



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Ambiental

“EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA CAPACIDAD CLARIFICADORA ENTRE LOS BIOCOAGULANTES EXTRAÍDOS DE LA PAPA (*Solanum Tuberosum*) Y LA TUNA (*Opuntia ficus-indica*) EN EL TRATAMIENTO DE AGUA DEL RÍO RÍMAC”: Una revisión de la literatura científica

Trabajo de investigación para optar al grado de:

Bachiller en Ingeniería Ambiental

Autor:

Sergio Gonzalo Melgarejo Uribe

Asesor:

M. Sc. Rosa Amelia Coronado Falcon

Lima - Perú

2020

DEDICATORIA

A mis padres, quienes son mi inspiración, por sus consejos, su confianza, su apoyo,
por motivarme a superarme cada día y poder llegar a cumplir mis metas.

A mis hermanos, quienes fueron un gran apoyo emocional y a los que debo ser un
ejemplo a seguir.

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento a la profesora Rosa Coronado Falcon, por su amabilidad y dedicación que ha contribuido a la realización de este trabajo.

Al profesor Rodolfo Gonzalez Andrade por su dedicación y disposición para lograr este proyecto.

A todos los profesores, que durante mi tiempo de estudiante compartieron sus conocimientos para lograr cumplir mis metas.

Tabla de contenido

| | |
|--|-----------|
| DEDICATORIA | 2 |
| AGRADECIMIENTO | 3 |
| ÍNDICE DE TABLAS | 5 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 6 |
| RESUMEN | 7 |
| CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN | 8 |
| CAPÍTULO II. METODOLOGÍA | 17 |
| CAPÍTULO III. RESULTADOS | 22 |
| CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES | 29 |
| REFERENCIAS..... | 31 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Poceraje de artículos usados según buscador..... | 17 |
| Tabla 2. Criterios de búsqueda de información | 18 |
| Tabla 3. Tabla de artículos seleccionados | 19 |
| Tabla 4. Tabla de artículos excluidos | 21 |
| Tabla 5. Cantidad de artículos según rango de año de publicación | 22 |
| Tabla 6. Cantidad de artículos según conjunto de información | 23 |
| Tabla 7. Resultados de coagulantes naturales de artículos consultados..... | 24 |
| Tabla 8. Coagulantes naturales estudiados por países | 25 |
| Tabla 9. Coagulantes químicos y naturales más conocidos | 27 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Conjuntos de información usadas en la revisión | 19 |
| Figura 2 Fuentes de biocoagulantes según artículos revisados | 26 |

RESUMEN

El presente documento describe la revisión de literatura científica de investigaciones acerca del uso de coagulantes naturales (biocoagulantes) en la remoción de turbidez de aguas superficiales y aguas turbias artificiales. Se recogieron investigaciones en donde se utilizó a la papa (*Solanum tuberosum*), la tuna (*Opuntia ficus indica*) y otros coagulantes naturales.

Los objetivos de la presente investigación fue analizar la capacidad clarificadora de la tuna y la papa como coagulantes naturales, identificar cuál de estos dos coagulantes tiene mejor eficiencia y contabilizar las metodologías de coagulantes naturales en tratamiento de agua.

La recolección de artículos se hizo utilizando artículos publicados entre el año 2006 al 2020, en idioma español, inglés y portugués. Las fuentes consultadas fueron: Google Académico, Scielo, Science Direct y Redalyc. El criterio de selección de artículos fue principalmente que tengan el mismo objetivo que el presente documento y que hayan logrado buenos resultados en la remoción de turbidez.

Se seleccionaron un total de 19 artículos, en donde se demuestra que el coagulante natural de la tuna tiene una mejor eficiencia que el coagulante natural de la papa; así también se demostró que otros coagulantes naturales tienen una mejor eficiencia que los coagulantes naturales antes mencionados.

PALABRAS CLAVES: Revisión sistemática, coagulación, tratamiento de agua, biocoagulante, coagulante natural.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los elementos más importantes para la vida y, por actividades del hombre, su calidad se viene alterando, llegando a ser tan altas que causan que el agua no sea apta para consumo humano. Estas actividades provocan que los sistemas para su potabilización sean más complejos para poder cumplir los estándares bacteriológicos y fisicoquímicos (Chulluncuy, 2011). Estos procesos complejos implican mayores costos para la potabilización del agua.

La creciente demanda de nuevas tecnologías de tratamiento de agua ha centrado la atención en los métodos que usan productos naturales como materia prima. En el caso de Perú, es importante desarrollar alternativas ecológicas en el tratamiento de aguas. Este enfoque en los métodos naturales es importante en nuestro país, ya que gracias a la Cordillera de Los Andes, las Corrientes de Humboldt y la del Niño somos un país megadiverso lo que permite ser potencialmente desarrolladores de métodos naturales de tratamiento de agua por la riqueza y abundancia de especies.

Investigaciones anteriores demostraron que los coagulantes naturales (biocoagulantes) son efectivos logrando una reducción en la turbidez entre 67.73% hasta 78.72% (Saritha, Kumar y Kavitha, 2019). Estos resultados demuestran que el uso de coagulantes naturales es un potencial método en la clarificación de aguas superficiales.

El agua del río Rímac tiene alta turbiedad, principalmente en época de avenida, por lo que se utiliza una mayor cantidad de recursos para su potabilización, en el caso de coagulante se usa comúnmente el Sulfato de Aluminio. Para minorar los costos se pueden utilizar métodos naturales alternos como el caso de coagulantes hechos a partir del almidón de la papa y de la tuna.

Una operación para disminuir la turbidez del agua en su tratamiento es la coagulación y floculación. “El proceso de coagulación reduce la carga negativa, contribuyendo a la agregación de partículas para formar microfloculos” (Ramirez y Jaramillo, 2015). Los coagulantes neutralizan las cargas de las partículas coloidales presentes en el agua para que posteriormente sean aglomeradas en la floculación.

La finalidad de la coagulación en el tratamiento de agua es poder clarificarla, eliminando así la materia orgánica disuelta. Mihelcic y Zimmerman (2012), afirman:

Los procesos de coagulación y floculación tienen como objetivo eliminar partículas y materia orgánica disuelta en agua natural, con el fin de mejorar los aspectos estéticos y de salud del agua. El principal mecanismo de coagulación / floculación de los polímeros es la acción de barrido debido a su alto peso molecular y a la gran cantidad de segmentos en sus cadenas. (Como se citó en Buenaño, Vera y Aldás, 2019)

La calidad y aspecto del agua es mejorada luego del proceso de coagulación, gracias a que los polímeros de los coagulantes neutralizan las cargas de las partículas suspendidas.

Podemos clasificar a los coagulantes según su naturaleza, pueden ser coagulantes naturales o coagulantes químicos. En el tratamiento de aguas a gran escala los más usados son los coagulantes químicos, como por ejemplo: Sulfato de aluminio, cloruro férrico, etc.

Los coagulantes químicos, a partir de las partículas coloidales, originan flóculos más grandes que pueden sedimentar fácilmente. “Son materiales químicos que se adicionan al agua para lograr la descarga de todas las partículas coloidales dando origen a la formación de medios más grandes (flóculos), que sedimentan más rápidamente” (Cogollo. 2009). La

capacidad de neutralizar las cargas de estos coagulantes han impulsado a que existan diferentes tipos en el mercado.

Los coagulantes químicos más usados son principalmente las sales de aluminio y hierro, estos productos forman los flóculos que pueden precipitarse. Renault et al. (2009) afirma:

Los principales coagulantes utilizados para desestabilizar las partículas y producir el floc son: a) Sulfato de Aluminio. b) Aluminato de Sodio. c) Cloruro de Aluminio. d) Cloruro Férrico. e) Sulfato Férrico. f) Sulfato Ferroso. g) Polielectrolitos (Como ayudantes de floculación). Siendo los más utilizados las sales de Aluminio y de Hierro; cuando se adiciona estas sales al agua se producen una serie de reacciones muy complejas donde los productos de hidrólisis son más eficaces que los iones mismos; estas sales reaccionan con la alcalinidad del agua y producen los hidróxidos de aluminio o hierro que son insolubles y forman los precipitados. (Como se citó en Ramírez y Jaramillo, 2015, p. 5)

Los hidróxidos precipitan como resultado de las reacciones ocasionadas por la adición de las sales de aluminio y hierro al agua a tratar.

Los coagulantes químicos son capaces de neutralizar las cargas eléctricas de las partículas en suspensión que se encuentran en el agua y por lo general son compuestos químicos inorgánicos. “Los coagulantes sintéticos se han utilizado ampliamente en los procesos convencionales de tratamiento de aguas, especialmente en las etapas de coagulación / floculación, filtración y sedimentación” (Valverde, Paccola, Pomini, Yamaguchi y

Bergamasco, 2019). Los coagulantes químicos son usados principalmente en el proceso de coagulación, pero también en diferentes etapas del tratamiento de aguas.

Los coagulantes químicos son usados frecuentemente para el tratamiento de aguas y tratamiento de aguas residuales. La desestabilización de partículas presentes en el agua es gracias a la adición de coagulantes químicos en el proceso de coagulación – floculación (Riaños, Meza y Mercado, 2019). El uso de los coagulantes químicos se da en el tratamiento de aguas y tratamiento de aguas residuales.

Dentro de los coagulantes químicos más utilizados está el sulfato de Aluminio. “El sulfato de aluminio (alumbre) es el coagulante más popularmente utilizado en el tratamiento de aguas residuales, debido a su accesibilidad, rentabilidad y una eficiencia establecida” (Jagaba, et al., 2020). Tanto en el tratamiento de agua como en el tratamiento de aguas residuales el sulfato de aluminio es usado como coagulante.

Los coagulantes naturales (biocoagulantes) son una alternativa ecológica en el tratamiento del agua. Riaño et al. (2019), afirma. “Los coagulantes naturales son una nueva alternativa para los procesos de clarificación, porque son amigables con el medio ambiente, no son tóxicos y son renovables”. El uso de coagulantes naturales significa una disminución en el impacto al ambiente.

Dentro de los tipos de coagulantes naturales se encuentran aquellos que son de almidón extraídos de diferentes especies vegetales. Un producto natural con esta propiedad es el almidón de plátano, se evaluó su efectividad y después de la prueba de jarras se concluyó que es efectivo como ayudante de la floculación (Trujillo et al., 2013). En general los polímeros como el almidón tienen la característica de neutralizar cargas eléctricas de las partículas coloidales presentes en el agua.

Otro producto natural usado como coagulante-floculante es la semilla de tamarindo.

Investigaciones comparan el desempeño de los coagulantes naturales frente a los coagulantes químicos. En el año 2010, Gurdíán y Coto realizaron una comparación entre la semilla de tamarindo, sulfato de aluminio y cloruro de hierro, obteniendo como resultado que la semilla de tamarindo puede ser un sustituto de los coagulantes naturales para la remoción de DQO.

Según investigaciones, el coagulante natural de mayor eficacia es el de semilla de Moringa (*Moringa oleífera*). Aguirre, Piraneque y Cruz (2018) señalaron que con dosis de 1.5, 2.0 y 2.5 g/L la *M. oleífera* mostró una reducción de 95 y 92% de turbidez y de color, respectivamente. Esta investigación demuestra que los coagulantes naturales presentan buenos resultados en la reducción de turbidez y color.

Se ha evaluado también el uso de la tuna (*Opuntia ficus-indica*) en la coagulación. Se cree que el origen de la tuna (*Opuntia ficus-indica*) es en México. Jorge y Troncoso (2016) afirman:

La especie *Opuntia ficus-indica*, de nombre vulgar tuna, probablemente proviene de México y de las Islas del Caribe (...) La tuna presenta tres variedades: roja, verde y amarilla; pero, el ayrampo, solo la de color morado.

La tuna se cultiva en varias regiones del Perú, incluida Lima.

Las variedades de la tuna y su cultivo en diferentes regiones es un indicador de que se puede emplear en diferentes localidades como coagulante.

Investigaciones realizadas usando la tuna como coagulante han obtenido buenos resultados. La investigación realizada por Olivero, Mercado y Montes (2013) presentó resultados hasta del 83.66% en la remoción de turbidez de agua usando mucílago de tuna. Este estudio demuestra la alta eficiencia de la tuna en la remoción de turbidez.

Otra investigación de la tuna como coagulante, llegó a buenos resultados usando una parte de tuna y otra de sulfato de aluminio. Contreras, Mendoza, Salcedo, Olivero y Mendoza (2015) afirman:

Aplicando una cantidad máxima de 20 % de mucilago de nopal en la proporción de coagulantes y una velocidad de agitación de 200 rpm, se reduce la turbidez del agua hasta valores inferiores a 2 NTU, alcanzando eficiencias superiores al 50 % en la remoción de turbidez, siendo las más efectivas entre 96 – 98%.

La acción de los coagulantes naturales se puede complementar usando coagulantes químicos y obtener resultados más efectivos.

Las investigaciones realizadas al almidón de papa como coagulante han demostrado que no tienen una buena eficiencia. El almidón de papa logró eliminar la turbidez del agua al 50% (Choy, Nagendra, Yeong, Eshwaraiyah y Nagasundara, 2016). Los resultados de este estudio demuestran que el almidón de papa probablemente tenga resultados menores en la remoción de turbidez frente a otros coagulantes naturales.

Los coagulantes naturales han sido utilizados en: fuentes de agua naturales en Colombia (Trujillo, et al. 2013), aguas residuales industriales textiles y aguas residuales domésticas crudas en Costa Rica (Gurdián y Coto, 2010), agua artificial en Perú (Choque, Choque, Solano y Ramos, 2018) y aguas residuales de molino de aceite en Malasia (Jagaba, et al., 2020).

Las ventajas de los coagulantes naturales son la poca generación de lodos, son biodegradables y no desarrollan efectos negativos en la salud. Simate et al. (2012) afirma: “En 1960, efectos perjudiciales de los coagulantes químicos en el ser humano salud fueron

publicados” (como se citó en Choy, et al., 2016, p. 2). Posteriormente, se conoce a los coagulantes químicos como agentes dañinos para la salud.

La presencia de aluminio residual en el agua ha sido estudiada por sus efectos, su concentración en el agua debe ser controlada estrictamente para evitar efectos negativos a la salud. Flaten (2001) y Miller et al. (1984) afirman: “Existe evidencia que relaciona a los coagulantes, a base de aluminio, con el desarrollo de la enfermedad de Alzheimer en los seres humanos, debido a la presencia de aluminio residual en el agua tratada” (Como se citó en Guzmán, Villabona, Tejada y García, 2013, p. 2). El agua que contiene concentración de aluminio mayor a la establecida puede provocar enfermedades mentales, la ventaja de los coagulantes naturales es que no tienen estos efectos.

Desde el lado de generación de lodos, los coagulantes químicos tienen la desventaja de generar un gran volumen de estos. Otro inconveniente de la hidrólisis de coagulantes metálicos es la generación de un gran volumen de lodo que no es biodegradable (Choy et al., 2016). Estos lodos son más difíciles de manejar debido a que los lodos de alumbre son más difíciles de deshidratar.

Los coagulantes naturales de origen vegetal presentan mejores resultados frente a la generación de lodos. Ndabigengesere et al., (1995) refiere:

Se ha encontrado que los coagulantes naturales generan no solo un volumen de lodo mucho más pequeño, hasta cinco veces menor (...) Los costos de tratamiento y manejo de lodos son reducidos lo que lo convierte en una opción más sostenible. (Como se citó en Choy et al., 2016)

Los coagulantes naturales permiten que los costos de manejo de lodo sean menores y se puedan desarrollar a bajo costo.

Dentro de las evaluaciones de eficacia de un coagulante se encuentra la prueba de jarras. “La prueba de jarra es la técnica más extensamente usada para determinar la dosis de químicos y otros parámetros. En ella se trata de simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación a nivel de laboratorio” (Lorenzo, 2006, p. 14). Esta prueba de laboratorio permite conocer la dosis óptima de los coagulantes en estudio.

La aplicación de los coagulantes naturales puede hacerse en aguas poco turbias. En esta agua la velocidad de agitación será la principal incidencia en la efectividad del coagulante (Olivero, Aguas, Mercado, Casas y Montes, 2014). Una correcta evaluación experimental determinará la velocidad de agitación apropiada según la turbidez inicial del agua a tratar.

En la prueba de jarras se pueden utilizar diferentes velocidades de mezcla. La mezcla rápida se hace con el objetivo de poner en contacto el coagulante con las partículas coloidales en un corto tiempo (entre 15 segundos a 3 minutos). Por otro lado, la mezcla lenta se realiza en un periodo de hasta 15 minutos, más tiempo de agitación puede originar el calentamiento de la muestra, formando burbujas que se adhieren a los flóculos (Lorenzo, 2006). La determinación del tiempo de agitación se hace con el objetivo de simular las condiciones en el proceso a nivel industrial.

Como justificación, la presente revisión de la literatura científica busca recolectar información de investigaciones previas acerca del uso de coagulantes naturales a partir de la papa (*Solanum tuberosum*), la tuna (*Opuntia ficus-indica*) y otros productos naturales en el tratamiento de aguas superficiales, dada la importancia de encontrar alternativas de solución a los nuevos desafíos en tratamiento de agua.

Se plantearon las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuál es la eficacia de la capacidad clarificadora entre los biocoagulantes extraídos de la papa (*Solanum tuberosum*) y

la tuna (*Opuntia ficus-indica*) en el tratamiento de agua del río Rímac?, ¿Cuáles son los coagulantes naturales aplicados en el tratamiento de aguas superficiales? Y ¿cuáles son los beneficios/limitaciones de los coagulantes naturales?

El objetivo general es analizar la eficacia de la capacidad clarificadora entre los biocoagulantes extraídos de la papa (*Solanum tuberosum*) y la tuna (*Opuntia ficus-indica*) en investigaciones previas. Los objetivos específicos son: Identificar que biocoagulante entre la papa y la tuna tiene mayor capacidad clarificadora, contabilizar metodologías de coagulantes naturales en tratamiento de agua.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

La estrategia utilizada para la recolección de información para el desarrollo de esta revisión de la literatura científica fue revisar artículos en las siguientes fuentes de información: Google Académico, Redalyc, Scielo y Science Direct.

Según el ranking de motores de búsqueda de información científica, la importancia de los buscadores usados está en el siguiente orden: Google Académico, Scielo, Science Direct y Redalyc. El buscador con mayor número de artículos usados fue Scielo.

Tabla 1

Porcentaje de artículos usados según buscador

| Buscador | Cantidad de artículos | Porcentaje de artículos |
|------------------|-----------------------|-------------------------|
| Scielo | 8 | 42.1% |
| Google Académico | 6 | 31.6% |
| Science Direct | 3 | 15.8% |
| Redalyc | 2 | 10.5% |
| Total | 19 | 100.00% |

El total de artículos usados fue de 19 artículos, el buscador que más artículos brindó a la revisión fue Scielo.

La mayoría de artículos seleccionados fue del buscador Scielo, aquí se encontraron artículos en español, inglés y 1 artículo en portugués. El segundo buscador que más artículos aportó fue Google Académico, debido a que es un motor de búsqueda que recopila información de muchas fuentes a la vez. Science Direct brindó artículos escritos en inglés, idioma en donde se encuentra la mayor cantidad de información.

Se revisaron 28 artículos en total, de los cuales solo 19 cumplen los criterios de inclusión. Los criterios de búsqueda utilizados se señalan en la Tabla 2.

Tabla 2

Criterios de búsqueda de información

| Criterios | Descripción |
|------------------|---|
| Idioma | Español, inglés y portugués. |
| Antigüedad | 2006 - 2020 |
| Fuentes | Google Académico, Scielo, Redalyc, Science Direct |
| Tipo de artículo | Artículo científico |
| Palabras clave | Coagulantes naturales, biocoagulantes, coagulación química, tratamiento de agua, natural coagulants, coagulants and flocculants |

La mayoría de artículos seleccionados son en español, la mayoría del año 2019.

Se realizó una búsqueda con 3 idiomas con el objetivo de poder tener mayor acceso a la información publicada, teniendo como resultado 6 artículos seleccionados publicados en inglés. En el rango de antigüedad se consideró también el presente año 2020, debido a que se encontró un artículo publicado este año.

La estrategia de búsqueda se realizó creando conjuntos de palabras clave relacionadas al título, estas fueron: Coagulantes naturales, biocoagulantes, coagulación química, tratamiento de agua, natural coagulants, coagulants and flocculants.

La búsqueda también incluyó conjuntos de información en donde se agruparon las palabras clave para un mejor orden de la información recolectada, partiendo de lo general hacia lo particular. Los conjuntos siguen el siguiente orden: Tratamiento de agua, definición y conceptos, clasificación, metodologías y ventajas de los coagulantes naturales.

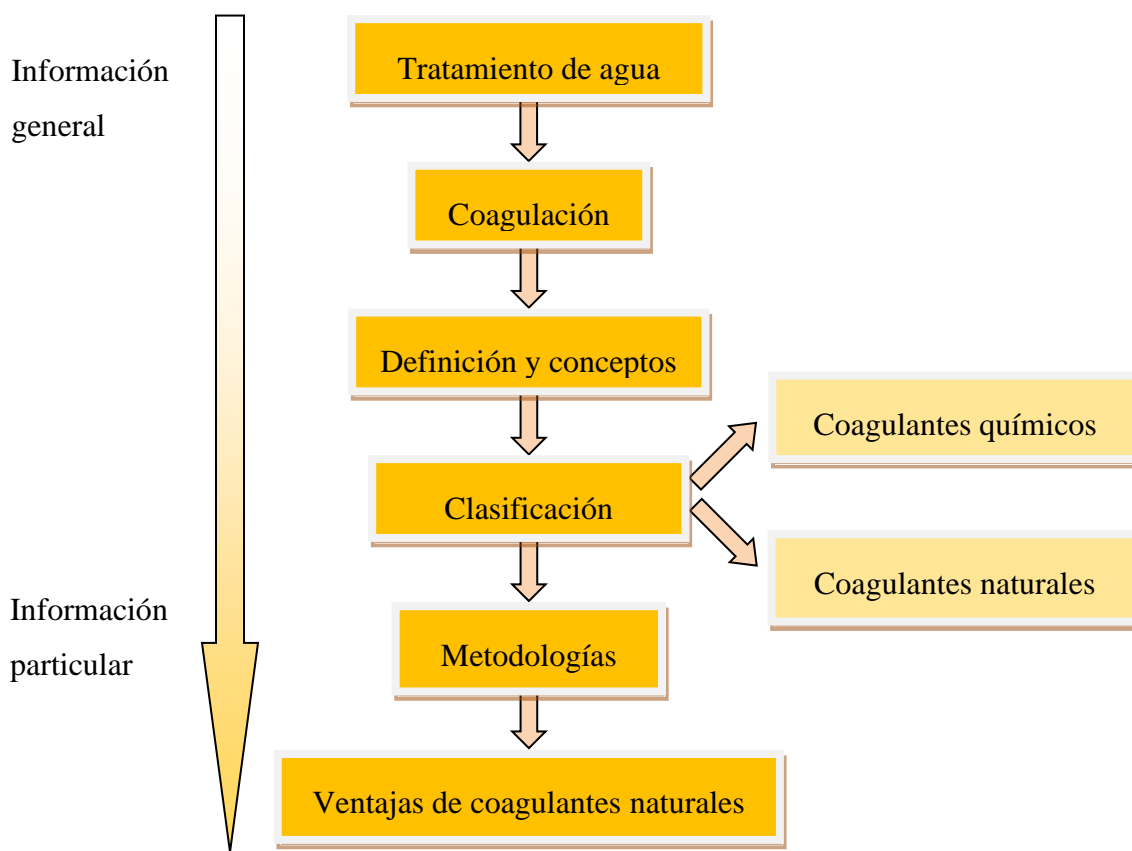


Figura 1. Estrategia de búsqueda mediante agrupación de conceptos usados en la revisión

Finalmente, habiendo revisado un total de 28 artículos, los 19 artículos seleccionados para esta revisión fueron los que se mencionan en la Tabla 3.

Tabla 3

Tabla de artículos seleccionados

| Año de publicación | Título del artículo | País |
|--------------------|--|----------|
| 2011 | Tratamiento de agua para consumo humano | Perú |
| 2015 | Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua | Colombia |
| 2013 | Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano | Colombia |

| | | |
|------|---|------------|
| 2010 | Estudio preliminar del uso de la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) en la coagulación-floculación de aguas residuales | Costa Rica |
| 2018 | Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua | Perú |
| 2015 | El Nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua | Colombia |
| 2016 | Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification | Malasia |
| 2014 | Utilización de Tuna (<i>Opuntia ficus-indica</i>) como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas | Colombia |
| 2016 | Capacidad antioxidante del fruto de la <i>Opuntia apurimacensis</i> (ayrampo) y de la <i>Opuntia ficus-indica</i> (tuna) | Perú |
| 2019 | Exploring natural coagulants as impending alternatives towards sustainable water clarification” – A comparative studies of natural coagulants with alum | India |
| 2019 | Study of coagulating/flocculating characteristics of organic polymers extracted from biowaste for water treatment | Ecuador |
| 2019 | Clarification of the water of wetlands using a mixture of natural coagulants | Colombia |
| 2020 | Sustainable use of natural and chemical coagulants for contaminants removal from palm oil mill effluent: A comparative analysis | Malasia |
| 2006 | Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación - floculación | Cuba |
| 2013 | Removing turbidity from Magdalena river by the use of <i>Opuntia ficus-indica</i> cactus mucilage | Colombia |
| 2013 | Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión | Colombia |
| 2018 | Sustancias Naturales: Alternativa para el Tratamiento de Agua del Río Magdalena en Palermo, Colombia | Colombia |
| 2019 | Tratamiento de agua combinado con extracto natural de <i>Moringa oleifera</i> Lam e coagulante sintético | Brasil |
| 2009 | Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: Caso del Hidroxicloruro de Aluminio | Colombia |

Los países con más artículos seleccionados fueron: Colombia (9), Perú (3), Malasia (2), Costa Rica, India, Ecuador, Cuba y Brasil con 1 artículo cada uno.

El criterio de inclusión de artículos fue que tengan el mismo tema de investigación, objetivos similares al de esta revisión, los resultados obtenidos y que tengan una buena eficiencia en los coagulantes naturales investigados. Del mismo modo, se excluyeron

artículos científicos que correspondían o no al problema de investigación, sin embargo no brindaban información significativa para la revisión. Excluyéndose finalmente 9 artículos.

Tabla 4

Tabla de artículos excluidos

| Año de publicación | Título del artículo | País |
|--------------------|---|----------|
| 2018 | Remoción de turbidez de aguas superficiales mediante floculación | Perú |
| 2019 | Almidón de yuca y sulfato de aluminio en la remoción de demanda química de oxígeno de agua del río Pollo, Otuzco | Perú |
| 2019 | Tratamiento de agua con especies vegetales acuáticas | Perú |
| 2018 | Tendencias actuales para el tratamiento de aguas residuales domésticas: Una revisión de la literatura científica | Perú |
| 2013 | Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: Una revisión | Colombia |
| 2017 | Determinación de la capacidad clarificadora del coagulante natural extraído de la papa (<i>Solanum tuberosum</i>) en la purificación del agua del río Patari para uso de consumo humano | Perú |
| 2014 | Análisis de la cadena de valor de la papa nativa en los distritos de Huayana y Pomacocha - Provincia de Andahuaylas - Apurímac | Perú |
| 2009 | Evaluación del proceso de coagulación - floculación de una planta de tratamiento de agua potable | Colombia |
| 2015 | Eliminación del color de las aguas residuales procedentes de la tintura con colorantes reactivos | España |

Elaboración propia

Dentro de los artículos excluidos, se encontraron aquellos que no eran artículos científicos, no obtuvieron buenos resultados, los objetivos no eran similares al de esta revisión, no brindaban información significativa para la revisión o no tenían el mismo problema de investigación.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

Se encontraron 19 artículos que respetaban los criterios de inclusión adoptados. En los 5 primeros años de la antigüedad de publicación de artículos (2006 al 2010), se tomaron 3 artículos. La cantidad de artículos seleccionados publicaciones entre 2011 a 2015 es de 7 artículos. Finalmente desde el 2016 al 2020 la cantidad de artículos seleccionados fue de 9 artículos.

Tabla 5

Cantidad de artículos según rango de año de publicación

| Rango de año de publicación | Cantidad de artículos | Porcentaje de artículos |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 2006 - 2010 | 3 | 15.79% |
| 2011 - 2015 | 7 | 36.85% |
| 2016 - 2020 | 9 | 47.36% |
| Total | | 100% |

Elaboración propia.

Solamente en los últimos 5 años (desde el 2016 al 2020) se publicaron el 47.36% de los artículos incluidos en esta revisión, esta cantidad refleja que las investigaciones de coagulantes naturales ha ido aumentando en los últimos años.

En cuanto a los conjuntos de información, los artículos se distribuyeron según el grupo de conceptos al que aportaban información, consiguiendo abarcar los tópicos estudiados.

Tabla 6

| <i>Cantidad de artículos según conjunto de información</i> | |
|--|-----------------------|
| Conjunto de información | Cantidad de artículos |
| Definiciones y conceptos | 3 |
| Coagulantes químicos | 1 |
| Tipos de coagulantes químicos | 2 |
| Usos de coagulantes químicos | 2 |
| Coagulantes naturales | 1 |
| Tipos de coagulantes naturales | 4 |
| Usos de coagulantes naturales | 2 |
| Ventajas de los coagulantes naturales | 2 |
| Metodologías de coagulación | 2 |
| Total | 19 |

Algunos artículos abarcan 2 o más conjuntos de información

La mayor cantidad de artículos fue utilizada en los tipos de coagulantes naturales, ya que se necesitó de varias fuentes y estudios realizados a coagulantes naturales para poder resultados significativos a las preguntas de investigación.

Los resultados de investigaciones consultadas sobre coagulantes naturales señalan que el porcentaje de remoción de turbidez varía entre 50 a 98.78% en el mejor de los casos. El resumen de estos resultados se detalla en la Tabla 7.

La ubicación geográfica a los que pertenecen la mayoría de artículos es un indicador que los estudios realizados son hechos en países potenciales de producir la materia prima de los coagulantes naturales estudiados. Es decir que tienen mayor capacidad de producir las materias primas para los coagulantes naturales. La cantidad de artículos por países donde se estudiaron se detallan en la Tabla 8.

Tabla 7

Resultados de coagulantes naturales de artículos consultados

| Coagulante natural | Turbidez inicial | Eficiencia de remoción | Dosis óptima | Referencia |
|---------------------------------|------------------|------------------------|---|------------------|
| Almidón de plátano | 360 NTU | 98.78% | 50% almidón - 50% sulfato de aluminio | Trujillo et al. |
| Semilla de tamarindo | 56.8 NTU | 22.3% | 4667 mg/L | Gurdián y Coto |
| <i>Moringa oleifera</i> | 126 NTU | 95% | 2000 mg/L | Aguirre et al. |
| Tuna (<i>O. ficus indica</i>) | 174 NTU | 83.66% | 40 mg/L | Olivero et al. |
| Tuna (<i>O. ficus indica</i>) | 97.67 NTU | >50% | 40 mg/L <i>O. ficus indica</i> - 400 mg/L sulfato de aluminio | Contreras et al. |
| Almidón de papa | 165 NTU | 50% | 120 mg/L | Choy et al. |

El resultado de mayor remoción de turbidez fue el de, una parte de almidón de plátano y otra de sulfato de aluminio.

Elaboración propia.

La investigación hecha por Trujillo et al. (2013) detalla que, si bien el coagulante hecho solo a partir de almidón de plátano no fue suficiente para remover la turbidez, estos pueden ser mezclados junto a los coagulantes químicos para un mejor resultado.

Gurdián y Coto (2010) pusieron a prueba un coagulante natural hecho con semilla de tamarindo frente a aguas residuales de la industria textil, concluyeron en que el coagulante natural no mostró un buen desempeño en la remoción de turbidez, sin embargo tuvo mejores resultados en la disminución de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Aguirre et al. (2018) investigaron a la *Moringa oleifera* como coagulante natural, sus resultados señalan que esta semilla tuvo buenos resultados en la remoción de turbidez y adicionalmente redujo el color en 97.8%, concluyendo en que el uso de sustancias naturales son una alternativa asequible para la potabilización del río Magdalena (Colombia).

Olivero et al. (2014) afirman que el mucílago extraído de la tuna llegó a clarificar aguas del río Magdalena reduciendo la turbidez hasta en un 83.66%, sin embargo el control usado como coagulante al sulfato de aluminio obtuvo mejores resultados. En la investigación también se menciona que si bien se obtuvieron buenos resultados, los parámetros no cumplen el requerimiento de la Norma Técnica colombiana para agua potable, pero a pesar de ello el agua obtenida puede usarse para otras actividades.

La investigación hecha por Contreras et al. (2015) estudiando a la tuna como coagulante natural, obtuvo resultados de más del 50% de eficiencia en la remoción de turbidez y el coagulante no afectó notablemente el pH, concluyendo en que la tuna mostró efectividad como coagulante complementario al sulfato de aluminio.

Choy et al. (2016) señalan que el almidón de papa logró el 50% de remoción de turbidez y que usar coagulantes naturales tiene beneficios adicionales como que están disponibles en abundancia y no son potenciales generadores de problemas de salud.

En relación a estos estudios, se colige que el uso de coagulantes naturales tiene beneficios como su poca generación de lodos, no causan problemas de salud y que se encuentran en abundancia. Otro punto importante es su buena eficacia acercándose mucho a los coagulantes químicos más usados, o también como complementarios a estos.

Tabla 8

Coagulantes naturales estudiados por países

| País | Cantidad de artículos | Coagulantes naturales estudiados |
|------------|-----------------------|---|
| Colombia | 4 | Almidón de plátano, tuna, almidón de yuca y moringa |
| Costa Rica | 1 | Semilla de Tamarindo |

| | | |
|---------|---|---|
| Perú | 2 | Tuna, San Pedro y <i>Neoraimondia arequipensi</i> y ayrampo |
| Malasia | 2 | Almidón de arroz, trigo, maíz y papa, moringa y quitosano |
| India | 1 | Sagú |
| Ecuador | 1 | Almidón de cáscara de plátano, pectina de cáscara de naranja y extractos de semillas de tamarindo |
| Brasil | 1 | <i>Moringa oleifera</i> |

Elaboración propia.

Los países sudamericanos coinciden en los coagulantes naturales estudiados, esto se debe a su cercanía y producción de las mismas especies. La variedad de especies vegetales usadas convierten a Sudamérica en una potencial desarrolladora de coagulantes naturales. Por otro lado, los biocoagulantes se pueden clasificar según su origen, por ejemplo de origen de semillas o almidones. Estas fuentes se pueden observar en la figura 2.

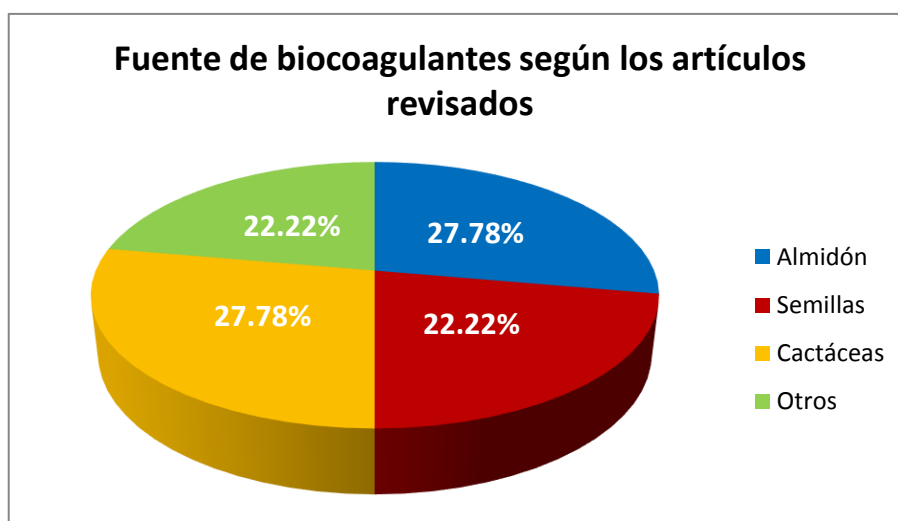


Figura 2: Fuentes de biocoagulantes según artículos revisados.
Elaboración propia

En la figura 2 se observa que las fuentes de biocoagulantes coinciden en los artículos revisados, estas son: Almidones, cactáceas, semillas y otros. Estos artículos nos demuestran que posiblemente los biocoagulantes más usados sean los almidones y cactáceas debido a su mayor eficiencia que se ha demostrado en diferentes estudios a través de los años, también por la versatilidad que estos tienen y su fácil acceso en diferentes partes del mundo.

En Malasia se estudiaron cereales como coagulantes naturales, mientras que en países como Colombia y Ecuador fueron estudiados especies frutales así como tubérculos. Esto refleja que si bien no todos los países tienen las mismas especies, en cada país se pueden utilizar otros coagulantes naturales para la investigación y posterior uso, añadiendo finalmente una ventaja más que es la de un uso en diversas partes del mundo donde se desarrolle agricultura de cereales, tubérculos, semillas, etc.

La recolección de información de los artículos permitió identificar a los coagulantes químicos y naturales más conocidos. Los coagulantes más conocidos y usados son principalmente químicos, sin embargo ya existen estudios que con sus resultados nos dan a conocer cuáles son los de mejor eficacia.

Tabla 9

Coagulantes químicos y naturales más conocidos

| Naturales | Químicos |
|--|---------------------|
| Almidón de: plátano, cáscara de plátano, yuca, arroz, trigo, maíz y papa | Sulfato de aluminio |
| Semilla de tamarindo | Aluminato de Sodio |
| Tuna, San Pedro y otras cactáceas | Cloruro de Aluminio |
| Sagú | Cloruro Férrico |
| <i>Moringa oleifera</i> | Sulfato Férrico |

Quitosano

Sulfato Ferroso

Elaboración propia

Los coagulantes químicos son más usados por su mayor eficacia en la remoción de turbidez, teniendo como resultado varios tipos de estos. Por su parte, los coagulantes naturales también vienen siendo impulsados mediante investigaciones realizadas alrededor del mundo. Principalmente la *Moringa oleifera* es la más estudiada, sin embargo otras especies como frutos, tubérculos y semillas han tenido buenos resultados en la remoción de turbidez haciéndose más conocidos los que están hechos a partir de almidón de plátano, yuca, maíz y papa. Esta tendencia ayuda a poder tener variedades en la elección de coagulantes naturales para remoción de turbidez teniendo acceso a frutos o semillas.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La revisión de los 19 artículos seleccionados finalmente apoyan el uso de los coagulantes naturales en el tratamiento de aguas por la eficacia obtenida en cada coagulante analizado; sin embargo, los resultados de estas investigaciones señalan que entre estos dos biocoagulantes, el de mayor eficacia en la remoción de la turbidez es el biocoagulante extraído de la tuna.

Por otro lado, luego del análisis de los artículos se pueden contabilizar hasta 13 metodologías usando diferentes coagulantes naturales, entre los que resalta por sus mejores resultados la *Moringa oleifera*. Los coagulantes naturales más estudiados y aplicados para la remoción de turbidez de aguas superficiales son: Semillas de *Moringa oleifera*, almidón de yuca, mucílago de tuna, otras cactáceas como el San Pedro y almidones de otros frutos.

Según las investigaciones previas de los artículos revisados, la eficacia de remoción de turbidez entre la tuna y la papa es de entre el 50 a 83% para la tuna, y del 50% aproximadamente para el almidón de papa.

Los beneficios y aplicaciones de los coagulantes naturales radican en que por su naturaleza, sus lodos son biodegradables y no generan un efecto en la salud humana como en el caso del sulfato de aluminio, que se ha evidenciado como causa de Alzheimer en su estado de Aluminio residual. Otro beneficio por parte de los coagulantes naturales es su fácil acceso en nuestro país, en el Perú tenemos alrededor de 3000 especies de papa que finalmente es materia prima al alcance de las poblaciones que necesitan tratar el agua.

Finalmente, algunos biocoagulantes han llegado a tener mayor eficacia que la papa y la tuna; sin embargo, la abundancia de papa en nuestro país hace que un biocoagulante a partir de este tubérculo sea una mejor opción en comparación de otros productos naturales.

Se recomienda que en investigaciones posteriores se use un coagulante químico como control de los resultados obtenidos de los biocoagulantes estudiados. También se recomienda que al momento de utilizar las papas, se verifique a que tiempo de maduración de ésta se consigue mejores resultados, puede existir una relación en el tiempo de maduración, el tamaño o la especie.

REFERENCIAS

- Aguirre, S. E., Piraneque, N. V., & Cruz, R. K. (2018). Natural Substances: Alternative for the Treatment of Magdalena River's Water in Palermo Colombia. *Información tecnológica*, 29(3), 59-70. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000300059>
- Buenaño, B., Vera, E., & Aldás, M. B. (2019). Study of coagulating/flocculating characteristics of organic polymers extracted from biowaste for water treatment. *Ingeniería e Investigación*, 39(1), 24-35. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v39n1.69703>
- Choque, D., Choque, Y., Solano, A. y Ramos, B. (2018). Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v38n2/rtq08218.pdf>
- Choy, S. Y., Prasad, K. N., Wu, T. Y., Raghunandan, M. E., & Ramanan, R. N. (2016). Performance of conventional starches as natural coagulants for turbidity removal. *Ecological Engineering*, 94, 352-364. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.05.082>
- Chulluncuy, N. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería Industrial*, (29), 153-170. Recuperado de http://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria_industrial/article/view/232/208
- Cogollo, J. (2009). Clarificación De Aguas Usando Coagulantes Polimerizados: Caso Del Hidroxicloruro De Aluminio. *Dyna*, 78 (165), 18-27. [Fecha de consulta 20 de mayo de 2020]. ISSN: 0012-7353. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496/49622372002>
- Contreras, K., Mendoza, J., Salcedo, G., Olivero, R., & Mendoza, G. (2015). El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua. *Producción + Limpia*, 10(1), 40-50.

- Gurdián, R., & Coto, J. (2011). Estudio preliminar del uso de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) en la coagulación-floculación de aguas residuales. *Revista Tecnología en Marcha*, 24(2), pág. 18-ág. 18.
- Guzmán, L., Villabona, A., Tejada, C., y García R. (2013). Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 16(1), 253-262.
- Jagaba, A., Kutty, R., Hayder G., Latiff, A., Aziz, A., Umaru, I.,... Nasarab, M. (2020). Sustainable use of natural and chemical coagulants for contaminants removal from palm oil mill effluent: A comparative analysis. *Ain Shams Engineering Journal*.
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.01.018>
- Jorge, P., & Troncoso, L. (2016). Capacidad antioxidante del fruto de la *Opuntia apurimacensis* (ayrampo) y de la *Opuntia ficus-indica* (tuna). *Anales de la Facultad de Medicina*, 77(2), 105-109. <https://dx.doi.org/10.15381/anales.v77i2.11812>
- Lorenzo Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. ICIDCA. *Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XL (2), 10-17.
[Fecha de consulta 17 de mayo de 2020]. ISSN: 0138-6204. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=2231/223120664002>
- Olivero, R., Aguas, Y., Mercado, I., Casas, D., y Montes, L. (2014). Utilización de Tuna (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas. *Avances: Investigación En Ingeniería*, 11(1), 70-75.
<https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.302>
- Olivero, R., Mercado, I., & Montes, L. (2013). Removing turbidity from Magdalena river by the use of *Opuntia ficus-indica* cactus mucilage. *Producción + Limpia*, 8(1), 19-27.

Ramírez, H. y Jaramillo, J. (2015). Agentes Naturales como Alternativa para el Tratamiento del Agua. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 11(2), 136-153.

<https://doi.org/10.18359/rfcb.1303>

Riaños, D., Meza, M., & Mercado, I. (2019). Clarification of the water of wetlands using a mixture of natural coagulants. *DYNA*, 86(209), 73-78.

<https://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.73687>

Saritha, V., Karnena, M. K., & Dwarapureddi, B. K. (2019). «Exploring natural coagulants as impending alternatives towards sustainable water clarification» – A comparative studies of natural coagulants with alum. *Journal of Water Process Engineering*, 32, 100982. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100982>

Trujillo, D., Duque, L. F., Arcila, J. S., Rincón, A., Pacheco, S., y Herrera, O. F. (2014).

Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *Revista ION*, 27(1), 17-34.

Valverde, K. C., Paccola, E. A. de S., Pomini, A. M., Yamaguchi, N. U., & Bergamasco, R. (2019). Combined water treatment with extract of natural *Moringa oleifera* Lam and synthetic coagulant. *Revista Ambiente & Água*, 13(3). <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2135>