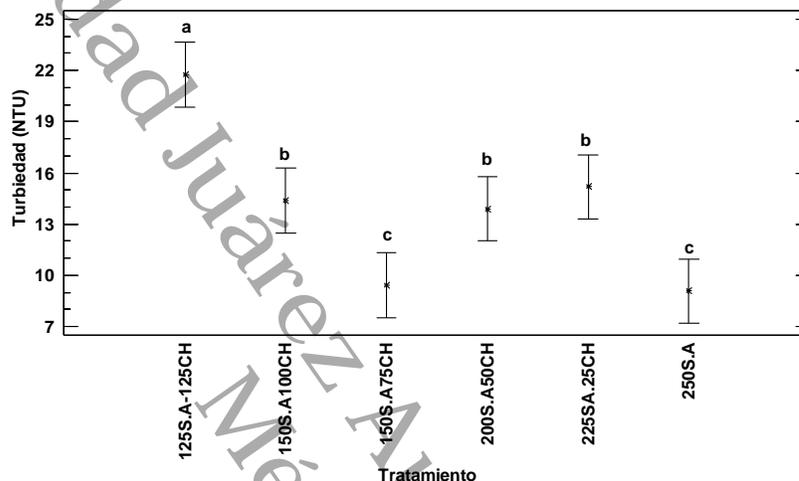
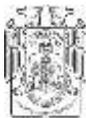


Figura 5 Valores promedios ( $\pm$  DE) de la variable turbiedad de las diferentes mezclas de polvo de chipilín y sulfato de aluminio evaluadas

## Conclusiones y/o recomendaciones (discusión)

Las mezclas de polvo de *C. longirostrata* con sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3$  removieron una mayor cantidad de turbiedad y color que la dosis óptima de sulfato de aluminio en aguas residuales. La mezcla coagulante 150S.A75CH (150 mg/L de sulfato de aluminio y 65 mg/L polvo de *C. longirostrata*) mostro el porcentaje más alto de remoción de turbiedad y color (83.4% NTU y 64.9% U.C respectivamente) que la dosis óptima de sulfato de aluminio (82.5% NTU y 62.4 U.C). Los resultados de este trabajo lograron reducir en un 35% el uso del sulfato de aluminio, lo cual es de suma importancia, ya que las dosis de sulfato de aluminio utilizadas comúnmente en el tratamiento de aguas para la reducción de turbiedad y color dejan residuos de aluminio en el agua, que causan daños a la salud y los ecosistemas. El uso del polvo de la *C. longirostrata* como coadyuvante en la



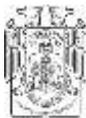
remoción de turbiedad y color no tiene efectos tóxicos ya que es un arbusto comestible. Es recomendable seguir haciendo estudios con el polímero de *C. longirostrata* en diferentes tipos de aguas residuales por ejemplo aguas residuales industriales, aguas residuales domésticas y aguas residuales urbanas ya que en este estudio solo se utilizó agua superficial.

## Agradecimientos

Al Instituto Tecnológico superior de Comalcalco, Instituto Tecnológico de Centla y a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por la ayuda técnica de su personal y usos de laboratorio.

## Referencias

- [1] R. Olivero Verbel, A. Florez Vergara, L. Vega Fellizola, & G. Villegas de Aguas. "Evaluación de una mezcla para coagulantes naturales, Opuntia ficus y Moringa oleifera en clarificación de aguas". *Producción + Limpia*, 12(2), 71-79 <https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a6>
- [2] A. Nath, A. Mishra and P. P. Pande. "A review natural polymeric coagulants in wastewater treatment, Materials Today: Proceedings" <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.551a>
- [3] D. Choque-Quispe, Y. Choque-Quispe, A. M Solano-Reynoso, & B. S. Ramos-Pacheco. "Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua. Tecnología Química". 38(2), 298-309. 2018. Recuperado en 31 de octubre de 2021, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852018000200008&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000200008&lng=es&tlng=es).
- [4] C. Banchón; R. Baquerizo; D. Muñoz; L. Zambrano. "Coagulación natural para la descontaminación de efluentes industriales". *Enfoque UTE*, vol. 7, núm. 4, Octubre-Diciembre, pp. 111-126. 2016. Universidad Tecnológica Equinoccial DOI: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n4.118>



- [5] P. Agarwal, G. Saini. "Use of natural coagulants (*Moringa oleifera* and *Benincasa hispida*) for volume reduction of waste drilling slurries." *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.924.2021>
- [6] M. Carpio, C. Ruiz, D. Esenarro, C. Rodríguez, G. García, J. Breña. "Natural Coagulant Based on Mango Seeds (*Mangifera indica* L) in Removal of Turbidity of Domestic Wastewater." *International Journal of Advanced Science and Technology*. Vol. 29, No. 7 pp. 2726 – 2734. 2020. <http://sersc.org/journals/index.php/IJAST/article/view/18144/9197>
- [7] B.I. Gandiwa, L.B. Moyo, S. Ncube, T.A. Mamvura, L.L. Mguni, N. Hlabangana. "Optimisation of using a blend of plant based natural and synthetic coagulants for water treatment: (*Moringa Oleifera*-*Cactus Opuntia*-alum blend)." *South African Journal of Chemical Engineering*. Vol. 34 pp. 158–164. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2020.07.005>
- [8] K. S. Lim, V. Sethu, A. Selvarajoo. "Natural plant materials as coagulant and flocculants for the treatment of palm oil mill effluent." *Materials Today: Proceedings*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.483>
- [9] Y. Fernández-Gutiérrez, C. Ruiz-Huamán. "Tratamiento de agua residual mediante aplicación de sulfato de aluminio y biopolímero natural de tamarindo (*Tamarindus indica*)." *Revista de Investigación: Ciencia, Tecnología y Desarrollo*. Vol 6 No. 2 pp: 28-34. 2020. [https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/ri\\_ctd/index](https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/ri_ctd/index) ISSN 2410-843x (en línea)
- [10] J. P. Laguna González, "Determinación de la actividad biológica y caracterización de extractos de chípilín (*Crotalaria longirostrata*) con potencial aplicación a alimentos". Tesis de licenciatura. Depto. Ciencia y Tecnología de Alimentos. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". Saltillo, Coah. 2016. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/8378>
- [11] R. SOLIS SILVAN, J. R LAINES CANEPA, J.R. HERNÁNDEZ BARAJAS. "Mezclas con potencial coagulatne para clarificar aguas superficiales." *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 28, núm. 3, 2012. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992012000300005&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000300005&lng=es&nrm=iso)