



"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RIO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

"CLARIFICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA
ACUÍCOLA UTILIZANDO SEMILLAS DE *Moringa oleifera*"

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL

PRESENTA

ING. ARTURO RIVERA DOMÍNGUEZ

DIRECTOR DE TESIS:

M.C. IRVING DAVID PÉREZ LANDA

CODIRECTOR DE TESIS

DRA. OFELIA ANDREA VALDÉS RODRÍGUEZ

ASESORES

DR. ARTURO PÉREZ VÁZQUEZ

DRA. ITZEL GALAVIZ VILLA

DR. JESÚS MONTOYA MENDOZA

MARZO 2019; BOCA DEL RÍO, VERACRUZ, MÉXICO

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Número Registro No. A0802-260416

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 14:00 horas del día 22 del mes de enero de 2019 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Consejo del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITBOCA, para examinar la Tesis de Grado titulada:

"CLARIFICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA ACUÍCOLA UTILIZANDO SEMILLAS DE *Moringa oleifera*"

Que presenta el (la) alumno(a):

ING. ARTURO RIVERA DOMÍNGUEZ

Aspirante al Grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

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

LA COMISIÓN REVISORA:



M.C. Irving David Pérez Landa
Director de Tesis



Dra. Ofelia Andrea Valdés Rodríguez
Co-director



Dra. Itzel Galeviz Villa
Asesor



Dr. Jesús Montoya Mendoza
Asesor



Km. 12 Carr. Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver. C.P. 94290
Tel. (229) 6905010 e-mail: dir01_bdelrio@tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.itboca.edu.mx





TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Boca del Río

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Boca del Río, Veracruz, **11/Febrero/2019**
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

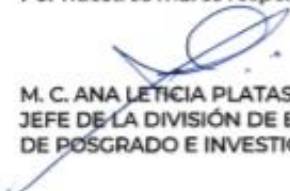
ING. ARTURO RIVERA DOMÍNGUEZ
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL
PRESENTE

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

"CLARIFICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA ACUÍCOLA UTILIZANDO SEMILLAS DE *Moringa oleifera*"

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

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
Por nuestros mares responderemos


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

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



Km. 12 Carr. Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver. C.P. 94290
Tel. (229) 6905010 e-mail: dir@itbdlr.io@tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.itboca.edu.mx



RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue analizar el efecto de las variables agroclimáticas sobre la composición proximal de las semillas de *Moringa oleifera* Lam. cultivadas en dos municipios de la región central del estado de Veracruz, México; con el propósito de determinar su potencial para su utilización como coagulante natural en el tratamiento de aguas residuales de la industria acuícola. Las semillas de moringa se obtuvieron de un cultivo particular ubicado en la ciudad de Veracruz (zona 1) y de una plantación en el Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz (zona 2). La extracción del aceite de las semillas se realizó mediante un equipo que funciona bajo el principio del método Soxhlet, utilizando n-hexano como solvente. El análisis proximal de las semillas se realizó con base en los métodos estándar establecidos por “The Association of Official Analytical Chemists” (AOAC). La evaluación del efecto coagulante de las semillas se realizó a partir del estudio de parámetros fisicoquímicos tales como turbidez, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos totales (ST), dureza, pH y conductividad. Se encontró que las semillas de moringa cultivadas en ambas zonas de la región central del estado de Veracruz contienen en promedio $2.92 \pm 2.17\%$ de humedad, $39.9 \pm 2.17\%$ de proteína, $37.05 \pm 0.64\%$ de grasa (aceite), $2.97 \pm 0.31\%$ de ceniza y $10.64 \pm 1.59\%$ de carbohidratos totales. Las condiciones de menor precipitación pluvial, mayor radiación solar, y un pH cercano a la neutralidad, con textura arenosa y composición salina rica en nitrógeno ejercieron un efecto benéfico en el contenido de proteína de las semillas de moringa de la zona 1 y, por ende, un mayor efecto clarificante sobre aguas residuales acuícolas, alcanzando una remoción de turbidez de $70.92 \pm 2.21\%$, y de sólidos totales del $97.11 \pm 0.36\%$. Se concluye que las semillas de *Moringa oleifera* de la región de Veracruz, presentan alto potencial para ser utilizadas en el tratamiento integral de aguas residuales de la industria acuícola.

Palabras clave: *Moringa oleifera*, variables agroclimáticas, composición química, coagulación-floculación, aguas residuales acuícolas.

ABSTRACT

The objective of this investigation was to analyze the effect of the agroclimatic variables on the proximal composition of the seeds of *Moringa oleifera* cultivated in two municipalities in the central region of the state of Veracruz, Mexico; with the purpose of determining its potential for use as a natural coagulant in the treatment of wastewater from the aquaculture industry. Moringa seeds were obtained from a particular crop located in the city of Veracruz (zone 1) and from a plantation in the Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz (zone 2). The extraction of the oil from the seeds was carried out by means of equipment that works under the Soxhlet method principle, using n-hexane as a solvent. The proximal analysis of the seeds was carried out based on the standard methods established by "*The Association of Official Analytical Chemists*" (AOAC). The evaluation of the coagulant effect of the seeds was made from the study of physicochemical parameters such as turbidity, biochemical oxygen demand (BOD), total solids (TS), hardness, pH and conductivity. It was found that the moringa seeds grown in both zones of the central region of the state of Veracruz averaged $2.92 \pm 2.17\%$ humidity, $39.9 \pm 2.17\%$ protein, $37.05 \pm 0.64\%$ fat (oil), $2.97 \pm 0.31\%$ ash and $10.64 \pm 1.59\%$ of total carbohydrates. Environmental conditions, like lower rainfall, higher solar radiation, and soil with pH close to neutrality, sandy texture and nitrogen-rich soil had a beneficial effect on the protein content in the moringa seeds of zone 1 and, consequently, a greater effect on aquaculture wastewater, reaching a turbidity removal of $70.92 \pm 2.21\%$, and total solids removal of $97.11 \pm 0.36\%$. It is concluded that the seeds of *Moringa oleifera* of the Veracruz region, present a good potential to be used in the integrative treatment of the aquaculture industry wastewaters.

Keywords: *Moringa oleifera*, agroclimatic variables, chemical composition, coagulation-flocculation, aquaculture wastewater.

DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por acompañarme en cada paso que doy, por brindarme las fuerzas necesarias e iluminarme y sobre todo, por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante esta etapa de mi vida.

A mis padres **Pablo Rivera Acevedo** y **Rita Domínguez Rosas** por haberme dado la vida, por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación, pero sobre todo por su paciencia y amor incondicional. Son mi motor para seguir adelante.

A mis hermanos **Pablo Rivera Domínguez** e **Isabel Rivera Domínguez** por ser parte importante de mi vida y representar la unidad familiar. Por ser un ejemplo de lucha y fortaleza, por llenar mi vida de alegrías y amor cuando más lo he necesitado.

A toda mi familia en general, en especial a mi abuelita **Consuelo Rosas Hernández**, gracias por creer en mí, por ser el pilar de la familia, por cobijarme en los momentos difíciles.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el apoyo económico (beca) para llevar a cabo mis estudios de posgrado.

Al **Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Boca del Río** por darme la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental.

A mis asesores: **M. C. Irving David Pérez Landa, Dra. Ofelia Andrea Valdés Rodríguez, Dr. Arturo Pérez Vázquez, Dra. Itzel Galaviz Villa y Dr. Jesús Montoya Mendoza**, por la paciencia que me brindaron durante esta investigación, su tiempo, sus conocimientos, pero sobre todo, por su apoyo incondicional.

A la **Q.F.B. Enoe Eréndira Rocha Miller**, a la **M.C. Alicia Sánchez Chávez** y al **Dr. Lucio Abel Vázquez León**, por su apoyo, tiempo y conocimientos aportados.

A mis compañeros de generación y amigos: **Amada Martínez Rodríguez, Mauricio Reyes Díaz, Angélica Aurora Morales Osorio, Maria Cristina Rendón Pérez y Nuria Miranda** por estar conmigo en todo momento y motivarme para salir adelante.

ÍNDICE

Página

1. INTRODUCCIÓN	11
2. ANTECEDENTES	14
2.1 Aguas residuales	14
2.1.1 Aguas residuales domésticas o aguas negras	14
2.1.2 Aguas blancas	14
2.1.3 Aguas residuales industriales	14
2.1.4 Aguas residuales agrícolas	14
2.2 Problemática de las aguas residuales	15
2.3 Tratamiento de aguas residuales	15
2.3.1 Procesos físicos	16
2.4 Características de los coagulantes	22
2.5 Tipos de coagulantes	23
2.5.1 Coagulantes orgánicos	25
2.5.2 Coagulantes naturales empleados en el tratamiento de aguas	26
2.6 Moringa oleífera	27
2.6.1 Semillas de Moringa oleífera: propiedades y usos	28
2.7 Reportes con semillas de Moringa oleífera en la clarificación de aguas	30
2.7.1 Aguas con turbidez sintética	31
2.7.2 Aguas superficiales	31
2.7.3 Aguas residuales	33
2.8 Efecto de las variables agroclimáticas sobre la composición química de especies vegetales	34
3. JUSTIFICACIÓN	38
4. HIPÓTESIS	38
5. OBJETIVOS	39
5.1 General	39
5.2 Específicos	39
6. MATERIALES Y MÉTODOS	40
6.1 Ubicación de las zonas de estudio	40

6.2 Evaluación de las condiciones agroclimáticas de las zonas de estudio.....	41
6.2.1 Clima	41
6.2.2 Análisis de suelos.....	42
6.3 Preparación del material biológico.....	46
6.4 Análisis proximal de las semillas de moringa.....	47
6.4.1 Humedad.....	47
6.4.2 Cenizas.....	47
6.4.3 Fibra cruda	47
6.4.4 Lípidos totales.....	48
6.4.5 Proteína cruda.....	48
6.4.6 Carbohidratos totales.....	48
6.5 Extracción de aceite de semillas de moringa.....	49
6.6 Obtención de muestras de aguas residual de una UPA	50
6.7 Evaluación del efecto coagulante de semillas de moringa	50
6.8 Análisis estadístico	53
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
7.1 Características agroclimáticas de las zonas de estudio.....	55
7.1.1 Análisis comparativo de los climas.....	55
7.1.2 Características de los suelos	55
7.2 Caracterización de las semillas de moringa.....	56
7.3 Extracción de aceite (pruebas preliminares).....	60
7.4 Efecto coagulante de semillas de moringa	63
7.4.1 Turbidez	64
7.4.2 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).....	66
7.4.3 Sólidos totales	68
7.4.4 Dureza	69
7.4.5 pH y conductividad.....	70
8. CONCLUSIONES.....	73
9. LITERATURA CITADA.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Mecanismos de coagulación y floculación	20
Tabla 2. Clasificación del agua según su comportamiento en la coagulación	241
Tabla 3. Principales coagulantes utilizados en la clarificación de aguas	24
Tabla 4. Métodos para el análisis de suelos	42
Tabla 5. Valores de las variables climatológicas en ambas zonas de cultivo.....	55
Tabla 6. Características del suelo en ambas zonas de cultivo	56
Tabla 7. Análisis proximal de semillas de moringacosechadas en abas zonas de estudio	57
Tabla 8. Comparación del análisis proximal de semillas de moringa en diferentes países	579
Tabla 9 . Rendimiento de extracción de aceite con diferentes solventes a una relación masa/volumen de solvente y tiempo constante	681
Tabla 10. Rendimiento de extracción de aceite con n-hexano a diferentes relaciones de masa/volumen de solvente	61
Tabla 11. Rendimiento de extracción de aceite con 1 g/25 ml de n-hexano a diferentes tiempos	62
Tabla 12. Comparación de tratamientos fisicoquímicos en distintos tipos de agua	64
Tabla 13. Turbidez inicial, final y porcentaje de su remoción.....	65
Tabla 14. DBO inicial, final y porcentaje de su remoción.....	67
Tabla 15. Sólidos totales iniciales, finales y porcentaje de su remoción	68
Tabla 16. Dureza inicial, final y porcentaje de su remoción	70
Tabla 17. pH al inicio y al final del tratamiento con moringa	70
Tabla 18. Conductividad inicial, final y porcentaje de su remoción	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1. Disposición típica de una planta convencional de tratamiento de aguas residuales	186
Figura 2. Representación de la distribución de cargas y potenciales asociados con las partículas coloidales	18
Figura 3. Coagulación y floculación de una suspensión coloidal al agregar un coagulante-floculante natural posterior a su mezcla, con la deposición posterior de la red a flocular	22
Figura 4. Equipo para ensayo de jarras	285
Figura 5. Lugar de origen de <i>Moringa oleífera</i> en la región norte de la India	28
Figura 6. Semillas de <i>Moringa oleífera</i>	28
Figura 7. Mapa del estado de Veracruz.....	40
Figura 8. Ubicación de la zona 1 de estudio en Veracruz.....	41
Figura 9. Ubicación de la zona 2 de estudio en Manlio Fabio Altamirano.	41
Figura 10. Equipo para extracción de grasas tipo Goldfisch	50
Figura 11. Corridas experimentales en el equipo de ensayo de jarras.....	51
Figura 12. Agua residual acuícola a) antes del tratamiento; b) después del tratamiento con moringa	65
Figura 13. Remoción de los parámetros estudiados para las semillas de ambas zonas de estudio.....	72

1. INTRODUCCIÓN

Recientemente, México ha ocupado a nivel mundial el lugar vigésimo cuarto en producción acuícola (CONAPESCA, 2018), representando una fuente de ingresos y medio de subsistencia para millones de personas. En el territorio nacional la producción acuícola se concentra en Sonora, Sinaloa, Veracruz, Tabasco, Jalisco, Estado de México y Nayarit, y se han identificado un gran número de unidades de producción acuícola en Michoacán, Guerrero, Yucatán, Guanajuato, Hidalgo, Morelos y Puebla (Velasco *et al.*, 2012).

Cabe mencionar que, en México, el desarrollo de la acuicultura está enmarcado en la Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentable, la cual establece los principios para ordenar, fomentar y regular el manejo integral y aprovechamiento sustentable de la actividad (CONAPESCA, 2015). Adicionalmente y debido a la preocupación por las descargas de las aguas residuales y sus efectos al medio ambiente, dicha actividad está sujeta a otras regulaciones de carácter federal contenidas en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente, Ley de Aguas Nacionales, Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales y la Ley Federal de Derechos, que establecen la obligación de contar con una evaluación del impacto ambiental previa a la realización del proyecto, concesión de uso de agua y con obras de tratamiento previas a la descarga de agua para evitar la contaminación de cuerpos de aguas receptores (de la Peña *et al.*, 2013). La norma oficial NOM-001-SEMARNAT-1996, establece los límites máximos permisibles que deben cubrir los efluentes antes de ser vertidos a cuerpos de agua naturales (Velasco *et al.*, 2012).

La acuicultura al igual que otras actividades de producción animal genera residuos sólidos y líquidos contenidos en las aguas de descarga de los sistemas productivos, siendo estas comúnmente retornadas al medio natural sin previo tratamiento. Es notorio que, con el incremento de la producción piscícola, esta actividad se ha convertido en una industria generadora de grandes volúmenes de efluentes residuales y, por ende, de mayor impacto ambiental (Pardo *et al.*, 2006). La

producción acuícola, como cualquier otra producción de organismos vivos, incluye en dichos efluentes la liberación de excretas, restos de alimento y medicamentos (Iturbide, 2008).

En muy pocos trabajos de investigación, se han propuesto alternativas para mejorar la calidad de aguas residuales de Unidades de Producción Acuícolas (UPA). En la mayoría de los casos para este tipo de sitios, diversos elementos y constituyentes (del alimento no consumido) son incorporados al medio receptor, generando problemas como la disminución en la concentración de oxígeno disuelto (OD) y el aumento en la concentración de sólidos en suspensión (SST), en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), y formas variadas de nitrógeno y fósforo, provocando así el crecimiento exagerado de algas, eutrofización, y la subsecuente alteración en la calidad del agua en cuerpos receptores (Raffo y Ruíz, 2014; Lezama *et al.*, 2010; Iturbide, 2008).

Hoy en día las plantas de potabilización de agua y de tratamiento de aguas residuales, utilizan la combinación de la coagulación y floculación seguida por la sedimentación o la filtración (métodos ampliamente utilizados para remover partículas y una porción considerable de materia orgánica), empleando coagulantes inorgánicos como el Sulfato de Aluminio y el Policloruro de Aluminio, para remover turbidez, sólidos en todas sus formas y color (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

El sulfato de aluminio o alumbre es el coagulante químico utilizado en la mayoría de las plantas de tratamiento debido a su alta efectividad. Sin embargo, algunos autores (Lédo *et al.*, 2009, Rodríguez *et al.*, 2012, Sandoval y Laines, 2013) han reportado que sus residuos están asociados a enfermedades neurológicas, tales como el Alzheimer, síndromes de demencia y disminución de la capacidad motora y mental. Rodríguez *et al.* (2012) mencionan que el uso de estos coagulantes se convierte en una limitante para los países en desarrollo debido a su costo, así como también que estos generan problemas por su alto contenido de aluminio residual y los lodos generados durante el proceso, debido a su disposición final.

En este contexto, actualmente existe una tendencia al aumento en el uso de coagulantes naturales en diversas partes del mundo debido a que se consideran renovables. Dentro de los coagulantes naturales que se han reportado hasta el momento, se encuentran las especies vegetales *Opuntia* spp. y *Aloe vera*, de las cuales se aprovecha el mucílago, así como las semillas de *Moringa oleifera*, siendo esta última cada vez más utilizada en diversas partes del mundo, principalmente en vías de desarrollo (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

Es evidente también la necesidad de ampliar la información al respecto sobre el uso de las semillas de *Moringa oleifera* en nuestro país, ya que se han encontrado escasos reportes científicos sobre su uso para el tratamiento de aguas residuales. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto clarificante de aguas residuales de la industria acuícola utilizando semillas de *Moringa oleifera*, permitiendo continuar con la búsqueda e implementación de alternativas naturales y eficientes en el tratamiento de aguas.

2. ANTECEDENTES

2.1 Aguas residuales

Las aguas residuales se pueden definir como aquellas que, por su previo uso, representan un peligro y deben ser desechadas, ya que contienen gran cantidad de sustancias y/o microorganismos. Dentro de este grupo se incluyen aguas con diversos orígenes (Muñoz, 2008):

2.1.1 Aguas residuales domésticas o aguas negras

Proceden de las heces y orina humana, del aseo personal y de la cocina y de la limpieza de la casa. Suelen contener gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, así como restos de detergentes, almidones, ácidos, sales y grasas.

2.1.2 Aguas blancas

Pueden ser de procedencia atmosférica (lluvia, nieve o hielo) o del riego y limpieza de calles, parques y lugares públicos. En aquellos lugares en que las precipitaciones atmosféricas son muy abundantes, estas pueden evacuarse por separado para que no saturen los sistemas de depuración.

2.1.3 Aguas residuales industriales

Proceden de los procesamientos realizados en fábricas y establecimientos industriales y contienen aceites, detergentes, antibióticos, ácidos y grasas y otros productos y subproductos de origen mineral, químico, vegetal o animal. Su composición es muy variable, dependiendo de las diferentes actividades industriales.

2.1.4 Aguas residuales agrícolas

Procedentes de las labores agrícolas en las zonas rurales. Estas aguas suelen participar, en cuanto a su origen, de las aguas urbanas que se utilizan, en numerosos lugares, para riego agrícola con o sin un tratamiento previo.

2.2 Problemática de las aguas residuales

Además de los problemas ecológicos y sanitarios, el vertido de aguas residuales a los ríos, lagos y mares produce otro tipo de contaminación llamada psicosocial, ya que afecta al entorno natural del hombre, modificando la estética de su paisaje, generando la desaparición de la vegetación, peces y demás animales acuáticos. Por otra parte, la descarga directa a cuerpos de agua, limita el recurso para los diferentes usos productivos como el riego o la pesca artesanal, el consumo (agua potable) y la recreación (Núñez, 2015; de la Peña *et. al*, 2013).

La eutrofización es un proceso que se puede dar de forma natural, pero que puede estar también provocado por la acción del hombre, mediante vertidos ricos en fósforo y nitrógeno. Estos compuestos se encuentran, principalmente, en las excretas y los detergentes, aunque también puede haber contribución de la escorrentía agrícola, dificultando los tratamientos y restringiendo así, la utilización de estas aguas (Núñez, 2015).

Otra problemática asociada es la contaminación de las aguas subterráneas, muy difícil de detectar y casi imposible de eliminar, puesto que, si se detecta, el grado de contaminación normalmente ya ha alcanzado grandes dimensiones y suele ser demasiado tarde para actuar. Esta se produce por la infiltración de los residuos líquidos o sólidos resultantes de la actividad humana, que portan sustancias y microorganismos en aquellos terrenos que son permeables. También se puede producir por sobreexplotación de acuíferos, cuando se encuentran próximos al mar, dando como resultado la salinización de estos (Núñez, 2015; Muñoz, 2008).

2.3 Tratamiento de aguas residuales

El término tratamiento de aguas es el conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuya finalidad es la eliminación o reducción de la contaminación, así como la eliminación de las características no deseables de las aguas residuales (Muñoz, 2008). Los diferentes procesos unitarios suceden para el

tratamiento de corrientes de desecho líquido y sólido. Los pasos involucrados en el tratamiento convencional de aguas residuales son: 1) pretratamiento, 2) tratamiento primario, 3) tratamiento secundario (o biológico), 4) tratamiento terciario para remover nutrientes (N, P) y 5) desinfección (Figura 1).

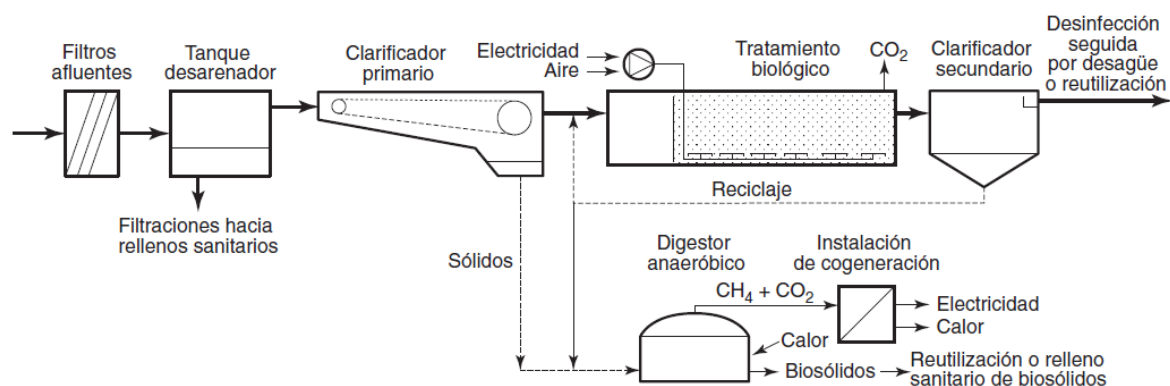


Figura 1. Disposición típica de una planta convencional de tratamiento de aguas residuales. Fuente: Mihelcic y Zimmerman (2012).

2.3.1 Procesos físicos

Los procesos físicos de tratamiento de aguas residuales son todos aquellos en los que se emplean las fuerzas físicas en las diversas etapas del proceso. En términos generales, las operaciones físicas se emplean durante todo el proceso del tratamiento de las aguas residuales, aunque algunas son casi exclusivamente operaciones del pretratamiento y el tratamiento primario.

Dentro de los principales procesos físicos destacan los siguientes:

- Desbaste o cribado
- Desarenado
- Evaporación
- Mezclado

- Filtración
- Coagulación
- Floculación

El tratamiento de las aguas residuales es un proceso complejo, debido a que exige un importante esfuerzo para la selección de las etapas de la depuración, tales como la caracterización de las aguas residuales. Esto último se logra a partir de diversas mediciones físicas, químicas y biológicas, entre las cuales destacan el contenido de sólidos (totales, suspendidos, disueltos, etc.), la turbidez, la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno y el pH (Mihelcic y Zimmerman, 2012; Muñoz, 2008; Davis y Masten, 2005).

Para remover y disminuir las cargas orgánicas que poseen las aguas residuales se han empleado diferentes tipos de tratamientos fisicoquímicos y bacteriológicos. Entre los procesos fisicoquímicos que se han empleado comúnmente se encuentran: flotación por aire disuelto (para la remoción de sólidos suspendidos y grasas), coagulación y floculación, estos últimos ampliamente utilizados para remover sólidos suspendidos y coloidales. Los procesos fisicoquímicos coagulación y floculación son parte del objeto de estudio del presente trabajo de investigación. Éstos se utilizan para la remoción de partículas suspendidas y coloidales, siendo su parámetro operacional más importantes la turbidez o la absorbancia, que mide de manera indirecta la concentración de partículas (Morales *et al.*, 2009).

2.3.1.1 Coagulación y floculación

La coagulación es un paso de neutralización de carga que involucra el acondicionamiento de la materia suspendida, coloidal y disuelta al añadir coagulantes. La floculación involucra la agregación de partículas desestabilizadas y la formación de partículas más grandes conocidas como flóculos (Mihelcic y Zimmerman, 2012; Muñoz, 2008; Davis y Masten, 2005).

La carga de la superficie es la contribución primaria para la estabilidad de las partículas. Las partículas estables son propensas a permanecer suspendidas en

solución (medidas como turbidez). Los coloides suspendidos y las partículas finas son relativamente estables y no pueden flocular y asentarse en un periodo razonable. La estabilidad de las partículas en aguas residuales principalmente depende del balance de las fuerzas de repulsión y de atracción entre las partículas.

La mayoría de las partículas en las aguas naturales tienen carga negativa, y existe una fuerza electrostática repulsiva entre las partículas de la misma carga. Al contrarrestar estas fuerzas de repulsión se encuentran las fuerzas de atracción entre las partículas conocidas como fuerzas de Van der Waals (Mihelcic y Zimmerman, 2012). La energía potencial de las fuerzas de repulsión electrostáticas y las fuerzas de atracción de Van der Waals combinadas están relacionadas con la distancia entre dos partículas (Figura 2).

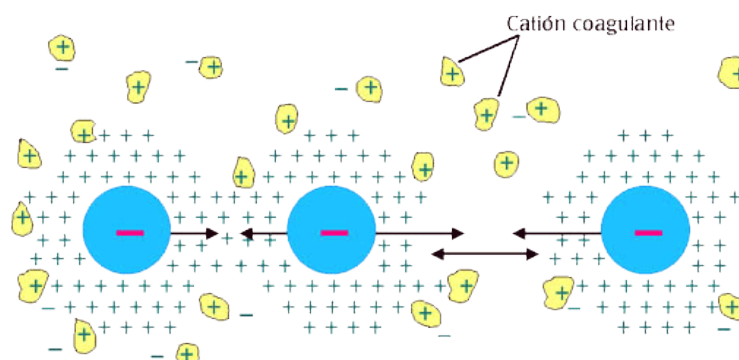


Figura 2. Representación de la distribución de cargas y potenciales asociados con las partículas coloidales. Tomada de: <http://apuntescientificos.org/preparacion-colo-qbp.html>

Debido a que la fuerza de atracción neta es muy débil en distancias grandes, la floculación generalmente no sucederá. A distancias muy cortas, existe una barrera de energía, y la cinética que sale del movimiento browniano de las partículas no es lo suficientemente alta como para vencer la barrera de energía. Después de que se añade un coagulante, las fuerzas de repulsión se reducen, las partículas se unirán

y ocurrirá la floculación rápida. En la Tabla 1 se muestra un resumen sobre los mecanismos de coagulación y floculación (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

2.3.1.2 Factores que influyen en el proceso de coagulación y floculación

De acuerdo con Mihelcic y Zimmerman (2012) y Muñoz (2008), existen diversos factores que influyen en los procesos de coagulación y floculación, dentro de los cuales se mencionan los siguientes:

Tipo de coagulante. Aunque existe cierta relación entre la turbidez del agua y la dosis del coagulante apropiado, la cantidad exacta sólo puede ser determinada mediante ensayos (Prueba de jarras y electroforesis). Aun así, la cantidad puede variar con otros factores, como el tiempo de mezcla y la temperatura del agua.

Características del agua, pH. Es importante mencionar que las partículas suspendidas muy finas son más difíciles de coagular que las partículas más grandes, y éstas necesitan mayor cantidad de coagulante. Existe para cada coagulante una zona de pH óptimo (generalmente la neutralidad), donde se produce una buena floculación en plazo corto y con una dosis dada de coagulante. La coagulación debe efectuarse dentro de esta zona óptima siempre que sea posible. Cuando se deja de operar en la zona óptima para cualquier agua, se puede generar un desperdicio de productos químicos y un descenso del rendimiento en la eficacia de la planta de tratamientos de aguas residuales.

El rango de pH para la región operativa del Sulfato de Aluminio es de 5.5 a 7.7 y para las sales de hierro es de 5 a 8.5. Cuando las sustancias coagulantes son agregadas al agua residual, dentro del pH de coagulación óptima, se produce una hidrolización con la formación de hidróxidos coloidales insolubles que adsorben las partículas coloidales favoreciendo la precipitación. En la Tabla 2 se muestra la clasificación del agua según su comportamiento en la coagulación.

Tabla 1. Mecanismos de coagulación y floculación

Compresión de la doble carga eléctrica	La mayoría de las partículas en el agua tienen carga negativa. La doble capa eléctrica consiste de una capa de cationes unida con la superficie de la partícula y un conjunto difuso de cationes y aniones en la solución. Cuando la fuerza iónica se incrementa, la doble capa eléctrica se minimiza (las fuerzas de repulsión se reducen).
Neutralización de carga	Debido a que la mayoría de las partículas que se encuentran en las aguas naturales tienen carga negativa en pH neutro, pueden desestabilizarse mediante adsorción o cationes con carga positiva o polímeros como sales metálicas hidrolizadas y polímeros orgánicos catiónicos. La dosis (en mg/L) de dichas sales o polímeros es crítica para procesos de floculación subsecuentes. Con la dosis apropiada, la carga será neutralizada y las partículas se unirán. Sin embargo, si la dosis es muy alta, las partículas, en vez de neutralizarse, adquirirán una carga positiva y se volverán nuevamente estables.
Adsorción y puenteo entre partículas	Con la adición de polímeros no iónicos y polímeros de cadena grande con carga baja de superficie, una partícula puede ser adsorbida en la cadena, y el resto del polímero puede adsorberse en sitios de la superficie de otras partículas disponibles. Si se añade demasiado polímero, las partículas se enredarán en una matriz de polímero y no flocularán.
Precipitación y enredo	El enredo (flóculo barrido) sucede cuando una dosis suficientemente alta de aluminio (y sales de hierro) se añade y forman varios polímeros hídricos que se precipitarán de la solución. A medida que el precipitado amorfo se forma, la materia de partículas es atrapada dentro del flóculo y se barre del agua con el flóculo estabilizante. Este mecanismo predomina en las aplicaciones de tratamiento de agua en donde el aluminio o las sales de hierro se usan a altas concentraciones y el pH se mantiene casi neutral.

Fuente: Adaptado de Mihelcic y Zimmerman, 2012

Tabla 2. Clasificación del agua según su comportamiento en la coagulación

Tipo de agua	Tipo de coagulación	Requerimiento
Baja concentración de coloides, baja alcalinidad	Formación de precipitado. Floculación de barrido	Altas dosis de coagulantes. Adición de alcalinidad o partículas o ambas
Baja concentración de coloides, alta alcalinidad	Formación de precipitado. Floculación de barrido	Alta dosis de coagulantes. Adición de partículas
Alta concentración de coloides, baja alcalinidad	Adsorción de polímeros metálicos positivos, en la superficie de los coloides. (pH 4 a 7)	Dosis de coagulantes incrementa con concentración de partículas, adición de alcalinidad
Alta concentración de coloides, alta alcalinidad	Adsorción de polímeros metálicos positivos y precipitaciones de hidróxidos (pH>7)	Dosis de coagulante incrementa con concentración de partículas

Fuente: Ramírez y Jaramillo (2015)

Tiempo de mezcla y floculación. Al conjunto se le denomina “periodo de coagulación” y se define como el tiempo transcurrido entre la adición del coagulante al agua y el final de la agitación a una velocidad que impida la decantación de las partículas floculadas. Antes de la entrada al decantador puede estimarse en la mayoría de los casos entre los diez y los treinta minutos.

Efecto de la temperatura del agua. La influencia principal de la temperatura en la coagulación es su efecto sobre el tiempo requerido para una buena formación de flóculos. Generalmente, cuanto más fría esté el agua, más largo será el tiempo requerido para producir buenos flóculos con una cantidad determinada de coagulante.

Fuerza de la agitación. Se ha comprobado que a velocidades lentas, se mejora la formación de flóculos en los tanques de coagulación.

Presencia de núcleos. Las partículas sólidas en una suspensión actúan como núcleos para la formación inicial de flóculos. Es un hecho bien conocido que el agua que contiene poca turbidez coloidal es, frecuentemente, de floculación más difícil. La Figura 3 muestra cómo se lleva a cabo el efecto de coagulación y floculación.



Figura 3. Coagulación y floculación de una suspensión coloidal al agregar un coagulante-floculante natural posterior a su mezcla, con la deposición posterior de la red a flocular.
Fuente: Ramírez y Jaramillo (2015)

2.4 Características de los coagulantes

Según con lo descrito por Mihelcic y Zimmerman (2012) y Muñoz (2008), los coagulantes deben tener las siguientes características:

1. Carga opuesta al coloide. Los coagulantes deben tener la carga eléctrica opuesta al coloide, con la finalidad de que al agregar a la solución coloidal las cargas opuestas, las fuerzas electrostáticas puedan ser neutralizadas. A

veces el reactivo coagulante no consigue el objetivo deseado, por lo cual es preciso introducir otros compuestos denominados coadyuvantes.

Los coadyuvantes de coagulantes y floculantes son sustancias que mejoran los procesos de coagulación y floculación. Son típicamente materiales de partículas insolubles como arcilla, diatomita, carbono activado en polvo o arena fina, que forman sitios nucleantes para la formación de flóculos más grandes. Además, se utilizan en conjunto con los coagulantes primarios. Los coadyuvantes como los polímeros aniónicos y no iónicos se utilizan para reforzar los flóculos. Se añaden después de la adición de coagulantes y la desestabilización de las partículas. (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

2. Ser lo más “fuertes” en carga (valencia). Para que el rompimiento de la estabilidad coloidal sea lo más rápida posible.
3. Ser productos no muy costosos en el mercado. Que sean productos accesibles (sobre todo en países en vías de desarrollo).
4. Ser muy pesados. Para que los flóculos formados puedan separarse lo más rápidamente posible, por precipitación.

2.5 Tipos de coagulantes

Un coagulante es el compuesto, mezcla de compuestos o sustancia natural que se añade para desestabilizar partículas y lograr la coagulación. La selección del coagulante apropiado depende de ciertas características tales como la característica del coagulante, temperatura del agua, calidad del agua, costo y disponibilidad, etc. (Mihelcic y Zimmerman, 2012; Léo *et. al*, 2009; Núñez, 2007).

Pueden distinguirse dos grandes grupos: inorgánicos y orgánicos, y dentro de los últimos, los de origen natural (considerados algunas veces no como coagulantes propiamente dichos, sino como auxiliares de la coagulación o coadyuvantes), y finalmente los sintéticos. En la Tabla 3 se mencionan algunos coagulantes utilizados con frecuencia en la clarificación de aguas residuales.

Tabla 3. Principales coagulantes utilizados en la clarificación de aguas

Tipo de coagulante	Ejemplos
Metálicos inorgánicos	Sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, Cloruro de aluminio (AlCl_3), Sulfato ferroso ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) y Cloruro férrico (FeCl_3).
Sales metálicas pre-hidrolizadas	Hechas de alumbre y sales de hierro e hidróxido bajo condiciones controladas; incluye el cloruro de polialuminio (PACl), sulfato de polialuminio (PAS).
Polímeros orgánicos	Polímeros catiónicos, polímeros aniónicos y polímeros no iónicos (para polímeros sintéticos, peso molecular en el rango de 104–107 g/mol).
Coagulantes naturales (materiales naturales basados en plantas)	<i>Opuntia</i> spp., <i>Aloe vera</i> y <i>Moringa oleifera</i> (utilizada en muchas partes del mundo, especialmente en países en desarrollo).

Fuente: Adaptado de Mihelcic y Zimmerman, 2012

El ensayo de jarras (*Jar-Test*) se utiliza ampliamente para determinar el tipo de coagulante y la dosis apropiada del mismo. En la Figura 4 se muestra un equipo de ensayo de jarras, el cual consta de reactores discontinuos, cada uno equipado con una paleta mezcladora que puede girar a velocidades variables.

En un ensayo de jarras, las adiciones por lote de varios tipos y distintas dosis de coagulantes se añaden a la muestra de agua. Esta etapa es seguida por una etapa de mezcla lenta para mejorar la formación de flóculos. Posteriormente a las muestras se les permite asentarse bajo condiciones sin disturbios y la turbidez del flotante asentado se mide y se traza como una función de dosis coagulante para determinar la dosis coagulante apropiada (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

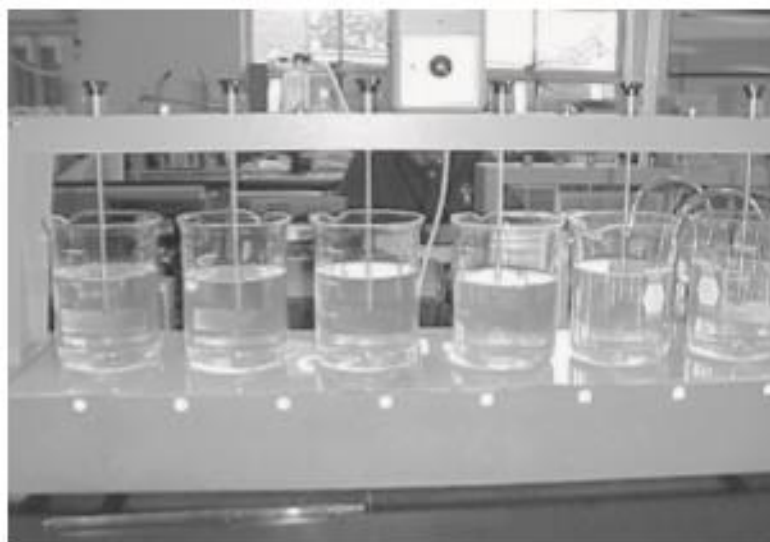


Figura 4. Equipo para ensayo de jarras. Fuente: Adaptado de Mihelcic y Zimmerman, 2012

2.5.1 Coagulantes orgánicos

Los polímeros orgánicos de origen natural se han utilizado por más de 4000 años en India, en África y en China como coagulantes o como coadyuvantes en la coagulación de aguas con alta turbidez, para uso doméstico en áreas rurales. Como alternativa a los coagulantes químicos tradicionales, al inicio de los años setenta en varios países latinoamericanos se propuso utilizar coagulantes naturales extraídos de especies vegetales o animales para disminuir en parte o en su totalidad el consumo de coagulantes sintéticos. Esta iniciativa no tuvo un auge significativo debido a la producción y comercialización de polímeros sintéticos con mayor efectividad. No obstante, son muy diversas las fuentes naturales estudiadas en todo el mundo, con la intención ser utilizadas como coagulantes, para la clarificación del agua (Ramírez y Jaramillo, 2015).

2.5.2 Coagulantes naturales empleados en el tratamiento de aguas

Los coagulantes naturales son sustancias solubles en agua, procedentes de materiales de origen vegetal o animal que actúan de modo similar a los coagulantes y desinfectantes sintéticos, aglomerando las partículas en suspensión que contiene el agua cruda, facilitando su sedimentación y reduciendo la turbidez inicial de esta. Algunos coagulantes poseen además propiedades antimicrobianas y son considerados ambientalmente seguros en comparación con los coagulantes químicos orgánicos e inorgánicos debido a su biodegradabilidad. La mayoría de los coagulantes naturales son extractos de semillas, de hojas, de cortezas o savia, de raíces y de frutas, extraídos de árboles y plantas (Ramírez y Jaramillo, 2015).

Aunque se han reportado diversos coagulantes de origen vegetal, solamente algunos han sido de mayor interés en la comunidad científica, como ejemplo tenemos a las semillas de Nirmali (*Strychnos potatorum*), semillas de *Moringa oleífera* y el mucílago de *Opuntia ssp.* (Ramírez y Jaramillo, 2015).

Se ha demostrado también que en diversas regiones del mundo se han empleado plantas nativas, como los granos tostados de maíz (*Zea mays*) o savia del cactus (*Opuntia ficus indica*). Estos coagulantes naturales, se usan para reducir la turbidez y los microorganismos en aguas, para su ablandamiento y para el acondicionamiento de lodos (Guzmán *et al.*, 2013).

En una revisión realizada por Guzmán *et al.* (2013) se describen algunos estudios realizados con coagulantes extraídos de plantas, como el árbol de nirmali (*S. potatorum*), de tamarindo (*Tamerindous indica*), de goma guar (*Cyamopsis psoraloides*), de red sorella (*Hibiscus sabdariffa*), de fenugreco o alholva (*Trigonella foenum*) y de lentejas (*Lens esculenta*), usando agua cruda (sin tratar) con turbidez en los rangos de 50 a 750 NTU, así como de la actividad coagulante de extractos de semillas del frijol (*Phaseolus vulgaris*), utilizando soluciones salinas como medio de extracción, a diferentes concentraciones.

Asimismo, hoy en día se han encontrado reportes en la literatura científica sobre la evaluación del efecto coagulante de las semillas de *Moringa oleifera*, en diversas aguas con diferentes niveles de turbidez, provenientes de cuerpos de aguas naturales (aguas superficiales), aguas residuales de diversos tipos de industria y aguas con turbidez sintética (aquellas a las que se les ha suministrado un espesante como caolín, en condiciones de laboratorio), como se describirá más adelante.

2.6 *Moringa oleifera*

Moringa oleifera, conocido comúnmente como “marango” o “moringa”, pertenece a la familia Moringaceae. Es un árbol nativo del norte de la India (Figura 5) que crece bien en los trópicos. En África la introducción data desde hace más de 1,000 años y se encuentra ampliamente distribuida en los países de la costa de África, en Australia, en Arabia y en el Caribe; también ha sido introducida en general en América Latina y Centroamérica donde se conoce con distintos nombres y naturalizada en los años 20 como árbol ornamental (Parrotta, 1993).

Es un árbol deciduo de rápido crecimiento y usualmente alcanza de 10 a 12 m de alto. Se valora por sus frutas, flores, raíces (todas comestibles) y por el aceite de su semilla usado principalmente como tratamiento para purificar las aguas. En Centroamérica se lo conoce como “Marango”, “Paraíso” o “Paraíso Blanco” y se encuentra en zonas con temperaturas de 6 a 38 °C. Es resistente al frío por corto tiempo, pero no a menos de 2 a 3 °C. En temperaturas menores de 14 °C no florece y solo se puede reproducir por reproducción vegetativa (estacas). Se localiza desde el nivel del mar hasta 1,800 metros sobre nivel del mar y se puede plantar en sitios con precipitaciones de 500 a 1,500 milímetros anuales. No obstante, se desarrolla mejor en la época seca (García *et al.*, 2012).

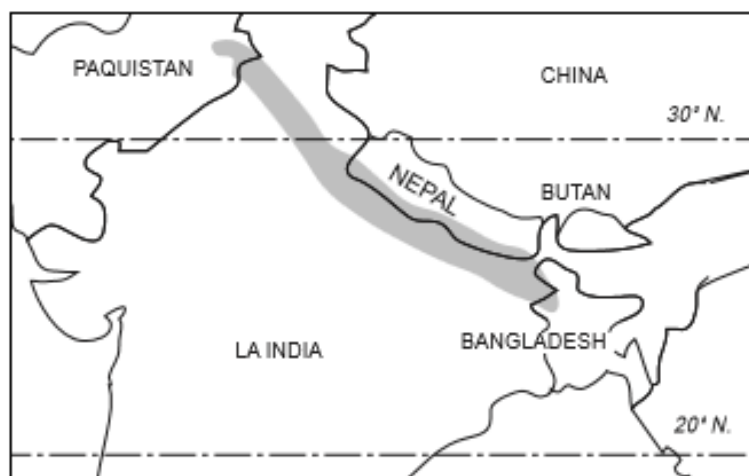


Figura 5. Lugar de origen de *Moringa oleifera* en la región norte de la India.

2.6.1 Semillas de *Moringa oleífera*: propiedades y usos

Las semillas de *Moringa oleifera* son de color pardo oscuro, globulares y de aproximadamente 1 cm de diámetro, con tres alas y consistencia papirácea (Figura 6). Aparentemente existen variaciones en los pesos de las semillas de acuerdo a la variedad, desde 3,000 a 9,000 semillas por kilogramo (Parrotta, 1993).



Figura 6. Semillas de *Moringa oleífera*.

Son consumidas principalmente en países en vías de desarrollo en sopas o tostadas como suplemento proteínico (contienen hasta un 60% de proteína y entre el 32 y el 40% de aceite). También para la alimentación de ganado vacuno y ovino pueden ser un elemento esencial en temporadas secas. El aceite que producen las semillas también es comestible e incluso se le ha comparado con el aceite de oliva por su elevada calidad (Olson y Fahey, 2011). Este aceite puede a su vez aprovecharse como lubricante en la industria de maquinarias y relojes, así como en la elaboración de pinturas textiles, de pulpas y jugos, y en la industria cervecera para la sedimentación de levaduras, eliminando su turbidez (Núñez, 2007).

De estas semillas se extrae un coagulante natural que sirve perfectamente en la purificación de agua potable y para la sedimentación de partículas minerales orgánicas en aguas residuales (Núñez, 2007). Este coagulante activo ha sido caracterizado como un péptido catiónico de peso molecular aproximado a 13 kDa y punto isoelectrico a pH 10 (Martín *et al.*, 2013). Se considera que este péptido puede ser una alternativa viable para reemplazar parcial o completamente a los productos químicos utilizados en el tratamiento de aguas como el sulfato de aluminio y cloruro de hierro. Además, se ha reportado que disminuye la acumulación de aluminio en los lodos residuales y abarata los costos en el tratamiento de aguas (Rodríguez *et al.*, 2012).

Los péptidos naturales anteriormente mencionados, actúan como los polímeros sintéticos utilizados industrialmente para el tratamiento de aguas. Al ser agregados a aguas no tratadas éstos se adhieren a las partículas coloidales con cargas negativas en suspensión, las neutralizan y las aglutinan, favoreciendo su posterior remoción mediante sedimentación o filtración (Folkard y Sutherland, 1996; Núñez, 2007).

Las propiedades clarificantes de la semilla de moringa fueron descubiertas y utilizadas por vez primera en China por mujeres de escasos recursos, quienes al buscar agua para beber descubrieron que las semillas de cierto árbol, tenían el don

de arrastrar la suciedad del agua hasta el fondo de la vasija donde la almacenaban y aquél lodo no volvía a la superficie, dejando el agua limpia y clara. Desde ese entonces esta planta y sus propiedades se ha dispersado no sólo en Asia sino en otras regiones, adaptándose muy bien a los trópicos (Lédo *et al.*, 2009). Sin embargo, se dice que el efecto clarificante ya era conocido también por las mujeres rurales de Sudán y eran utilizadas para tratar aguas con alta turbidez provenientes del río Nilo, por lo que es considerada altamente competitiva en la clarificación de aguas al comparar su efecto con el de los coagulantes metálicos actuales (Sandoval y Laines, 2013).

De acuerdo a Núñez (2007) algunas de las ventajas que presenta el uso de la moringa como coagulante natural son:

- No tiene ninguna influencia en los niveles de pH.
- La alcalinidad natural del agua no se ve afectada.
- La producción de lodo se reduce y se puede convertir en un acondicionador en los suelos al carecer de residuos de metales.

2.7 Reportes con semillas de *Moringa oleifera* en la clarificación de aguas

Las propiedades coagulantes de las semillas de moringa anteriormente mencionadas han sido utilizadas en proyectos comunitarios para mejorar la calidad del agua para consumo en varios países en desarrollo durante los últimos años, incluso en plantas potabilizadoras en Malawi, en el sureste de África, se ha logrado reducir la turbidez del agua de 380 Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT) hasta 4 UNT (Núñez, 2007). A continuación, se describen algunos trabajos realizados para la clarificación de aguas con turbidez sintética, superficiales y residuales.

2.7.1 Aguas con turbidez sintética

Hoy en día existen investigaciones realizadas con aguas con turbidez sintética, donde esta ha sido manipulada agregando caolín a la misma (Mendoza *et al.*, 2000; Caldera *et al.*, 2007; Yarahmadi *et al.* 2009). Estas investigaciones han evaluado la eficiencia de las semillas de *M. oleifera* en muestras de agua con amplios rangos de turbidez desde 10 y hasta 10,000 NTU y con valores de pH desde 4 hasta 8. En su mayoría, estos trabajos han servido para confirmar las propiedades coagulantes de las semillas de *Moringa oleifera*, constituyendo una alternativa para la potabilización de aguas.

Asimismo, un estudio realizado por García *et al.*, (2012), se enfocó en el potencial de la utilización de los bioadsorbentes obtenidos a partir de moringa en la descontaminación de aguas con turbidez sintética con elevada concentración de metales pesados (Níquel, Cobre y Cadmio), alcanzando porcentajes de remoción de hasta el 96% de dichos metales.

2.7.2 Aguas superficiales

En un primer trabajo aplicado a aguas superficiales, Olayemi y Alabi (1994) caracterizaron el extracto de la semilla y lo utilizaron para la clarificación del agua del río Asa. Ellos evaluaron el efecto antimicrobiano, además de comparar dicho extracto con sulfato de aluminio, encontrando que el efecto coagulante del sulfato de aluminio fue mayor para la clarificación y para disminuir la carga microbiana, en comparación con el uso de moringa, sin embargo, los resultados no fueron drásticamente distantes entre sí.

Por su parte, Núñez (2007) realizó ensayos con cuatro dosis de la semilla de moringa en muestras de agua del Río Neteapa, con tres valores de turbidez (entre 0 – 500 UNT) obteniendo una eficiencia de remoción de hasta el 98%. Concluyeron que con este método se puede tratar agua con turbidez inicial en el rango de 5 a 500 UNT. Adicionalmente, realizaron pruebas con sulfato de aluminio en los mismos rangos de turbidez, obteniendo una eficiencia del 96% con una relación de 70/30 (moringa/alúmina), donde las semillas de moringa sirvieron como coagulante

principal y el sulfato de aluminio como coadyuvante. Con base en los ensayos realizados concluyeron que las semillas producidas en el sur de Honduras pueden ser utilizada en el agua destinada a consumo de hogares de áreas rurales en zonas que presenten problemas de turbidez, ya que su aplicación es eficiente, sencilla y de muy bajo costo.

Lédo *et al.* (2009) realizaron un estudio comparativo de sulfato de aluminio y semillas de moringa para la depuración de aguas del lago Jiqui, las cuales presentaron baja turbidez. Ellos reportaron que las semillas de moringa mostraron una eficiencia de remoción de turbidez ligeramente inferior en comparación con el sulfato de aluminio. Los resultados de este trabajo indicaron una vez más que la utilización de moringa es comparable con la del sulfato de aluminio, pudiendo ser utilizada como coagulante eficaz para la depuración de agua con baja turbidez.

También en 2009, Amagloh y Benang evaluaron el efecto coagulante y la actividad antimicrobiana utilizando muestras de agua de un estanque de Navango, Ghana. Ellos determinaron que las concentraciones utilizadas del extracto de moringa en su trabajo, produjeron un efecto similar al de las concentraciones de sulfato de aluminio, además de disminuir la carga microbiana.

Los últimos dos trabajos realizados con aguas superficiales fueron precisamente en México. En el primero de ellos (Rodríguez *et al.*, 2012) se evaluó el efecto clarificante en aguas superficiales de una laguna de Sonora, México. Se encontró que, al utilizar semillas de moringa como coagulante primario, el porcentaje de remoción de turbidez fue de 88.9%, mientras que al combinar las semillas con el sulfato de aluminio fue de 96.5%, logrando ahorrar un 66% del coagulante químico. El segundo trabajo fue realizado por Sandoval y Laines (2013), quienes compararon el efecto clarificante de las semillas de moringa y el sulfato de aluminio, utilizando agua del río Samaria en Nacajuca, Tabasco, México. Ellos concluyeron que el tratamiento del agua con sulfato de aluminio proporcionó los valores más altos de remoción de turbidez (95.60%), seguido del tratamiento de la solución de moringa

en cloruro de sodio (92.03%). Por otro lado, reportaron que los tratamientos con *Moringa Oleífera* no cambiaron las propiedades químicas del agua tratada.

2.7.3 Aguas residuales

En Thyolo, en la Región Nsanje, en Malawi, una planta de tratamiento controlada por el Ministerio de Obras y el Departamento de Aguas del Gobierno de Malawi, probó la solución de moringa como coagulante a gran escala. El desempeño del tratamiento de moringa fue comparable con el alumbre. La turbidez a un nivel de 270-380 NTU se redujo constantemente a menos de 4 NTU. Esta fue la primera vez que la moringa se utilizó en forma exitosa como coagulante principal en esta escala (Folkard y Sutherland, 1996).

Años más tarde en 2005, Cáceres y Díaz analizaron la propiedad floculante de las semillas utilizando extractos acuosos de las mismas. Lo anterior fue una propuesta de tratamiento de aguas residuales en una Industria química de adhesivos. Evaluando la Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Sólidos Totales, Sólidos Sedimentables, Aceites y Grasas, ellos concluyeron que los mejores resultados fueron obtenidos del tratamiento con semillas a las cuáles les fue removida la grasa en la concentración máxima utilizada en su trabajo (4 g de semilla en 100 ml de agua), recomendando realizar ensayos a escala mayor e incentivar el cultivo de ésta planta.

Por su parte, Morales *et al.* (2009), utilizaron semillas maceradas de moringa, en solución y en suspensión, para reducir la absorbancia generada por las partículas suspendidas en las aguas residuales de un rastro, reportando una reducción de la absorbancia de 25% para agua residual de fosa con menor cantidad de materia orgánica suspendida y de 82% de reducción para agua residual de laguna con mayor cantidad de sólidos suspendidos.

2.8 Efecto de las variables agroclimáticas sobre la composición química de especies vegetales

Revisando el estado del arte en materia de la evaluación del efecto de las variables agroclimáticas sobre la composición química de especies vegetales, podemos destacar el trabajo realizado por Florez (2007), donde se demostró que la temperatura influye en la síntesis de proteínas y aceite en la soja. El abono rico en nitrógeno utilizado en este trabajo, incrementó la producción por aumento en número de semillas y aumentó los niveles de N y NO₃ en tejidos, lo cual conllevó al descenso en el contenido de carbohidratos totales. El autor reportó que a una temperatura promedio de 20 °C se incrementó la cantidad de ácido oleico y disminuyó la de linoleico; además existió una disminución del contenido de ácidos grasos aumentando su grado de saturación.

En el mismo tenor, Ruíz *et al.* (2008) evaluaron la influencia de los factores agroclimáticos en la producción de albahaca (*Ocimum basilicum L.*) Las variables climáticas evaluadas fueron temperatura (T), humedad relativa (HR) y evaporación (E), mientras que las variables biológicas fueron rendimiento, área foliar (AF) e índice de área foliar (IAF), tasa relativa de crecimiento (TRC), tasa de asimilación neta (TAN) y masa seca. Sus resultados demostraron la relación de la temperatura y la humedad relativa con el rendimiento, lo que establece que para el máximo rendimiento de albahaca bajo las condiciones en que se realizaron los experimentos, la temperatura de 32°C y la humedad relativa de 58% fueron las mejores.

Agosta *et al.* (2010) reportaron que la temperatura puede afectar el crecimiento temprano de los brotes de la vid. En su trabajo, la precipitación afectó negativamente el rendimiento por exceso de agua y por el impacto de la destrucción de los viñedos por granizo. Durante los meses más húmedos se redujo el rendimiento de la producción de uvas.

Asímismo, Adrover (2014) evaluó el efecto que ejercen las características agroclimáticas del olivar sobre la calidad del aceite de oliva, concluyendo que los

aceites elaborados con olivares menos lluviosos y de mayor elevación sobre el nivel del mar presentan mayor contenido en compuestos fenólicos totales, mayor capacidad antioxidante y mayor estabilidad frente a la oxidación.

Una aportación más sobre esta temática, es la realizada por Marioli (2016), quién evaluó el efecto de algunas variables ambientales sobre la composición nutricional de la soja, determinando que cuando las temperaturas medias máximas del aire registradas durante el período de llenado de granos fueron menores a 28.3 °C se obtuvieron granos con mayor concentración de aminoácidos totales, menor concentración de rafinosa y de calcio. También se demostró que, cuando las precipitaciones fueron superiores a 380.5 mm y 111.5 mm, se presentó mayor concentración de metionina y mejor relación de proteínas 11S/7S, respectivamente. La concentración de sacarosa y de azúcares totales se incrementó significativamente con temperaturas medias del aire inferiores a 19.4 °C. Así como también las características del suelo tuvieron un efecto significativo principalmente en la concentración de elementos menores en el grano de soja. La concentración de Mo y Cd en suelo se relacionó positivamente con la concentración de Mo y Cd en el grano.

Es importante mencionar en este punto, que los trabajos que han relacionado el efecto de las variables agroclimáticas con la composición y rendimiento de las especies vegetales, han sido realizados mayoritariamente en la última década (de acuerdo con una búsqueda exhaustiva en la literatura científica). Es así, como también se hace notoria la escasez de trabajos sobre esta área que involucren a la especie *Moringa oleífera*.

Uno de los primeros trabajos donde se evaluó la relación entre las variables climáticas y su efecto en la composición química de moringa fue el realizado por Iqbal y Bhanger (2006), quienes reportaron diferencias significativas en la actividad antioxidante de extractos metanólicos de hojas de moringa en función a las temporadas de cosecha y las condiciones agroclimáticas de cinco localidades de

Pakistán. Ellos concluyeron que en los meses de diciembre y marzo se incrementó la actividad antioxidante en las hojas.

Por su parte, Jongrungruangchok *et al.* (2010) evaluaron la composición proximal y los minerales que contenían las hojas de moringa de 11 diferentes regiones agroclimáticas de Tailandia. Ellos demostraron diferencias en los contenidos nutricionales de las hojas. Sin embargo, en esta obra no se discuten las razones de dichas variaciones.

Un año más tarde, Shih *et al.* (2011) evaluaron el efecto que tienen las diferentes temporadas climáticas sobre la composición química y actividad antioxidante de las hojas y tallos de moringa de árboles cultivados en Taiwán, observando que las muestras cosechadas en invierno tenían un mayor contenido de cenizas, calcio y compuestos fenólicos y una actividad antioxidante más fuerte que las muestras cosechadas en verano.

En otro trabajo realizado hace tres años, Barakat y Ghazal (2016), demostraron que existen diferencias significativas en las propiedades fisicoquímicas de semillas de moringa cultivadas en diferentes lugares de Egipto. Sin embargo, los autores no discuten sobre el efecto que tienen las variables agroclimáticas en las diferencias encontradas.

En un trabajo más reciente, Vázquez León *et al.*, (2017) realizaron un estudio en la región de Veracruz, sobre el efecto de las variables agroclimáticas en función de la composición de compuestos bioactivos en hojas de moringa, demostrando que variables como la precipitación, radiación solar, temperatura, humedad, edad de los árboles y micronutrientes del suelo (como fósforo y potasio), presentan correlación con el contenido de carotenoides, compuestos fenólicos totales, ácido ascórbico y actividad anti-radical.

Finalmente, en su tesis de maestría, Reyes (2018) evaluó el efecto de las variables agroclimáticas sobre las características fisicoquímicas del aceite de semillas de *M.*

oleifera cultivadas en dos municipios del estado de Veracruz. El autor encontró diferencias en el contenido del aceite, así como en su composición de ácidos grasos y propiedades fisicoquímicas, con respecto a las diferencias en radiación solar, precipitación, así como también en la textura, pH, contenido de sales, materia orgánica, fósforo y potasio en el suelo para los dos sitios estudiados.

3. JUSTIFICACIÓN

Ante la necesidad de ampliar el conocimiento sobre el uso de coagulantes naturales en el tratamiento de aguas, y sobre el entendido de la escasez de reportes científicos en los que se hayan utilizado semillas de moringa para el tratamiento de aguas en el estado de Veracruz, a pesar de que su cultivo ya se ha extendido en varias de sus regiones, es importante enfatizar que los pocos estudios realizados en México y en otros países, están enfocados a la clarificación de aguas superficiales y no al tratamiento de aguas residuales, específicamente a las provenientes de la industria acuícola. Además, las investigaciones científicas respecto al efecto de las variables agroclimáticas en función de las propiedades fisicoquímicas de *Moringa oleifera* se han enfocado en la composición química de sus hojas. Es así como el presente trabajo de investigación científica se centrará en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria acuícola debido a la importancia de dicha actividad en la región y el país, así como también en proporcionar datos respecto a los efectos de las variables agroclimáticas en dos municipios de la región central del estado de Veracruz, mismos que permitan tomar decisiones sobre el manejo agronómico de la especie y el aprovechamiento de la misma como un coagulante natural en el tratamiento de aguas residuales.

4. HIPÓTESIS

Las variables agroclimáticas bajo las que se desarrollan los árboles de *Moringa oleifera* en diferentes zonas de la región de Veracruz, tendrán un efecto en la composición química de sus semillas, pudiendo a su vez lograr un mayor efecto clarificante en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria acuícola.

5. OBJETIVOS

5.1 General

Evaluar el efecto clarificante sobre aguas residuales de la industria acuícola de semillas de *Moringa oleifera* cultivadas en dos zonas del estado de Veracruz.

5.2 Específicos

- Caracterizar proximalmente a las semillas de moringa cultivadas en dos zonas de la región central del estado de Veracruz.
- Evaluar el efecto clarificante (como porcentaje de remoción de turbidez, sólidos suspendidos totales y demanda bioquímica de oxígeno) de las semillas de moringa de las dos zonas de estudio en aguas residuales de la industria acuícola.
- Determinar el efecto de las variables asociadas al clima (temperatura promedio, porcentaje de humedad, precipitación, radiación solar) sobre la composición química de las semillas de moringa y su efecto clarificante sobre aguas residuales acuícolas.
- Determinar el efecto de las variables asociadas al suelo (pH, materia orgánica, carbono orgánico, conductividad eléctrica, fósforo, potasio y textura) sobre la composición química de las semillas de moringa y su efecto clarificante sobre aguas residuales acuícolas.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Ubicación de las zonas de estudio

Las semillas de moringa fueron cosechadas en dos áreas, la zona 1 comprende un cultivo particular ubicado en el centro de la ciudad de Veracruz (Figura 7), cuyas coordenadas son: 19°12'13"N, 96°09'16"W; y la zona 2 que comprende el campo experimental del Colegio de Postgraduados (campus Veracruz), ubicado en carretera Xalapa-Veracruz km. 88.5, Tepetates, municipio de Manlio Fabio Altamirano, cuyas coordenadas son: 19°12'07"N, 96°20'22"W (Figura 8). Se hicieron tres muestreos de la zona 1 (24 de mayo, 16 de junio y 27 de julio de 2016) y tres en la zona 2 (5 de julio, 8 de agosto y 30 de septiembre de 2016).

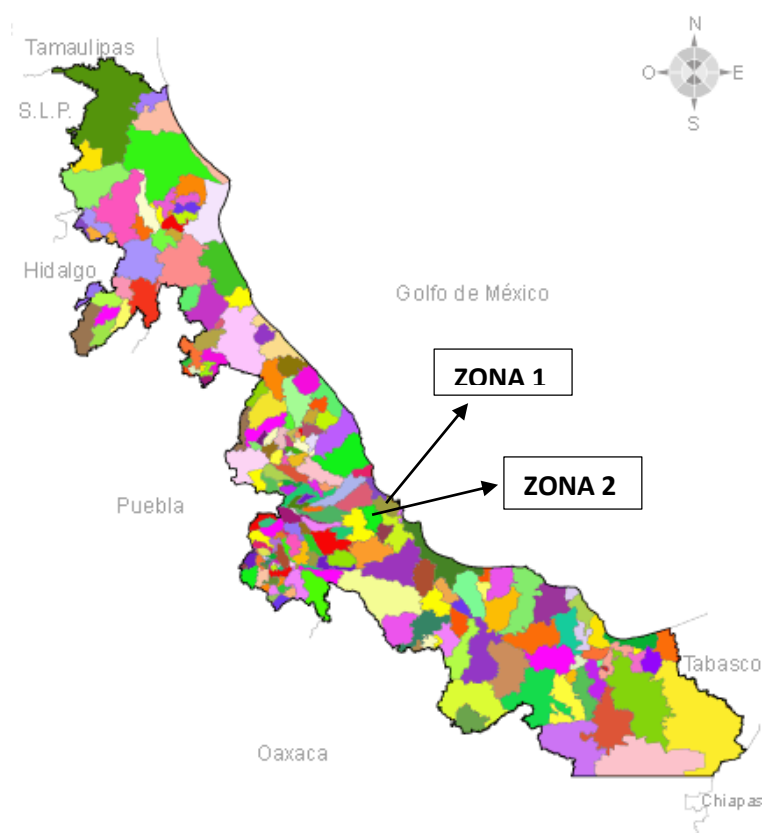


Figura 7. Mapa del estado de Veracruz.

recolectados de la estación meteorológica ubicada en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Región Veracruz, la cual proporciona los datos meteorológicos del municipio de Veracruz, ubicada a una distancia de 6 km. Los datos de la Zona 2, fueron proporcionados por la estación meteorológica del Colegio de Postgraduados (COLPOS) Campus Veracruz. Debido a que las vainas no están disponibles todo el año, el periodo de datos meteorológicos abarcó un mes anterior a la fecha de cosecha de las mismas, realizándose 3 muestreos aleatorios por cada zona de estudio.

6.2.2 Análisis de suelos

Los análisis de las variables de los suelos donde se encuentran los árboles sujetos de estudio del presente trabajo se realizaron en el Laboratorio de Análisis de Agua y Suelo (LAAS) y Laboratorio de Análisis de Alimentos (LAA), ubicados en el Colegio de Postgraduados (COLPOS) Campus Veracruz. El análisis del suelo se realizó de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT- 2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. La Tabla 4 enlista los parámetros determinados y los métodos utilizados para su análisis.

Tabla 4. Métodos para el análisis de suelos

PARÁMETRO	MÉTODO
pH	AS-02
Materia orgánica	AS-07 (Walkley y Black)
Textura	AS-09 (Bouyoucos)
Preparación de pasta saturada	AS-16
Conductividad eléctrica	AS-18
NUTRIENTES SOLUBLES	
Nitrato NO_3^-	Fotometría
Nitrito NO_2^-	
Fósforo P	
Fosfato PO_4^{3-}	
Anhídrido fosfórico P_2O_5	
Potasio K	
Óxido de potasio K_2O	

6.2.2.1 Obtención y preparación de muestras de suelos

Se determinó que la fecha de los análisis de suelo fuera en la última cosecha de vainas, siendo el 27 de julio 2016 y 30 de septiembre 2016 para la zona 1 y 2, respectivamente. Se realizó un solo análisis de suelo para ambas zonas de estudio, este consistió en tomar 4 muestras simples a una profundidad de 25 cm para cada una de las zonas de estudio y almacenarlas en bolsas de polietileno de alta densidad y se trasladaron al laboratorio de suelos del Colegio de Postgraduados (Campus Veracruz). Las muestras fueron mezcladas y homogeneizadas para obtener una muestra compuesta de dos kg para cada zona de estudio. Ambas muestras fueron secadas a temperatura ambiente, posteriormente se le retiraron (de forma manual) las rocas y el exceso de materia orgánica visible con el objetivo de poder realizar la molienda con un mazo de madera. Las muestras molidas se pasaron a través de un tamiz de 2 mm de diámetro (malla 10) y se almacenaron a temperatura ambiente para su análisis posterior.

6.2.2.2 pH

Para este análisis se pesaron 10 g de suelo a los que se les adicionaron 20 ml de agua destilada. Posteriormente, la muestra se agitó manualmente con una varilla de vidrio a intervalos de 5 minutos durante 30 minutos. Finalmente, la mezcla se dejó reposar durante 15 min, se agitó nuevamente la suspensión y se procedió a tomar lectura del pH con un potenciómetro (marca HANNA Instruments, modelo HI122).

6.2.2.3 Materia orgánica

Se pesaron 0.5 g de suelo previamente pasado a través de un tamiz de 0.5 mm de diámetro. La muestra se colocó en un matraz Erlenmeyer de 500 ml al cual se le adicionaron 10 ml de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) 1 N y 20 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado. Luego la muestra se agitó durante 1 minuto y posteriormente se dejó reposar durante 30 minutos. Transcurrido el tiempo de reposo se le adicionaron 200 ml de agua destilada, 5 ml de ácido fosfórico (H_3PO_4) concentrado y 7 gotas de difenilamina como indicador. Finalmente, la solución se tituló con

sulfato ferroso (FeSO_4). Las ecuaciones empleadas para calcular el contenido de materia orgánica son las siguientes:

$$\% \text{ Carbono orgánico} = \left(\frac{B - T}{g} \right) * N * 0.39$$

$$\% \text{ Materia orgánica} = \% \text{ Carbono orgánico} * 1.724$$

Donde:

B.- Volumen de sulfato ferroso gastado para titular el blanco (ml)

T.- Volumen de sulfato ferroso gastado para titular la muestra (ml)

g.- Peso de la muestra de suelo (g)

N.- Normalidad exacta de la solución de sulfato ferroso (valorada por separado al momento de analizar las muestras).

6.2.2.4 Textura

Se pesaron 120 g de suelo y se le adicionaron 40 ml de peróxido de hidrógeno con el objetivo de eliminar el contenido de materia orgánica, la muestra se evaporó hasta sequedad y se repitió el proceso hasta que no se observó efervescencia al peróxido de hidrógeno. Posteriormente se pesaron 100 g de suelo y se le incorporó agua destilada hasta cubrir la superficie con una lámina de 2 cm, se agregaron 5 ml de oxalato de sodio ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$) y 5 ml de metasilicato de sodio (Na_2SiO_3) y se dejó reposar la muestra durante 15 minutos. Una vez transcurrido el tiempo de reposo, la muestra se llevó a una licuadora industrial para homogeneizar el tamaño de partícula durante un tiempo de 5 minutos, una vez concluido el proceso, la muestra se vertió en el cilindro de Bouyoucos y se agregó agua destilada hasta completar un volumen de 1 litro con el hidrómetro dentro de la suspensión. Después, se retiró el hidrómetro y se procedió a agitar manualmente la suspensión durante 1 minuto. Se tomaron lecturas a los 40 segundos y dos horas, posterior a la agitación con el hidrómetro y con el termómetro. Para los resultados se empleó el diagrama de texturas especificado en la norma NOM-021-SEMARNAT-2000.

6.2.2.5 Preparación de pasta saturada

Se tomó una muestra de aproximadamente 400g de suelo, a la cual se añadió agua destilada hasta la saturación, posteriormente la pasta saturada se filtró con ayuda de papel filtro Whatman No. 42 y un embudo Buchner.

6.2.2.6 Conductividad eléctrica

Se tomó una muestra de 10 ml del extracto filtrado de la pasta saturada y se procedió a leer la conductividad en un conductímetro (marca HANNA Instruments, modelo HI2300).

6.2.2.7 Nutrientes solubles

La determinación de nutrientes solubles se realizó con ayuda de un fotómetro (marca HANNA Instruments, modelo HI83225), los nutrientes de la primera zona fueron determinados en rangos medios, los nutrientes de la segunda zona fueron determinados en rangos altos.

6.2.2.7.1 Nitrato soluble

Se tomó una muestra de 6 ml del extracto filtrado de la pasta saturada, se insertó en el fotómetro y se ajustó la lectura en “ceros”, se le adicionó a la muestra el reactivo HI93728-0 y se agitó vigorosamente durante un tiempo de 10 segundos y suavemente durante 50 segundos, se insertó nuevamente la muestra en el fotómetro y se procedió a efectuar la lectura correspondiente a la cantidad de nitratos.

6.2.2.7.2 Nitrito soluble

Se tomó una muestra de 10 ml del extracto filtrado de la pasta saturada, se insertó en el fotómetro y se ajustó la lectura en “ceros”, se le adicionó a la muestra el reactivo HI93708-0 y se agitó suavemente hasta su dilución. La muestra fue insertada nuevamente en el fotómetro y se procedió a efectuar la lectura correspondiente a la cantidad de nitritos.

6.2.2.7.3 Fósforo, fosfato, y anhídrido fosfórico solubles

Se tomó una muestra de 10 ml del extracto filtrado de la pasta saturada, se insertó en el fotómetro y se ajustó la lectura en “ceros”, se le adicionaron a la muestra 10 gotas del reactivo HI93706A-0 y el reactivo HI93706B-0, posteriormente, se agitó suavemente hasta su dilución. La muestra fue insertada nuevamente en el fotómetro y se procedió a efectuar la lectura correspondiente a la cantidad de fósforo, fosfato y anhídrido fosfórico.

6.2.2.7.4 Potasio (K) y óxido de potasio (K₂O) solubles

Se tomó una muestra de 10 mL del extracto filtrado de la pasta saturada, se le adicionaron 6 gotas del reactivo HI93750A-0 y se agitó suavemente durante 1 min, se insertó en el fotómetro y se ajustó la lectura en “ceros”, se le adicionó a la muestra el reactivo HI93750B-0 y se agitó suavemente durante 1 min. La muestra fue insertada nuevamente en el fotómetro y se procedió a efectuar la lectura correspondiente a la cantidad de potasio y óxido de potasio.

6.3 Preparación del material biológico

Luego de la cosecha, las vainas se colocaron en el interior de bolsas de polietileno para ser transportadas a la ciudad de Boca del Rio, Ver. Las semillas fueron procesadas para su análisis proximal y las pruebas de clarificación de aguas residuales en el Laboratorio de Investigación de Recursos Acuáticos (LIRA) del Instituto Tecnológico de Boca del Rio (ITBOCA), donde fueron almacenadas dentro de la misma bolsa y en refrigeración a una temperatura de 3°C siguiendo lo reportado por Katayón *et al.* (2006) para su uso posterior. Las semillas (extraídas de las vainas secas) fueron seleccionadas por su contenido de humedad (<7%) retirando totalmente de forma manual su cáscara y pétalos de consistencia papirácea. Posteriormente se trituraron utilizando un mortero con pistilo de porcelana hasta obtener una consistencia pastosa.

6.4 Análisis proximal de las semillas de moringa

Con el objetivo de caracterizar la composición de las semillas de moringa de la región de Veracruz, a éstas se les realizó un análisis proximal. El primer paso fue la determinación de su humedad, seguido de la extracción de su aceite y finalmente, con las muestras sin aceite pulverizadas se hicieron las demás determinaciones.

6.4.1 Humedad

La humedad se determinó de acuerdo al método de la AOAC, en cápsulas de porcelana puestas a peso constante y con ayuda de un horno a una temperatura de 110 °C. Se pesaron 3 g de muestra para introducirlas al horno por 24 horas (hasta peso constante), para la eliminación del agua libre. Después fueron llevadas a temperatura ambiente en un desecador para proceder a pesarlas y calcular la humedad por diferencia de peso. Las corridas experimentales se realizaron por triplicado.

6.4.2 Cenizas

El contenido de cenizas se determinó mediante el método de la AOAC. En crisoles de porcelana se pesaron de 1 a 2 g de muestra libre de humedad. Luego, con ayuda de un mechero las muestras fueron quemadas hasta que estuvieran totalmente carbonizadas. Los crisoles se colocaron en una mufla a una temperatura de 550°C. El calentamiento se suspendió cuando las cenizas se tornaron en un color blanco o gris. Después las muestras fueron llevadas a temperatura ambiente en un desecador para proceder a pesarlas. Las corridas experimentales se realizaron por triplicado.

6.4.3 Fibra cruda

Se determinó con el método de la AOAC, donde se pesaron 2 g de muestra libre de grasa con 200 ml de ácido sulfúrico H_2SO_4 (al 1.25 % v/v) en un vaso Berzelius de 600 ml. Las muestras se calentaron durante 30 minutos en el equipo para extracción de fibra cruda. Al terminar el calentamiento (digestión) se añadieron 200 ml. de hidróxido de sodio NaOH (al 3.52 % m/v) y se volvió a calentar durante otros 30

minutos. Posteriormente, la mezcla se filtró a través de papel filtro, el residuo se lavó con agua caliente y luego con ácido clorhídrico 0.1 N para eliminar cualquier sustancia que precipite con el álcali; se lavó nuevamente con agua destilada para eliminar el ácido, luego con alcohol y después con éter. El residuo se pasó cuantitativamente a un crisol (puesto previamente a peso constante), se secó a 110°C hasta peso constante, se dejó llegar a temperatura ambiente en un desecador para proceder a pesarlo. Finalmente se calcinó en una mufla y se volvió a pesar. La pérdida de masa equivale al contenido de fibra cruda.

6.4.4 Lípidos totales

Los lípidos (aceite) fueron extraídos en un equipo extractor de grasas tipo Goldfisch (modelo EG-4000) como se describe más adelante en el apartado 6.4. El contenido de lípidos totales fue determinado como la diferencia entre el peso de la muestra y el peso del aceite extraído.

6.4.5 Proteína cruda

Se estimó con el método de AOAC, por el método Kjeldhal, a partir del nitrógeno total utilizando un factor de 6.25. Se realizó la digestión de 1 g de muestra con ácido sulfúrico H_2SO_4 concentrado y para su destilación se adicionaron 75 ml de hidróxido de sodio al 40%. El destilado se recogió en un matraz Erlenmeyer de 500 ml conteniendo 75 ml de ácido clorhídrico HCl 0.1 N y 3 gotas de indicador rojo de metilo. La destilación concluyó cuando se recibieron 150 ml. Finalmente se tituló el destilado con hidróxido de sodio NaOH 0.1 N. La determinación de proteína cruda se realizó por triplicado.

6.4.6 Carbohidratos totales

El contenido de carbohidratos totales fue determinado por la diferencia del 100% menos la sumatoria de cada uno de los demás componentes.

6.5 Extracción de aceite de semillas de moringa

Inicialmente, se tomaron cinco muestras, mismas que fueron pesadas en una balanza analítica (marca Adam, modelo PW254), registrando un peso aproximado de 1 ($\pm$ 0.1) g. Cada una de las muestras se colocó en el interior de un cartucho para extracción con filtro Whatman de 22 mm x 8 mm.

La extracción del aceite se realizó en un equipo extractor de grasas (Figura 9) tipo Goldfish (modelo EG-4000). Este equipo funciona bajo el principio del método de extracción Soxhlet, iniciando un ciclo de calentamiento por medio de parrillas individuales de 100 watts (controladas por un termostato de control de temperatura cada una). Cada condensador cuenta con un soporte para colocar el tubo porta-cartucho o el tubo recuperador.

La determinación del tipo de solvente a ocupar, la relación masa de soluto/volumen de solvente y el tiempo de extracción, fue realizada en las pruebas preliminares, donde se evaluó el rendimiento de extracción con tres factores del proceso, cada uno a tres niveles: solvente de extracción (n-hexano, éter de petróleo y acetona), relación masa/volumen de solvente (1g de muestra fresca en 15, 25 y 35 ml de solvente) y tiempo de extracción (15, 30 y 45 min). Los resultados de estos preliminares se muestran en la sección 7.

La extracción se realizó utilizando n-hexano como solvente (temperatura de ebullición de 69 °C), mismo que fue seleccionado también por sus propiedades no polares y por su solubilidad con los lípidos presentes en las semillas. A cada cartucho se le adicionó 1 gramo de muestra y 25 ml de solvente. El tiempo de extracción fue de 30 minutos.

Finalmente, la mezcla de aceite-solvente se recuperó en matraces de balón esmerilados y previamente llevados a peso constante. El solvente fue retirado empleando un rotaevaporador (marca HEILDOPH, modelo VV200).



Figura 10. Equipo para extracción de grasas tipo Goldfish.

6.6 Obtención de muestras de aguas residual de una UPA

Para las corridas experimentales de coagulación con semillas de moringa, se utilizó agua residual de efluentes acuícolas perteneciente a una Unidad de Producción Acuícola (UPA) que se dedica al cultivo de tilapia, dicha unidad se ubica en el estado de Veracruz, ubicado en 19°28'57.9" N 96°21'19.0" W del Municipio de Úrsulo Galván, Ver. México cerca del Río La Linda. La UPA contiene 6 estanques de geomembrana, con un volumen total de 458.04 m³. La muestra del efluente se tomó en la descarga final del sistema. Las muestras recolectadas el 29 de marzo de 2017.

6.7 Evaluación del efecto coagulante de semillas de moringa

Se preparó una solución madre siguiendo la metodología de Morales (2009). La solución madre fue preparada utilizando el extracto no graso de las semillas de moringa disuelto en agua destilada con una concentración de 10 000 ppm. Esta solución fue agitada en un vaso de precipitados con capacidad de 1 litro a una velocidad de 100 rpm durante 30 minutos. Posteriormente se filtró utilizando papel filtro Whatman No. 1, con la ayuda de una bomba de vacío.

Para encontrar la dosis óptima de la solución de semillas de moringa que se requiere para tratar el agua residual se hicieron corridas experimentales con distintas dosis (dosis en 40, 50, 60, 70 y 80 ml/L), determinando que la dosis óptima es de 60 ml/l (equivalente a 600 mg de semillas por litro de agua tratada), lo cual es consistente con lo reportado por Sánchez *et al.* (2010). Luego, se empleó la metodología reportada por Caldera *et al.* (2007), con ligeras modificaciones. Las corridas se realizaron en un equipo de prueba de jarras (Figura 10) utilizando vasos de precipitados de 1 L, a los cuales se les adicionó cada una de las diferentes dosis de solución madre. La prueba consistió en una agitación inicial durante 10 minutos a una velocidad de 100 revoluciones por minuto (rpm) para favorecer a la coagulación, posteriormente se agitaron a una velocidad de 30 rpm durante 15 minutos para favorecer a la floculación y evitar que los coágulos formados se rompan.



Figura 11. Corridas experimentales en el equipo de ensayo de jarras

Finalmente se dejó reposar durante 30 minutos y se determinó la turbidez según se describirá en apartado 6.6.1. El porcentaje de remoción de turbidez fue determinado por la diferencia de la turbidez inicial de las muestras de agua (antes del tratamiento) a la cual se le restó la turbidez removida en un tratamiento control (con las mismas condiciones de agitación, pero sin aplicar semillas de moringa, y la turbidez residual

(posterior al tratamiento). De manera análoga, antes y después del tratamiento con semillas de moringa se determinaron los parámetros Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Sólidos Totales, pH, Dureza y Conductividad. Los métodos se describen a continuación.

6.7.1 Turbidez

Se realizó con la técnica nefelométrica empleando un turbidímetro portátil (marca OAKTON, modelo TN-100/T-100). Las determinaciones se hicieron por triplicado, registrando el resultado en Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT).

6.7.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno

Se determinó utilizando un equipo para determinación de DBO respirométrico (marca HACH, modelo Bod Track II) en mg/l, para ello se utilizaron botellas de vidrio marrón de 492 ml, dentro de las cuales se colocó la muestra de agua residual junto con un agitador magnético. Adicionalmente se agregó un sobre con reactivo en polvo de LiOH y un sobre de solución tampón a cada una. El equipo se mantuvo funcionando durante cinco días a 20 ± 2 °C. Al cabo de los cinco días transcurridos se tomó la lectura para cada una de las muestras.

6.7.3 Sólidos totales

La determinación se realizó agregando 50 ml de la muestra de agua en cápsulas de porcelana (previamente llevadas a peso constante) y registrando su peso. Posteriormente se sometieron a un proceso de evaporación y secado dentro de una estufa a 110 °C, en donde permanecieron hasta peso constante. Finalmente, se dejaron enfriar dentro de un desecador para ser pesadas nuevamente. La determinación se hizo por triplicado. El cálculo se realizó mediante la fórmula:

$$mg/L \text{ de sólidos totales} = \frac{\text{peso del residuo en g}}{\text{ml de muestra}} * 1\,000\,000$$

6.7.4 Dureza

La dureza se determinó por triplicado mediante una técnica volumétrica, para la cual se tomaron 50 ml de la muestra y se vertieron en un matraz Erlenmeyer de 250 ml, luego se añadieron 2 ml de solución buffer para dureza (solución amortiguadora de cloruro de amonio), posteriormente se agregaron 3 gotas de solución negro de ericromo como indicador. La solución se tornó de color lila, por lo que finalmente se prosiguió a titular con solución de EDTA 0.01 M (ácido etilendiaminotetraacético) agitando continuamente hasta que la solución cambió de color azul.

Finalmente, la dureza total (expresada como carbonato de calcio CaCO_3) se calculó mediante la ecuación:

$$\text{Dureza total (mg/L)} = A \times B \times 1000 / C$$

Donde:

A.- Son los ml de EDTA gastados en la titulación de la muestra;

B.- Son los mg de CaCO_3 (1 mg) equivalentes a 1 ml de EDTA, y

C.- Son los ml de muestra

6.7.5 pH y conductividad

La determinación de pH se realizó por triplicado en un potenciómetro de sobremesa (marca Hanna, modelo pH 210) y la de conductividad con un medidor de sobremesa (marca Hanna, modelo hi 98130). Para ambas determinaciones se utilizó un vaso de precipitados de 250 ml, al cual se adicionó la muestra de agua residual, prosiguiendo a sumergir el electrodo medidor y finalmente se tomó la lectura.

6.8 Análisis estadístico

Los datos del efecto coagulante, evaluado con los porcentajes de remoción de los parámetros fisicoquímicos incluidos en este trabajo, así como la composición proximal de las semillas de moringa de las dos zonas de estudio, fueron sometidos

a un análisis de la varianza (ANOVA). Además, se utilizó la prueba de rangos múltiples de Tukey ($\alpha = 0.05$) para demostrar la existencia de grupos homogéneos en los tratamientos. Los cálculos se realizaron con ayuda del software Excel de Windows (Microsoft® Office Professional Plus 2013).

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Características agroclimáticas de las zonas de estudio

7.1.1 Análisis comparativo de los climas

Las principales diferencias observadas se encuentran en la precipitación y la radiación solar, siendo mayor la precipitación en la Zona 2; y la radiación solar en la Zona 1. En cuanto a la temperatura y al porcentaje de humedad los datos son similares (Tabla 5).

Tabla 5. Valores de las variables climatológicas en ambas zonas de cultivo

Periodo	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Precipitación (mm)	Radiación solar (kWh/m²día)
ZONA 1				
23/04/16 – 24/05/16	27.14	81.60	0.59	9.50
15/05/16 – 16/06/16	28.22	78.80	0.01	12.37
26/06/16 – 27/07/16	28.00	82.10	1.31	12.74
ZONA 2				
04/06/16 – 05/07/16	28.12	79.16	1.55	6.04
07/07/16 – 08/08/16	28.13	80.20	5.74	4.92
29/08/16 – 30/09/16	26.99	74.60	2.84	5.47

Datos mostrados como el promedio de los días de cada periodo.

7.1.2 Características de los suelos

Respecto a los resultados del análisis de suelo (Tabla 6), se aprecia que, de acuerdo a las especificaciones de la NOM-021-SEMARNAT-2000, el pH es moderadamente ácido en la Zona 2 y neutro en la 1. El contenido de materia orgánica es medio en la Zona 2 y bajo en la 1. En cuanto a la textura ambas zonas presentan diferencias en sus contenidos de arena, arcilla y limo. El suelo de la Zona 2 es de textura franco arcilloso, mientras que la textura de la Zona 1 es arenosa. En la Zona 2 la conductividad eléctrica presenta efectos despreciables de salinidad y la Zona 1 tiene

suelo salino. El contenido de fósforo y de potasio es mayor en la Zona 1 en comparación con la Zona 2.

Tabla 6. Características del suelo en ambas zonas de cultivo

Parámetro	Zona 1	Zona 2
pH	7.25 (± 0.04) a 27.87 (± 0.47) °C Considerado Neutro	6.25 (± 0.05) a 27.47 (± 0.4) °C Moderadamente ácido
Materia orgánica	Materia orgánica	Materia orgánica
	1.351 (± 0.032) %	2.575 (± 0.066) %
	Carbono orgánico	Carbono orgánico
	0.783 (± 0.019) %	1.493 (± 0.038) %
Textura	Arena 94.25 %	Arena: 37.35 %
	Arcilla 3.06 %	Arcilla: 36.89 %
	Limo 2.69 %	Limo: 25.76 %
	Tipo de suelo: Arena	Tipo de suelo: Franco Arcilloso
Conductividad eléctrica	4.75 (± 0.02) $\mu\text{S/m}$	0.253 (± 0.019) $\mu\text{S/m}$
	Suelo salino	Efectos despreciables de salinidad
Nitrato NO_3^-	70 g/L	0 mg/L
Nitrito NO_2^-	120 mg/L	0 mg/L
Fósforo P	60 mg/L	2.5 mg/L
fosfato PO_4^{3-}	180 mg/L	8 mg/L
Anhídrido fosfórico P_2O_5	130 mg/L	6 mg/L
Potasio K	1700 mg/L	21 mg/L
Óxido de potasio K_2O	2050 mg/L	25 mg/L

7.2 Caracterización de las semillas de moringa

Los resultados del análisis proximal de las semillas de moringa cosechadas en las dos zonas de estudio se encuentran resumidos en la Tabla 7. Algo muy importante a destacar de estos resultados es el alto contenido de aceite, el cual es superior al 36% de su composición total, así como el alto contenido de proteína, mismo que se encontró dentro del rango del 37 al 42%, lo cual se relaciona directamente con su

potencial como coagulante natural, dada la naturaleza peptídica del compuesto coagulante previamente identificado por diversos autores (Martín *et al.*, 2013). Dicho contenido de proteína y de grasa fue significativamente superior en la zona de estudio 1. Asimismo, las semillas de la zona dos presentaron un mayor contenido de fibra y carbohidratos.

Tabla 7. Análisis proximal de semillas de moringa cosechadas en ambas zonas de estudio

COMPONENTE	ZONA 1	ZONA 2
Humedad (%)	5.9 ± 0.09 ^a	7.15 ± 0.11 ^b
Proteína cruda (%)	41.84 ± 1.26 ^a	37.96 ± 0.26 ^b
Fibra cruda (%)	2.64 ± 0.30 ^a	3.21 ± 0.04 ^b
Grasa (aceite) (%)	37.56 ± 0.31 ^a	36.53 ± 0.21 ^b
Ceniza (%)	2.79 ± 0.32 ^a	3.15 ± 0.14 ^a
Carbohidratos totales (%)	9.27 ± 0.65 ^a	12 ± 0.7 ^b

Datos promedio ± desviación estándar de tres muestras para cada zona de estudio.

a, b en mismas filas son significativamente diferentes con $p < 0.05$ (ANOVA, Tukey)

Las semillas de la Zona 1, que presentaron un mayor contenido de proteína y grasa en el presente estudio, fueron cosechadas de árboles que crecen en condiciones climáticas de menor precipitación pluvial y mayor radiación solar, además de un suelo con un pH cercano a la neutralidad, de tipo arenoso y un contenido de sales y nitrógeno (en forma de nitratos y nitritos) mayor en comparación con los que crecen en la zona 2. Análogamente, Adrover (2014) reportó un mayor contenido de nitrógeno total en aceitunas cosechadas de los olivares con menor precipitación y mayor precipitación de los tres considerados en su estudio. Así, es posible que el nitrógeno contenido en el suelo tenga un efecto positivo en la biosíntesis de las proteínas en las semillas de moringa.

En el caso de las variables temperatura y humedad, al no haber presentado diferencia significativa entre ambas zonas de estudio, no pueden asociarse a las diferencias encontradas en contenido de proteína y grasa en las semillas de ambos sitios. Esto es consistente con lo reportado previamente por Canvin (1965) y Reyes (2018), quienes confirmaron que la temperatura no influye en el contenido de aceite de las semillas de moringa. Este último autor también demostró que a mayor radiación solar el contenido de aceite es mayor. Por su parte, Wen *et al.* (2012) confirmó rendimientos de aceite de hasta 55.5 % al aumentar la radiación solar y disminuyendo hasta 34.1 % cuando aumenta la precipitación para la especie *Jatropha curcas*.

La diferencia en la composición química de ambas semillas pueda también estar atribuida, entre otros factores, a las diferencias en la época de recolección de las mismas, tal como lo ha reportado previamente El-Murabak *et al.* (1998), quienes demostraron que este era un factor determinante en la composición química y en la facilidad de cocción de las habas. Tal como se describió en el apartado 6.1, las semillas de la zona 1 fueron cosechas en el periodo de abril a junio de 2016 y las de la zona 2 en el periodo comprendido de junio a agosto del mismo año.

Las semillas de otras especies vegetales contienen un porcentaje de proteína y de grasa muy por debajo de las semillas de moringa, teniendo como componentes mayoritarios dentro de su composición a los carbohidratos totales y fibra cruda. Este es el caso de las semillas de guanábana (*Annona Muricata*) con 15.2 ± 0.5 % de proteína cruda, 24.2 ± 0.5 % de grasa, 31.9 ± 0.4 % de fibra cruda y 21.9 % de carbohidratos totales, según lo reportado por Chaparro *et al.* (2014), y también para las semillas de quinoa (*Chenopodium quinoa*) con 12.9 % de proteína, 6.5 % de lípidos, 13.9 % de fibra y 63.7 % de azúcares, según lo reportado por Padrón *et al.* (2014).

Los resultados de esta composición química de las semillas de moringa cultivadas en las dos zonas de estudio fueron promediados y se compararon con los datos reportados por otros autores en diversas regiones del mundo (Tabla 8). Cabe mencionar que no se han encontrado reportes previos en la literatura científica de una caracterización similar para moringa cultivada en México.

Tabla 8. Comparación del análisis proximal de semillas de moringa en diferentes países

REFERENCIA	Iqbal, 1991	Olayemi y Alabi, 1994	Makkar y Becker, 1997	Anwar y Bhanger, 2003	Abdulkarim <i>et al.</i> , 2005	Presente trabajo*, 2017
COMPONENTE						
Humedad (%)	5.70	5.0	nd	8.9 ± 0.2	7.9 ± 1.0	6.52 ± 0.66
Proteína cruda (%)	29.36	34.1	36.7	31.65 ± 1.2	38.3 ± 1.03	39.90 ± 2.17
Fibra cruda (%)	7.20	Nd	4.8	7.54 ± 0.55	4.5 ± 0.38	2.92 ± 0.36
Grasa (aceite) (%)	40.39	15.5	41.7	31.8 ± 0.89	30.8 ± 2.19	37.05 ± 0.64
Ceniza (%)	6.60	11.8	3.8	6.53 ± 0.65	6.5 ± 0.15	2.97 ± 0.31
Carbohidratos Totales (%)	nd	15	17.8	nd	16.5	10.64 ± 1.59
Lugar de cultivo	Sindh, Pakistán	Ilorin, Nigeria	Nicaragua	Frontera noroeste de Pakistán	Selangor, Malasia	Veracruz, México

*Datos promedio ± desv. estándar de seis muestras pertenecientes a ambas zonas de estudio.

nd: dato no disponibles.

Los resultados del presente trabajo se encontraron cercanos a los reportados por otros autores, sin embargo, cabe destacar que los resultados del contenido de proteína del presente trabajo fueron superiores a todos los demás resultados previamente reportados, y en el caso del contenido de aceite, solo Iqbal (1991) reportó un contenido mayor (40.39%) para semillas cultivadas en Pakistán. Por el contrario, el contenido de carbohidratos totales de las semillas analizadas en el presente trabajo es el menor reportado hasta el momento.

Asimismo, de conjunto de estos resultados puede notarse que existe un efecto de las condiciones agroclimáticas sobre la composición química de las semillas de moringa. A pesar de ello la comprensión exacta de las causas y los mecanismos mediante los que se manifiestan se ignoran en gran medida y nos encontramos aún un terreno fundamentalmente descriptivo.

7.3 Extracción de aceite (pruebas preliminares)

Los resultados de las pruebas preliminares de extracción de aceite se muestran a continuación. Esta etapa es muy importante para el objetivo principal de esta investigación, mismo que se enfoca en la utilización de las semillas de moringa como clarificante natural de aguas residuales, pues la fracción aceitosa de las semillas impide un correcto efecto coagulante en el proceso. Los primeros resultados obtenidos demostraron que el rendimiento de extracción con diferentes solventes en una relación masa/volumen y tiempo constante fue mayor empleando n-hexano y éter de petróleo, con un porcentaje de rendimiento de 37.05 y 38.10 respectivamente, mientras que para la acetona el rendimiento fue menor con 32.38% (Tabla 9). Sin embargo, se logró apreciar una coloración parda y presencia de impurezas en el aceite desde el inicio de la extracción con acetona y éter de petróleo, lo cual constató que el uso de solventes para la extracción de aceites de origen vegetal, puede traer consigo la extracción de pigmentos que se producen naturalmente en la semilla (Megahed, 2001).

Una vez seleccionado el solvente de extracción, los resultados para el rendimiento de extracción con n-hexano se vieron favorecidos con las relaciones de masa/volumen de solvente en las proporciones 1 g/25 ml y 1 g/35 ml, obteniéndose así un porcentaje de rendimiento de 37.97 y 38.9 respectivamente, mientras que con la relación de 1 g/15 ml de solvente se obtuvo un porcentaje de rendimiento de 32.89, tal como se aprecia en la Tabla 10.

Tabla 9. Rendimiento de extracción de aceite con diferentes solventes a una relación masa/volumen de solvente y tiempo constante

Solvente	Rendimiento (%)
n-hexano	37.05 a
Éter de petróleo	38.10 a
Acetona	32.38 b

Los valores de rendimiento seguidos con diferentes letras (a,b) son significativamente diferentes a un nivel del 5%, ANOVA Tukey ($p < 0.05$). Datos expresados como promedio de cinco réplicas.

Tabla 10. Rendimiento de extracción de aceite con n-hexano a diferentes relaciones de masa/volumen de solvente

Relación m/v	Rendimiento (%)
1 g / 15 ml	32.89 a
1 g / 25 ml	37.97 b
1 g / 35 ml	38.97 b

Los valores de rendimiento seguidos con diferentes letras (a,b) son significativamente diferentes a un nivel del 5%, ANOVA Tukey ($p < 0.05$). Datos expresados como promedio de cinco réplicas.

Una vez elegida la relación de masa de semilla/volumen de solvente a utilizar, los resultados obtenidos para el rendimiento de extracción a diferentes tiempos, empleando n-hexano bajo la relación de 1 g/25 ml de solvente, mostraron mejores rendimientos para los tiempos de 30 y 45 minutos, obteniéndose un porcentaje de de 37.90 y 38.47, mientras que para el tiempo de extracción con 15 minutos se obtuvo un rendimiento de 32.23%, tal y como se aprecia en la Tabla 11.

Tabla 11. Rendimiento de extracción de aceite con 1 g/25 ml de n-hexano a diferentes tiempos

Tiempo	% de rendimiento
15 min	32.23 a
30 min	37.90 b
45 min	38.47 b

Los valores de rendimiento seguidos con diferentes letras (a,b) son significativamente diferentes a un nivel del 5%, ANOVA Tukey ($p < 0.05$). Datos expresados como promedio de cinco réplicas.

Como se mencionó en la sección anterior, los resultados del contenido de aceite (alrededor del 37% de su composición total) en semillas de moringa del presente trabajo se encuentran muy cercanos a los reportados por otras investigaciones. En particular, existen reportes científicos que se han enfocado en la extracción del aceite de estas semillas, sobre todo con miras a la producción de biocombustible. Es así como también, Anwar y Rashid (2007) reportaron un 34% de aceite en semillas de moringa de Pakistán, Zamarripa *et al.* (2013) obtuvieron de 33.02 a 38.35 % de aceite en semillas de árboles cultivados en Chiapas, México, y recientemente Barakát y Ghazal (2016) un 29.61% en semillas de cultivos en Egipto.

Con el presente trabajo se concluye que los solventes que no presentaron diferencia significativa entre sí fueron éter de petróleo y hexano, de los cuales se seleccionó al hexano por obtenerse con él un aceite más limpio de impurezas. Al determinar la relación masa/volumen de solvente y el tiempo óptimo, los resultados favorecieron a una relación de 1 g/25 ml y a un tiempo de 30 minutos. El porcentaje de aceite que se obtuvo de las semillas es similar e inclusive superior al reportado en semillas de otros países.

La extracción del aceite de semillas oleaginosas se puede realizar por varios métodos, entre los cuales se encuentran la extracción con solventes, prensado mecánico y por extracción de preimpresión-disolvente. La extracción con solventes muestra la ventaja (sobre los métodos mecánicos) de extraer un mayor porcentaje del aceite de la semilla. El porcentaje de aceite que queda en la muestra después de la extracción con solventes generalmente no supera el 1%, mientras que para los rangos de presión mecánicas se encuentra entre 4-7%.

Hoy en día la extracción con solventes es la técnica comercial empleada comúnmente para recuperar el aceite de las semillas oleaginosas. Actualmente el n-hexano forma parte de los solventes más empleados en todo el mundo debido a su eficacia y facilidad para la extracción de aceite de semillas oleaginosas (Saxena *et al.*, 2011).

7.4 Efecto coagulante de semillas de moringa

Los resultados obtenidos de la dosis óptima de semillas de moringa para el tratamiento de efluentes acuícolas y los tiempos de retención necesarios para el proceso de coagulación-floculación se muestran en la Tabla 12. Puede apreciarse en dicha tabla, que el tiempo de retención necesario para el tratamiento de aguas residuales acuícolas es menor que el reportado por Özacar y Sengil (2001) para aguas residuales domésticas, y que también se encuentra en un nivel bastante aceptable si tomamos en cuenta los tiempos de retención típicos del tratamiento coagulación-floculación. Así, al optimizarse los tiempos con el uso de moringa como coagulante, esto podría disminuir los costos de producción. Asimismo, la dosis necesaria para el tratamiento fisicoquímico es superior a los reportado para un agua superficial (Folkard *et al.*, 2001), pero inferior a lo reportado para el tratamiento de aguas residuales de rastro (Morales *et al.*, 2009).

Tabla 12. Comparación de tratamientos fisicoquímicos en distintos tipos de agua

	Özacar y Sengil (2001)	Broin et al. (2002)	Kumasi et al. (2005)	Ghebremichael et al. (2006)	Folkard et al. (2001)	Morales et al. (2009)	Presente trabajo
Coagulante	Taninos (polifenoles)	<i>Moringa oleifera</i>	<i>Moringa oleifera</i>	<i>Moringa oleifera</i> y arcilla	<i>Moringa oleifera</i>	<i>Moringa oleifera</i>	<i>Moringa oleifera</i>
Dosis (mg/l)	nd	nd	500 a 6000	nd	200	2500	600
TRH (minutos)	66	120 a 240	20 a 100	71	5	5	25
Tipo de agua	Aguas residuales domésticas	Aguas de turbidez sintética	Agua con arsénico	Aguas residuales domésticas	Agua de río	Aguas residuales de rastro	Aguas residuales acuícolas

TRH: Tiempo de retención hidráulica; nd: no disponible.

Los resultados obtenidos durante la evaluación del efecto coagulante de las semillas de moringa se presentan a continuación para cada parámetro analizado.

7.4.1 Turbidez

La Tabla 13 muestra los resultados que conllevaron a la determinación de la remoción de turbidez, misma que fue superior en las semillas de la Zona 1 (70.96%). Es importante destacar que las investigaciones donde se utilizó moringa como clarificante natural de aguas con turbidez sintética, han reportado porcentajes de remoción de turbidez mayores. Pritchard *et al.* (2009) usaron un agua modelo con una turbidez de 146 NTU, creada artificialmente con caolín y agua de río con una turbidez de 45 NTU. Sus resultados mostraron que *M. oleifera* removió hasta un 84% de turbidez en el agua con caolín, y en el agua de río de 45 NTU la remoción de turbidez fue de 76%. Sin embargo, la turbidez de sus aguas tratadas es inferior a la de las muestras utilizadas en el presente trabajo. En la Figura 11 puede apreciarse la muestra de agua residual, antes y después del tratamiento con moringa (al removerse el 70.96% de la turbidez inicial), es notoria la disminución de turbidez, no así la disminución de su color verde.

Tabla 13. Turbidez inicial, final y porcentaje de su remoción

PARÁMETRO	ZONA 1	ZONA 2
Turbidez inicial (NTU)	165.33 ± 4.61	183.56 ± 4.53
Turbidez final (NTU)	48.14 ± 4.96	73.37 ± 4.16
Remoción de turbidez (%)	70.96 ± 2.21 ^a	60.03 ± 1.92 ^b

Datos promedio ± desviación estándar de tres réplicas para cada zona de estudio.

a, b en porcentajes de remoción son significativamente diferentes con $p < 0.05$ (ANOVA, Tukey)

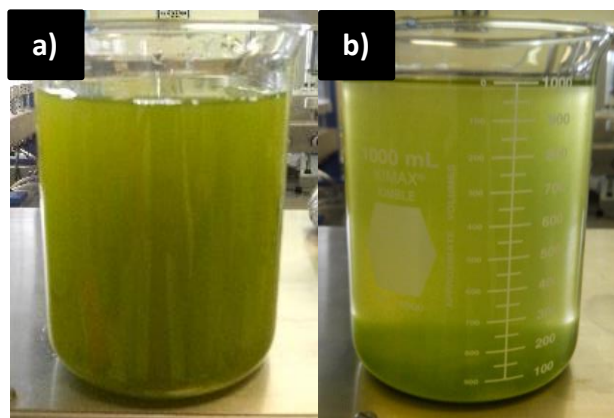


Figura 12. Agua residual acuícola a) antes del tratamiento; b) después del tratamiento con moringa.

Asrafuzzaman *et al.* (2011) estudiaron el uso de la *M. oleífera*, *Cicer arietinum* (garbanzo o chícharo) y *Dolichos lablab* (poroto o judía) como coagulantes naturales, para reducir la turbidez de agua, también con turbidez sintética. En el caso específico de *M. oleífera*, las dosis usadas fueron 50, 60, 70, 80, 90 y 100 mg/L. Esto confirma que, para remover una turbidez de tipo sintético, se necesita una dosis mucho menor de las semillas que la que se ocupa para aguas con otros componentes, tal es el caso de las aguas residuales. En este trabajo se concluyó que *M. oleífera* tiene un mejor desempeño en aguas de alta turbidez que en aguas con turbidez media o baja. Además, Yarahmadi *et al.* (2009) confirmaron que el

desempeño de moringa como coagulante es independiente del pH, por lo que en el presente trabajo no se modificó el pH de las muestras de agua para los análisis.

En cuanto a la efectividad de moringa para la remoción de turbidez de aguas residuales, en el trabajo realizado por Mas y Rubí *et al.* (2011) mejoraron la calidad de efluentes domésticos de dos periodos climatológicos diferentes (periodo lluvioso y de sequía, con turbidez inicial de 75 y 145 NTU respectivamente). Con estos valores de turbidez ellos necesitaron dosis de moringa menores a las utilizadas en el presente trabajo (300 y 480 mg/L para las muestras con menor y mayor turbidez, respectivamente) y alcanzaron porcentajes de remoción de turbidez de 95.5 y 89.9%. Algo importante a mencionar es que este y otros trabajos no reportan en sus metodologías el uso de un tratamiento control para determinar la turbidez que se elimina con la sedimentación de algunos sólidos durante la agitación en la prueba de jarras, por lo que existe la posibilidad de que sus resultados estén sobreestimados.

7.4.2 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Los resultados de la remoción de DBO se muestran en la Tabla 14. La DBO se define como la cantidad de oxígeno requerido por las bacterias mientras descomponen la materia orgánica biodegradable, bajo condiciones aerobias. La DBO es el método usado con mayor frecuencia en el campo de tratamiento de las aguas residuales. Si existe suficiente oxígeno disponible, la composición biológica aerobia de un desecho orgánico continuará hasta que el desecho se haya consumido. Tres actividades más o menos diferenciadas pueden ocurrir. Primero, una parte del desecho se oxida a productos finales y con ello los microorganismos obtienen energía para el mantenimiento de las células y la síntesis de nuevo tejido celular. Simultáneamente, otra fracción del desecho se convierte en tejido celular nuevo empleando la energía liberada durante la oxidación. Por último, cuando se consume la materia orgánica, las nuevas células empiezan a consumir su propio

tejido celular con el fin de obtener energía para el mantenimiento celular (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Tabla 14. DBO inicial, final y porcentaje de su remoción

PARÁMETRO	ZONA 1	ZONA 2
DBO inicial (mg/l)	172.17 ± 12.16	172.5 ± 0.11
DBO final (mg/l)	164.5 ± 13.66	162.0 ± 3.09
Remoción de DBO (%)	4.52 ± 1.22 ^a	4.86 ± 1.82 ^a

Datos promedio ± desviación estándar de tres réplicas para cada zona de estudio.

a, b en porcentajes de remoción son significativamente diferentes con $p < 0.05$ (ANOVA, Tukey)

Esta prueba es una de las más importantes en las actividades de control de contaminación de aguas, donde la carga orgánica debe ser restringida para mantener los niveles de oxígeno disuelto. Esta determinación se usa también en estudios para medir la capacidad de purificación y sirve a las autoridades para regular la calidad de los efluentes descargados a las aguas (Henry y Heinke, 1999).

Como puede apreciarse en la Tabla 14, la remoción de DBO en el presente trabajo se presentó en un valor bajo, en comparación con la remoción de turbidez. Esto es contrastante con lo obtenido por Cáceres y Díaz (2005) al aplicar un extracto acuoso de las semillas de moringa en un tratamiento de aguas de desecho para una industria química de adhesivos, donde los autores reportan un porcentaje de remoción de turbidez del 97.06%. En este mismo trabajo se demuestra que las semillas de moringa deben utilizarse para el tratamiento fisicoquímico, una vez se les haya retirado la grasa (aceite), pues así es como reduce mejor la turbidez y la DBO.

Sin embargo, la diferencia con lo reportado por Cáceres y Díaz (2005) puede estar atribuida a la naturaleza química de las aguas residuales tratadas. En el caso del agua residual del presente trabajo, la DBO puede no estar completamente asociada a los componentes que coagulan y flocculan en el tratamiento fisicoquímico. Así, al ser un agua residual con una alta carga orgánica, para su tratamiento integral podría requerirse un tratamiento biológico (tratamiento secundario) que reduzca su DBO a niveles permisibles para su disposición final.

7.4.3 Sólidos totales

Los resultados de la remoción de sólidos totales se muestran en la Tabla 15. Los sólidos totales incluyen a los sólidos sedimentables y a los sólidos suspendidos en las muestras de agua residual. Estos se componen por las partículas orgánicas e inorgánicas que arrastra el agua. Las partículas coloidales que no se asientan con facilidad, causan la turbidez de muchas aguas superficiales y residuales. Los sólidos orgánicos suspendidos también pueden ejercer una demanda de oxígeno, aunque no necesariamente. La importancia de eliminar cargas excesivas de estos sólidos en cuerpos de agua es porque estos aumentan su turbidez, disminuye la penetración de la luz y con frecuencia aumenta la población bacteriana (Davis y Masten, 2005). Como puede apreciarse, los sólidos totales se redujeron en un gran porcentaje, mismo que supera el 97% utilizando las semillas de la Zona 1 y el 93% para la zona 2. Estos resultados son consistentes con la remoción de turbidez, por lo que puede aseverarse que estos dos parámetros guardan una relación muy estrecha.

Tabla 15. Sólidos totales iniciales, finales y porcentaje de su remoción

PARÁMETRO	ZONA 1	ZONA 2
ST inicial (mg/l)	24.49 ± 0.8	22.89 ± 1.00
ST final (mg/l)	0.71 ± 0.11	1.38 ± 0.26
Remoción de ST (%)	97.11 ± 0.36 ^a	93.95 ± 1.31 ^b

Datos promedio ± desviación estándar de tres réplicas para cada zona de estudio.

a, b en porcentajes de remoción son significativamente diferentes con $p < 0.05$ (ANOVA, Tukey)

Melo y Turriago (2012) estudiaron la efectividad coagulante de *Moringa oleífera* como una alternativa de biorremediación en la purificación de aguas superficiales de su región. Para ello, manejaron dosificaciones de 300 mg/L del coagulante en muestras de agua con una turbidez de 230 NTU. Al realizar las pruebas aplicando la dosis óptima del coagulante, demostraron que esta planta natural es altamente eficiente debido a que presenta una modificación benéfica en los sólidos totales, pasando de 140 mg/l a 80 mg/l, lo que se traduce en un 42.85% de remoción, lo cual ofrece una posibilidad viable y eficiente para las fuentes hídricas contaminadas.

Por su parte, Cáceres y Díaz (2005) en su investigación sobre el efecto del uso de semillas de moringa sobre aguas de desecho de una industria de adhesivos, reportaron un porcentaje de remoción de sólidos totales del 75%, siendo entonces el porcentaje de remoción obtenido en este trabajo muy superior aplicando semillas de moringa en aguas residuales acuícolas.

7.4.4 Dureza

Los resultados de la remoción de dureza se presentan en la Tabla 16. La dureza se define como la suma de cationes polivalentes. Las muestras de agua residual acuícola presentaron una dureza en el rango de 273 a 308 mg/l, lo que las ubica dentro de la clasificación de aguas muy duras según la Water Quality Association (Davis y Masten, 2005). Estos valores de dureza resultaron superiores a los de las aguas residuales tratadas por Bhuptawat *et al.* (2007) mediante un tratamiento fisicoquímico que incorporó a las semillas de moringa, con un rango de 44 a 49 mg/l de dureza.

En un trabajo realizado por Muyibi y Evison (1995), se utilizó una suspensión de semillas de moringa para el ablandamiento de aguas duras. Sin embargo, ellos no utilizaron aguas residuales, sino aguas con turbidez sintética. En este trabajo, con una dosis similar de su suspensión de moringa y una muestra con 300 mg/l de dureza inicial, lograron una remoción de la misma del 15.9 %, lo cual no es muy

distante a lo obtenido en el presente trabajo con el uso de las semillas de la zona 2. En este mismo trabajo se concluyó que la remoción de dureza con moringa es independiente del pH del agua tratada.

Tabla 16. Dureza inicial, final y porcentaje de su remoción

PARÁMETRO	ZONA 1	ZONA 2
Dureza inicial (mg de CaCO_3/l)	273.67 ± 13.53	307.55 ± 12.44
Dureza final (mg de CaCO_3/l)	267.56 ± 15.14	275.66 ± 7.51
Remoción de dureza (%)	2.26 ± 1.92^a	10.26 ± 4.44^b

Datos promedio $\pm$ desviación estándar de tres réplicas para cada zona de estudio.

a, b en porcentajes de remoción son significativamente diferentes con $p < 0.05$ (ANOVA, Tukey)

7.4.5 pH y conductividad

Los resultados del pH y conductividad antes y después del tratamiento con semillas de moringa se muestran en las tablas 17 y 18 respectivamente. La leve disminución en el pH de todas las muestras de agua puede deberse a la precipitación de productos insolubles de la reacción entre la *Moringa oleifera* y los iones que causan dureza, similares al ablandamiento de la precipitación con cal/ sosa. Las semillas de *Moringa oleifera* parecen tener una ligera capacidad de amortiguación natural.

Tabla 17. pH al inicio y al final del tratamiento con moringa

PARÁMETRO	ZONA 1	ZONA 2
pH inicial	7.76 ± 0.27	7.84 ± 0.21
pH final	7.31 ± 0.11^a	7.46 ± 0.22^a

Datos promedio $\pm$ desviación estándar de tres réplicas para cada zona de estudio.

a, b en pH final son significativamente diferentes con $p < 0.05$ (ANOVA, Tukey)

Cabe mencionar que en el trabajo realizado por Mendoza *et al.* (2000) para el tratamiento de aguas con turbidez sintética, se observó una variación mínima en el pH y la alcalinidad de las aguas tratadas con *Moringa oleífera* lo cual es consistente con los resultados del presente trabajo. Asimismo, Mas y Rubí *et al.* (2011) en su investigación sobre la calidad de efluentes domésticos tratados con moringa, reportaron que los valores de alcalinidad y pH no se vieron afectados con la aplicación de la solución coagulante.

Tabla 18. Conductividad inicial, final y porcentaje de su remoción

PARÁMETRO	ZONA 1	ZONA 2
Conductividad inicial ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	682.89 ± 4.01	653.77 ± 24.17
Conductividad final ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	619.78 ± 12.54	581.66 ± 18.41
Remoción de conductividad (%)	9.23 ± 2.34^a	11.02 ± 0.65^a

Datos promedio $\pm$ desviación estándar de tres réplicas para cada zona de estudio.

a, b en porcentajes de remoción son significativamente diferentes con $p < 0.05$ (ANOVA, Tukey)

La conductividad se refiere a la capacidad de conducir electricidad y está asociada al contenido de sales en el agua. Así, el porcentaje de remoción de la misma se traduce en un porcentaje de remoción de salinidad. Las muestras de agua residual acuícola presentaron una conductividad entre 650 y 690 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El agua destilada tiene una conductividad cercana a 0.055 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el agua potable entre 50 y 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el agua de mar llega a los 50 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En este sentido, es importante evitar las descargas de aguas residuales con elevados niveles de conductividad, ya que estas pueden aumentar la concentración de cloruros, nitratos y sulfatos, u otros iones en cuerpos receptores (APHA, 1998).

Las mediciones de pH y conductividad realizadas en el presente trabajo demuestran que no existen alteraciones significativas de ninguno de estos parámetros como respuesta a las aplicaciones de *M. oleífera*, contrario a lo observado por Tenorio *et*

al. (2008) con la aplicación de sulfato de aluminio en muestras artificiales y naturales de agua, donde a causa de este coagulante químico, sí se presentó un cambio de pH de 6.2 a 4.9, además de una variación en la conductividad desde un valor inicial de 47.65 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta un valor final promedio fue de 148.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En la Figura 12, se muestra un resumen de los resultados del efecto coagulante de las semillas de ambas zonas de estudio. Los mejores resultados en la clarificación de aguas residuales acuícolas, obtenidos por las semillas de moringa cosechadas en la zona de estudio 1, se atribuyen a un mayor contenido de proteína en dichas semillas, dada la naturaleza peptídica del coagulante natural presente en las semillas.

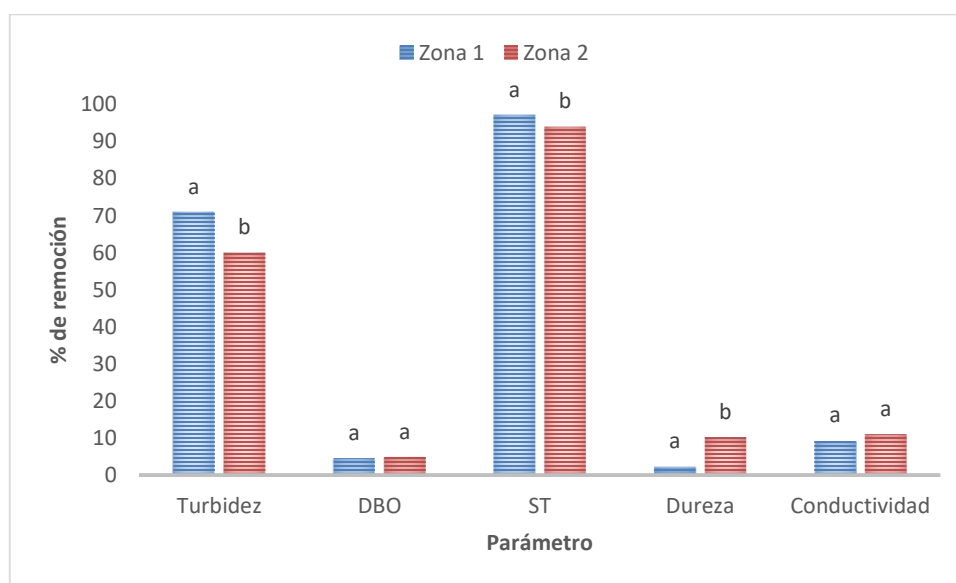


Figura 13. Remoción de los parámetros estudiados para las semillas de ambas zonas de estudio. (a, b son significativamente diferentes con $p < 0.05$; ANOVA, Tukey)

8. CONCLUSIONES

La caracterización proximal de las semillas de moringa realizada con muestras cultivadas en dos zonas de la región central del estado de Veracruz demostró que contienen en promedio $2.92 \pm 2.17\%$ de humedad, $39.9 \pm 2.17\%$ de proteína, $37.05 \pm 0.64\%$ de grasa (aceite), $2.97 \pm 0.31\%$ de ceniza y $10.64 \pm 1.59\%$ de carbohidratos totales. El contenido de aceite en dichas semillas es superior a lo reportado para las semillas de *Moringa oleifera* de otras partes del mundo.

Las variables asociadas al clima (menor precipitación pluvial, mayor radiación solar) y las asociadas al suelo (pH cercano a neutro, textura arenosa y composición salina rica en nitrógeno en forma de nitratos y nitritos) ejercen un efecto benéfico sobre la composición química de las semillas de moringa de la zona 1, mismas que presentaron un mayor contenido de proteína y, a consecuencia, un mayor efecto clarificante sobre aguas residuales acuícolas.

Las semillas de moringa cultivadas en la zona 1 de estudio (zona centro de la ciudad de Veracruz), alcanzaron una destacada remoción de turbidez de $70.92 \pm 2.21\%$, y de sólidos totales del $97.11 \pm 0.36\%$ en aguas residuales acuícolas. Se recomienda un tratamiento biológico complementario para la remoción de la DBO. Las semillas de moringa parecen tener un ligero efecto amortiguador en aplicarse en las aguas residuales y no alteran su conductividad como es el caso de los coagulantes químicos tradicionales.

Se demostró que las semillas de *Moringa oleifera* de la región de Veracruz, presentan alto potencial para ser utilizadas en el tratamiento integral de aguas residuales de la industria acuícola.

9. LITERATURA CITADA

- Abdulkarim, S.M., Long, K., Lai, O.M., Muhammad, S.K.S., Ghazali, H.M. (2005). Some physico-chemical properties of *Moringa oleífera* seed oil extracted using solvent and aqueous enzymatic methods. *Food Chemistry*, 93: 253-263.
- Adrover S. (2014). Influencia del entorno agroclimático sobre la calidad del aceite de oliva. Nuevas estrategias para su conservación y para el aprovechamiento de los subproductos de la industria oleícola. Tesis de Doctorado, Universitat de les illes balears. Departamento de Química. Palma de Mallorca, España.
- Agosta, E., Cavagnaro, M., Canziani, P. (2010). El rendimiento de la vid y las variaciones de temperatura y precipitación en Mendoza. *Enología*, 7: 1-12.
- Amagloh, F.K., Benang, A. (2009). Effectiveness of *Moringa oleífera* seed as coagulant for water purification. *African Journal of Agricultural Research*, 4(1), 119-123.
- Anwar F., Bhanger M. I. (2003). Analytical characterization of *Moringa oleifera* seed oil grown in temperate regions of Pakistan. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51: 6558-6563.
- Anwar F., Rashid U. (2007). Physico-chemical characteristics of *Moringa oleifera* seeds and seed oil from a wild provenance of Pakistan. *Pakistan Journal Botanic*, 39 (5): 1443-1453.
- AOAC, 1995. Official Methods of Analysis. *Association of Official Analytical Chemists*. Washington, D.C., USA.
- APHA. 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater. *American Public Health Association*, Washington. 1265 pp.

- Asrafuzzaman, M.D., Fakhuruddin, A.N.M., Alamgir Hossain, M.D. (2011). Reduction of turbidity of water using locally available natural coagulants. *Int. Scholarly Res. Network. ISRN Microbiology*. Article ID 632189. 6p.
- Barakat H., Ghazal G. A. (2016). Physicochemical properties of *Moringa oleifera* seeds and their edible oil cultivated at different regions in Egypt. *Food and Nutrition Sciences*, 7: 472-484.
- Broin, M., Santaella, C., Cuine, S., Kropp, K., Peltier, G., Joët, T. (2002). Flocculant activity of a recombinant protein from *Moringa oleifera* Lam seeds. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 60: 114 – 119.
- Bhuptawat, H., Folkard, G.K., Chaudhari, S. (2007). Innovative physico-chemical treatment of wastewater incorporating *Moringa oleifera* seed coagulant. *Journal of Hazardous Materials*, 142: 477 – 482.
- Cáceres, C. M., Díaz J. C. (2005). Propuesta de tratamiento de aguas de desecho de una industria química de adhesivos utilizando extracto acuoso de la semilla de *Moringa oleifera* (Teberinto). Tesis de Licenciatura, Universidad de El Salvador. Facultad de química y farmacia. San Salvador, El Salvador.
- Caldera Y., Mendoza I., Briceño L., García J., Fuentes L. (2007). Eficiencia de las semillas de *Moringa oleifera* como coagulante alternativo en la potabilización del agua. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 41(2): 244-254.
- Canvin D. T. (1965). The effect of the temperature on the oil content and fatty acid composition of the oils from several oil seed crops. *Canadian Journal of Botany*, 43: 63-69.
- Chaparro S. P., Tavera M. L., Martínez J. J., Gil J. H. (2014). Propiedades funcionales de la harina y de los aislados proteicos de la semilla de guanábana (*Annona muricata*). *Rev. U.D.CA Act. & Div. Cient.* 17(1): 151-159.

- CONAPESCA (2015) Ley General de Pesca y Acuacultura Sustentables. Recuperado en (<https://www.gob.mx/conapesca/documentos/ley-general-de-pesca-y-acuacultura-sustentables>) el 01 de enero de 2019
- CONAPESCA (2018) Acuacultura con una mayor de impacto social. Recuperado en (<https://www.gob.mx/conapesca/articulos/en-el-2019-se-impulsara-la-acuacultura-con-una-vision-de-mayor-impacto-social-conapesca-186183>) el 01 de enero de 2019
- Crites R., Tchobanoglous G. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. McGraw Hill. España.
- Davis M.L. Masten S. J. (2005). Ingeniería y Ciencias ambientales. McGraw Hill. México DF.
- de la Peña M. E., Ducci J., Zamora V. (2013). Tratamiento de aguas residuales en México. Banco Interamericano de Desarrollo, Sector de Infra-estructura y Medio Ambiente. NOTA TÉCNICA # IDB-TN-521.
- El-Mubarak A., Abdel-Galiele N.E., Salih F.A., Ghorashi A.M. (1998). The effect of time of harvest on seed yield and its components. FABIS – Newsletter (ICARDA). *Faba bean information service*, 20: 33-36.
- Florez, A. (2007). Efectos genéticos, ambientales y de interacción sobre componentes químicos relacionados con el valor sensorial de las judías grano (*Phaseolus vulgaris* L.). Tesis de Doctorado, Universitat Politècnica de Catalunya. Departamento de ingeniería agroalimentaria y biotecnología. Barcelona, España.
- Folkard, G., Sutherland, J. (1996). *Moringa oleífera*: un árbol con enormes potencialidades. *Agroforestry Today*, 8(3), 5-8.
- Folkard, G., Southerland, J., Al-Khalili, R.S. (2001). Water clarification using *Moringa oleífera* seed coagulant. In: The miracle tree. The multiple attributes of

moringa. L.J. Furglie (Ed). Church World Service; Dakar, Senegal. Pp: 29 – 43.

García B., Arnal J. M., Alandia S. (2012). Estudio de la descontaminación de efluentes líquidos con elevada concentración de metales pesados mediante bioadsorbentes de *Moringa oleifera*. *XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, pp. 1098-1108.

García Torres A. G., Martínez Cubias R. K. M., Rodríguez Díaz I. (2013). Evaluación de los Usos Potenciales del Teberinto (*Moringa oleifera*) como Generador de Materia Prima para la Industria Química. Tesis de Licenciatura, Universidad del Salvador, San Salvador.

Ghebremichael, K.A., Gunaratna, K.R., and Dalhammar, G. (2006). Single-step ion exchange purification of the coagulant protein from *Moringa oleifera* seed. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 70: 526 –532.

Guzmán L., Villabona A., Tejada C., García R. (2013). Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión. *Rev. U.D.C.A Act & Div. Cient.*, 16(1): 253-262.

Henry J.G. Heinke G. W. (1999). Ingeniería Ambiental. Pearson Educación. México DF.

Iqbal, M. 1991. NTFPs: a study on their income generation potential for rural women in North-West Frontier Province (NWFP), Pakistan. Planning and Development Department, Govt. of NWFP and ILO. Peshawar.

Iqbal S., Bhanger M. I. (2006). Effect of season and production location on antioxidant activity of *Moringa oleifera* leaves grown in Pakistan. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19: 544-551.

- Iturbide K. (2008). Caracterización de los efluentes de dos sistemas de producción de tilapia y el posible uso de plantas como agentes de biorremediación. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos, Guatemala.
- Jongrungruangchok S., Bunrathep S., Songsak T. (2010). Nutrients and minerals content of eleven different samples of *Moringa oleifera* cultivated in Thailand. *International Journal of Health Research*, 24 (3): 123-127.
- Katayon S., Noor M. J., Asma M., Ghani L.A., Thamer A.M., Azni I., Ahmad J., Khor B.C., Suleyman A.M. (2006). Effects of storage conditions of *Moringa oleifera* seeds on its performance in coagulation. *Bioresour Technol.* 97(13): 1455-1460.
- Kumasi, P., Sharma, P., Srivastava, S., Srivastava, M.M. (2005). Arsenic removal from the aqueous system using plant biomass: a bioremedial approach. *Journal of Indian Microbiology and Biotechnology*, 32: 521 –526.
- Lédo, P., Lima, R., Paulo, J., Duarte, M. (2009). Estudio comparativo de sulfato de aluminio y semillas de *Moringa oleifera* para la depuración de aguas con baja turbiedad. *Información Tecnológica*, 20(05), 3-12.
- Lezama-Cervantes C., Paniagua-Michel J. J., Zamora-Castro J. (2010). Biorremediación de los efluentes de cultivo del camarón *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) utilizando tapetes microbianos en un sistema de recirculación. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 38(1): 129-142.
- Makkar, H.P.S., Becker, K. (1997). Nutrients and antiquality factors in different morphological parts of the *Moringa oleifera* tree. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 128, 311-322.
- Marioli, C. G. (2016). Variabilidad de la calidad nutricional de soja en Argentina por efecto ambiental. Evaluación nutricional y sensorial de tofu como producto

derivado. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Córdoba. Escuela para graduados. Córdoba, Argentina.

- Martín, C., Martín, G., García, A., Fernández, T., Hernández, E., Puls, J. (2013). Potenciales aplicaciones de *Moringa oleifera*. Una revisión crítica. *Pastos y Forrajes*, 36(2):137-149.
- Mas y Rubí, M., Carrasquero, S., Martínez, D., Mejías, D.G., Vargas, L. (2013). Eficiencia de las semillas de *Moringa oleífera* como coagulante orgánico en la remoción de metales en aguas de baja turbiedad. *Revista Tecnocientífica URU*, 5:23-37.
- Megahed, O. A. (2001). Fracctionation of commercial hexane and use of its fractions as extracting solvent of cotton seed oil. *Grasas y Aceites*, 52(2):110-114.
- Melo, G., Turriago, F. (2012). Evaluación de la eficiencia de la utilización de semillas de *Moringa oleifera* como una alternativa de biorremediación en la purificación de aguas superficiales del caño Cola de pato ubicado en el sector rural del municipio de Acacias. Tesis de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia Villavicencio, Colombia. pp. 51-60, 2012.
- Mendoza, I., Fernández, N., Ettiene, G., Díaz, A. (2000). Uso de la *Moringa oleífera* como coagulante en la potabilización de aguas. *Ciencia*, 8(2):235-242.
- Mihelcic, J. R. y Zimmerman, J. B. (2012). *Ingeniería Ambiental: Fundamentos, Sustentabilidad, Diseño*. México D.F.: Alfaomega.
- Morales F.D., Méndez R., Tamayo M. (2009). Tratamiento de Aguas Residuales de Rastro Mediante Semillas de *Moringa oleifera* Lam como Coagulante. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10: 223-529.
- Muñoz, A. (2008). Caracterización y tratamiento de aguas residuales. Monografía de Licenciatura, Universidad Autónoma del estado de Hidalgo. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Mineral de la Reforma, Hidalgo.

- Muyibi S., Evison L. (1995). *Moringa oleifera* seeds for softening hardwater. *Water Resources*. 4:1099-1105.
- Núñez, A. L. (2015). Caracterización de la problemática de las aguas residuales en Ixmiquilpan Hidalgo. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Metropolitana. División de Ciencias Sociales y Humanidades. México.
- Núñez, E. (2007). Validación de la efectividad de la semilla de *Moringa oleífera* como coagulante natural del agua, destinada al consumo humano, Morocelí, Honduras. Tesis de licenciatura. Zamorano, Honduras.
- Olayemi A. B., Alabi R. O. 1994. Studies on Traditional Water Purification Using *Moringa oleifera* Seeds. *African Study Monographs*. 15(3): 135-142.
- Olson, M., Fahey, J. (2011). *Moringa oleifera*: un árbol multiusos para las zonas tropicales secas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82, 1071-1082.
- Özakar, M., Sengil, I.A. (2001). The use of tannins from turkish acorns (Valonia) in wáter treatment as a coagulant and coagulant aid. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Science*, 26: 255 – 263.
- Pardo, S., Suárez, H., Soriano, E. (2006). Tratamiento de efluentes: una vía para la acuicultura responsable. *Revista MVZ Córdoba*, 11, 20-29.
- Parrota, J. (1993). *Moringa oleífera* Lam. Resedá, árbol del rábano. New Orleans, LA: U.S. Departament of agriculture, Forest service, Southern Forest Experiment Station, 6p.
- Pritchard M., Mkandawire T., Edmondson A., O'Neill J., Kululanga G. (2009). Potential of using plant extracts for purification of shallow well water in Malawi. *Phys. Chem. Earth*, 34: 799-805.
- Raffo E., Ruiz E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Revista de la facultad de ingeniería industrial UNMSM*, 17(1): 71-80.

- Ramírez H., Jaramillo J. (2015). Agentes Naturales como Alternativa para el Tratamiento del Agua. *Universidad Militar Nueva Granada*, 11(2): 136-153.
- Reyes, M. (2018). Efecto de las variables agroclimáticas sobre las características fisicoquímicas del aceite de semillas de *Moringa oleifera* Lam. para producir biodiesel. Tesis de Maestría, Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Boca del Río. Boca del Río, Veracruz, México.
- Rodríguez, J.R., Sánchez, D.I., López, J., Núñez, J.A., Sánchez, R.G., Correa, M.A. (2012). *Moringa oleifera* seed extract in the clarification of surface waters. *International Journal of Environmental Protection*, 2(11), 17-7.
- Ruiz, E., Francisco, H., Marrero, P., Cruz, O., Murillo, B., García, J.L. (2008). Influencia de los factores agroclimáticos en la productividad de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) en una zona árida de Baja California Sur, México. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(1), 44-47.
- Sánchez, J., González, M., Beltrán, J. (2010). Surface water treatment with tannin-based coagulant from Quebracho (*Schippopsis balansae*). *Chem. Eng. J.* 165:851-858.
- Sandoval, M. M. y Laines, J. R. (2013). *Moringa oleifera* una alternativa para sustituir coagulantes metálicos en el tratamiento de aguas superficiales. Ingeniería. *Revista Académica de la FI-UADY*, 17(2), 93-101.
- Saxena D. K., Sharma S. K., Sambi S. S. (2011). Comparative extraction off cottonseed oil by n-Hexane and Ethanol. *Electronic Journal of Engineering and Applied Sciences*. 6(1): 84-89.
- Shih M. C., Chang C. M., Kang S. M., Tsai M. L. (2011). Effect of different parts (leaf, stem and stalk) and seasons (summer and winter) on the chemical compositions and antioxidant activity of *Moringa oleifera*. *International Journal of Molecular Sciences*, 12: 6077-6088.

- Tenorio E., Núñez E., Guzmán R. (2008). Validación de la aplicación de la semilla de *Moringa oleífera* producida en el sur de Honduras como coagulante natural del agua destinada a consumo humano en la Región del Yeguaré, Honduras. Escuela Panamericana, EAP-Zamorano. Programa de Investigación para el Desarrollo – PRIDE. Tegucigalpa, Honduras.
- Vázquez León L., Robles Olvera V., García Alvarado M., Pérez Vázquez A., Valdés Rodríguez O. A., Rodríguez Jiménez G. (2017). Variation in bioactive compounds and antiradical activity of *Moringa oleífera* leaves: Influence of climatic factors, tree age and soil parameters. *European Food Research and Technology*, DOI 10.1007/s00217-017-2868-4.
- Velasco Amaro P.I., Calvario Martínez O., Pulido Flores G., Acevedo Sandoval O., Castro Rosas J., Román-Gutiérrez A. D. (2012). Problemática Ambiental de la Actividad Piscícola en el Estado de Hidalgo, México. *Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*. 16(3): 165-174.
- Yarahmadi M., Hossieni M., Bina B., Mahmoudian M. H., Naimabadie A., Shahsavani A. (2009). Application of *Moringa oleífera* seed extract and polyaluminum chloride in water treatment. *World Applied Sciences Journal*, 7(8): 962-967.
- Wen Y., Tang M., Sun D., Zhu H., Wei J., Chen F., Tang L. (2012). Influence of climatic factors and soil types on seed weight and oil content of *Jatropha curcas* in Guangxi, China. *Procedia Environmental Sciences*, 12: 439-444.
- Zamarripa Colmenero A., Martínez Valencia B. B., Solís Bonilla J. L., López A. (2011). Calidad fisicoquímica de insumos bioenergéticos para la producción de biodiesel en México. Folleto técnico No 24. SAGARPA INIFAP. Campo experimental Rosario Izapa, Tuxtla Chico, Chiapas, México.