

Factibilidad del uso del polvo producido a partir de la semilla de Moringa Oleífera (*Moringa oleífera*) para la optimización del proceso de floculación y sedimentación del agua en el acueducto rural ASUARTELAM – municipio de Tena, departamento de Cundinamarca.

Jean Paul Herrera Escudero

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente - ECAPMA

Programa de Ingeniería Ambiental

Bogotá

2022

Factibilidad del uso del polvo producido a partir de la semilla de Moringa Oleífera (*Moringa oleífera*) para la optimización del proceso de floculación y sedimentación del agua en el acueducto rural ASUARTELAM – municipio de Tena, departamento de Cundinamarca.

Jean Paul Herrera Escudero

Trabajo para optar al título de Ingeniero Ambiental

Directora:

Jessica Paola Páez Pedraza

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente - ECAPMA

Programa de Ingeniería Ambiental

Bogotá

2022

Página de Aceptación

Jessica Paola Páez Pedraza

Directora Trabajo de Grado

Juan Pablo Herrera Cerquera

Jurado

Bogotá – 2022

Agradecimientos

Primero a Dios Padre Todopoderoso, quien me permitió llegar hasta aquí y darme el conocimiento para comprender cosas nuevas.

A mi madre, Magnolia, quien me apoyo incondicionalmente e inculcó en mí el deseo de aprender como medio para crecer como persona en todos los aspectos de la vida.

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia y su Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, quien me acogió y me hizo parte de tan grande institución.

A mis profesores de los diferentes cursos que vi a lo largo del programa de Ingeniería Ambiental, y en especial a la Ingeniera Jessica Paola Páez Pedraza, quien fue mi tutora en este proyecto y que sin su guía y ayuda no hubiera podido lograr.

Al Acueducto ASUARTELAM, en especial a su junta Directiva presidida por el señor Arturo Huertas Ceballos, quien me permitió generar conocimiento llevando a cabo el proyecto en sus instalaciones.

Resumen

En la actualidad la investigación sobre la obtención de productos de origen natural para la coagulación de aguas está tomando auge, esto debido a que los coagulantes naturales son más seguros que los coagulantes químicos, ya que en su uso habrá posibilidades de residuos de coagulante presentes en el agua después del tratamiento toda vez que se cuenta con estudios que han encontrado en residuos de coagulante químico como el alumbre, afectan la salud de las personas llegando a causar enfermedades como el Alzheimer si se consume.

Es así como se determinó el grado de viabilidad técnico-económica del uso del polvo de la Moringa como coagulante natural en el proceso de tratamiento para potabilización de agua, además de la determinación de su eficiencia de remoción y las ventajas en cuanto a costos, en comparación con el polímero de aluminio, el cual es usado por el prestador para el proceso de coagulación.

Dada la necesidad de buscar alternativas de floculación mediante el uso de productos elaborados a partir de productos naturales y dada la eficacia de la moringa de acuerdo con las investigaciones realizadas a nivel internacional y local, se preparó un coagulante a base de semillas de Moringa *Oleifera*, el cual se llevó a usar en un escenario real de operación; en una planta de tratamiento potable de un acueducto veredal.

Bajo test de jarras en el laboratorio de la PTAP, se obtuvieron remociones de turbidez en el agua a tratar de hasta el 92%, remoción del color aparente entre el 75% y el 90% y eliminación total de las concentraciones de hierro y nitratos; evidenciándose además una fuerte influencia del pH en la eficiencia de este. Se obtuvo también que, en la prueba realizada en las estructuras de tratamiento del prestador, el coagulante producía un coagulo bien formado en el floculador

transversal, llegando a los niveles de remoción encontradas en el ensayo de jarras, sin embargo, estos a su paso por el sedimentador se desintegraban, aumentando nuevamente la turbidez.

Palabras claves: *Turbidez, coagulación, moringa, sedimentación, remoción.*

Abstract

Currently the research on obtaining products of natural origin for the coagulation of waters is taking boom, this because natural coagulants are safer than chemical coagulants, since in their use there will be possibilities of coagulant residues present in the water after the treatment since there are studies that have found in chemical coagulant residues such as alum, they affect the health of people, causing diseases such as Alzheimer's if consumed.

Thus, the degree of technical-economic viability of the use of Moringa powder as a natural coagulant in the treatment process for water purification was determined, in addition to the determination of its removal efficiency and cost advantages, compared to the aluminum polymer, which is used by the provider for the coagulation process.

Given the need to look for flocculation alternatives through the use of products made from natural products and given the effectiveness of moringa according to research carried out internationally and locally, a coagulant based on Moringa Oleifera seeds was prepared, which was used in a real scenario of operation, in a drinking treatment plant of a village aqueduct.

Under test of jugs in the laboratory of the PTAP, turbidity removals were obtained in the water to be treated up to 92%, removal of the apparent color between 75% and 90% and total elimination of iron and nitrate concentrations; There is also a strong influence of pH on its efficiency. It was also obtained that, in the test carried out in the treatment structures of the provider, the coagulant produced a well-formed clot in the transverse flocculator, reaching the levels of removal found in the test of jars, however, these as they passed through the sedimentator disintegrated, increasing turbidity again.

Keywords: *Turbidity, coagulation, moringa, sedimentation, removal.*

Tabla de contenido

Agradecimientos	4
Resumen.....	5
Abstract.....	7
Lista de tablas	11
Tabla de figuras.....	12
Introducción	14
Descripción y Planteamiento del problema	16
Justificación	18
Objetivos.....	20
Objetivo general	20
Objetivos específicos.....	20
Marco teórico	21
Parámetros de calidad del agua potable	21
El potencial de Hidrógeno (pH).....	21
Color	21
Hierro total.....	21
Nitratos	22
La turbidez, coagulación y floculación	22
Tipos de coagulantes usados en la actualidad	27

Tipo de estructuras utilizadas para el proceso de floculación.....	32
Floculadores hidráulicos.....	32
Floculadores mecánicos.....	32
Estado del arte	32
Caso de estudio	38
Descripción de las estructuras de tratamiento	38
Ubicación de la captación.....	38
Tanque de quietamiento.....	40
Canaleta Parshall	40
Floculador hidráulico de flujo vertical	42
Sedimentador de Alta Tasa.....	43
Unidad de filtración.....	44
Desinfección	45
Metodología	48
Resultados	63
Ensayo del 04 de diciembre de 2021.....	63
Ensayo del 06 de diciembre de 2021.....	65
Ensayo del 11 de diciembre de 2021.....	66
pH y eficiencia de remoción.....	71
Remoción y Color Aparente.....	72

	10
Remoción del hierro	73
Remoción de nitratos.....	73
Costos del proyecto	75
Discusión de los resultados	79
Conclusiones y recomendaciones	81
Conclusiones	81
Recomendaciones.....	81
Bibliografía	83

Lista de tablas

Tabla 1 Investigaciones realizadas coagulantes de origen natural a nivel internacional	33
Tabla 2 Investigaciones realizadas sobre coagulantes de origen natural a nivel nacional.....	34
Tabla 3 Georreferenciación del punto de captación y la planta de tratamiento.....	39
Tabla 4 Ensayo de jarras del 04 de diciembre	64
Tabla 5 Ensayo de jarras 06 de diciembre	65
Tabla 6 Ensayo de jarras 11 de diciembre	66
Tabla 7 Costos del proyecto.....	75

Lista de figuras

Figura 1 Ubicación de la captación y planta de tratamiento de ASUARTELAM.....	39
Figura 2 Tanque de quietamiento.....	40
Figura 3 Aforador Parshall.....	41
Figura 4 Bomba dosificadora Hanna BL 5	42
Figura 5 Floculador hidráulico de flujo vertical	43
Figura 6 Sedimentador de Alta Tasa.....	44
Figura 7 Unidad de Filtración.....	45
Figura 8 Sistema de desinfección – clorador	46
Figura 9 Sistema de desinfección – eyector.....	46
Figura 10 Disposición estructuras en planta de tratamiento	47
Figura 11 Diagrama de flujo del proceso.....	49
Figura 12 Semillas adquiridas.....	50
Figura 13 Descripción gráfica de la Moringa oleífera	50
Figura 14 Semillas de moringa en su vaina	51
Figura 15 Semilla de moringa, recolectada fuera de la vaina	52
Figura 16 Triturado de la semilla.....	53
Figura 17 Polvo de semilla de moringa	54
Figura 18 Polvo de semilla en alcohol etílico.....	55
Figura 19 Centrifugación de sólidos a $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$	55
Figura 20 Cloruro de sodio usado en preparación del coagulante	56
Figura 21 Mezcla del polvo con NaCl 1N	57
Figura 22 Solución coagulante preparada.....	57

Figura 23 Almacenamiento de la solución.....	58
Figura 24 pH metro y termómetro Hanna HI98128.....	59
Figura 25 Kit comparador de color Hach 2234-00.....	60
Figura 26 Turbidímetro Hanna HI93703.....	61
Figura 27 Equipo de ensayo de jarras de 6 puestos.....	62
Figura 28 Fotómetro multiparámetro Hanna HI83308.....	62
Figura 29 Bomba dosificadora Hanna BL 5.....	68
Figura 30 Dosificación del coagulante.....	69
Figura 31 Flóculos generados en el floculador.....	70
Figura 32 Flóculos pasando por los paneles de sedimentación.....	70
Figura 33 Relación del pH y la efectividad en remoción.....	71
Figura 34 Relación entre el porcentaje de remoción y el color aparente.....	72
Figura 35 Remoción del hierro.....	73
Figura 36 Efectividad en remoción de nitratos.....	74
Figura 37 Comparación costo de moringa vs PAC.....	78

Introducción

El trabajo de investigación presentado a continuación partió de la inquietud de mejorar los procesos de tratamiento de los acueductos comunitarios, rurales y/o veredales, teniendo en cuenta que estos cubren en su gran mayoría las necesidades de acceso al agua de estas regiones, cumpliendo una obligación que, por ley, en primera instancia le correspondería al estado, pero que es cubierta por las organizaciones comunitarias ya que de acuerdo con Echeverría & Anaya, (2018), la gestión del agua en Colombia se ha centrado más en factores económicos y productivos, forjando los actuales esquemas institucionales, dejando de lado el punto de vista social haciendo que la crisis del agua sea un fenómeno multifactorial que parte las decisiones de gobierno, por lo cual se cree que la crisis del agua es en realidad una crisis de gobernabilidad.

Teniendo en cuenta la degradación de las fuentes hídricas por las actividades antrópicas, la calidad del agua en las fuentes de abastecimiento en zonas rurales empeora notablemente, ya que las presiones en los cuerpos de agua generados por el urbanismo desordenado y la agricultura según Franco (2013), hacen que cuerpos de agua superficial presenten un desequilibrio geomorfológico que producen sobre ellos encajonamiento, incisión, inestabilidad de las orillas, erosión lateral y ensanchamiento, que conlleva a el incremento de la turbiedad producida por los sólidos suspendidos totales y suspensión coloidal; sumado al hecho especial que, las estructuras de estos prestadores no puedan tratar el agua de estas fuentes para otorgar agua potable en las condiciones descritas por la normatividad.

Al estar establecido que uno de los mayores indicadores de calidad del agua es la turbidez (Martínez-Orjuela et al., 2020, p.16) y además en búsqueda de alternativas sustentables de tratamiento para estas organizaciones, se indagó sobre el uso de coagulantes de origen natural y viendo que sobre este tema hay una buena densidad de investigaciones y literatura, se llegó a la

pregunta ¿Qué tan factible es el poder optimizar la floculación y sedimentación en plantas de tratamiento de agua potable usando la *Moringa oleifera*?, de la cual hay indicios de muchas pruebas a nivel de laboratorio y enfocadas en su mayoría en tratamiento de aguas residuales.

Descripción y Planteamiento del problema

Aproximadamente en Colombia existen veinte mil organizaciones de carácter comunitario y entidades sin ánimo de lucro que cubren la oferta del acceso al agua en zonas rurales (Carrasco, 2016, p.51); estas en su mayoría diseñadas y construidas hace más de 30 años, las cuales debido a su débil capacidad, la falta de idoneidad de las personas encargadas de la operación y administración y la falta de acompañamiento técnico por parte de las entidades gubernamentales, hacen que sus sistemas de tratamiento en la actualidad no cuenten con sistemas y/o tecnologías que no les permiten entregar agua que al menos cumpla los valores establecidos para los parámetros físicos y químicos para el agua potable descritos en la Resolución 2115 de 2007 ya que en el agua proveniente de fuentes superficiales presenta alteraciones en sus propiedades físicas como turbidez, color aparente y sólidos suspendidos, los cuales influyen negativamente en la apariencia del agua, haciéndola no apta para consumo humano, ya que propiedades como el sabor y el olor se alteran por la contaminación de las fuentes superficiales de agua, bien sea por las actividades agrícolas o por la descarga de efluentes residuales.

Ahora bien, bajo el hecho que los acueductos rurales no cuenten con estructuras óptimas para tratar el agua; el uso de sales de aluminio o polímeros de este los cuales son de amplio uso para la remoción de turbidez produce acumulación en tuberías y accesorios (Zhang et al., 2016); de acuerdo con Snoeyink et al., (2003) el aluminio se acumula en formas de escamas y depósitos sueltos dentro de las tuberías los cuales se liberan de nuevo en agua una vez que la química del agua o la condición hidráulica cambia (caudales, presiones, temperatura) , lo que podría resultar en un contenido de aluminio relativamente alto en el agua del grifo. Así las cosas, conllevan a que se presente ingesta o exposición a aluminio, ya que las investigaciones epidemiológicas han encontrado una fuerte correlación entre la acumulación de aluminio en el cerebro y la

enfermedad de Alzheimer, tanto para los trabajadores expuestos ocupacionalmente al aluminio como para las personas que beben agua del grifo que podría contener un mayor contenido de aluminio después de haber sido tratada con sales de este metal (Krupińska, 2020).

Para efectos de la investigación, el problema radica que, cuando existen precipitaciones en la zona, la turbidez del agua a tratar llega a pasar de las 1.5 UNT en promedio a las 300 UNT, obligando a usar dosis altas de Hidroxi-policloruro de aluminio para compensar la ineficiencia del sistema de floculación – sedimentación; teniendo como resultado una floculación deficiente llegándose a producir decantación del coagulante en las estructuras del acueducto como tanques, cámaras de quiebre y en las redes de distribución, colocando en riesgo la salud pública por los residuos de aluminio presentes en el agua, aun así, se ven obligados a reducir el caudal de tratamiento para poder tratar turbidez mayor a 20 UNT, situación que reduce la capacidad en el suministro de agua a los usuarios.

Justificación

La importancia del proyecto radica en demostrar la eficiencia de un coagulante elaborado a partir de un producto de origen natural, en este caso semillas de *Moringa Oleifera* ya que los estudios realizados con anterioridad se han realizado bajo condiciones de laboratorio y con aguas con turbidez generada sintéticamente, razón por la cual se busca los beneficios de este coagulante bajo condiciones propias del momento de realización de los ensayos, lo que nos lleva a determinar si el coagulante presenta ventajas o no frente a los coagulantes tradicionales como las sales metálicas o polímeros de aluminio en el tratamiento de agua para consumo humano

Además el proyecto cuenta con una justificación social, teniendo en cuenta que el proyecto se desarrollará en un acueducto de carácter comunitario, se puede obtener un panorama en cuanto si el coagulante desarrollado en el proyecto puede ser una opción que permita que las comunidades en áreas apartadas cuenten con un producto que les permita tratar el agua para consumo humano, ya que en estas, el acceso a productos químicos para tratamiento de aguas son difíciles, dada su lejanía a los centros urbanos, haciendo que el precio de los mismos sea castigado por el traslado hasta esos puntos. Ahora bien, el proyecto en su desarrollo tiene además como fin el beneficiar a los usuarios del Acueducto Rural ASUARTELAM, buscando obtener mayores tasas de remoción de turbidez, para así prescindir de hacer interrupciones del servicio por la incapacidad del actual método de tratamiento primario de manejar niveles de turbiedad mayores a 20 UNT.

Se determinó el uso de la *Moringa oleifera* para este proyecto basado en su alta eficiencia en su aplicación para la depuración de aguas residuales de acuerdo al estudio realizado por (Duran Hernández et al., 2017) (74.6%), las cuales son más eficientes que los ensayos realizados con mucílago de *Coffea arabica* (64%) y semilla triturada

de *Persea americana* (44.27%) (Barreto Pardo, et al.,2019) y los realizados con *Stenocereus griseus* (65.36%) (Dearmas Duarte & Ramírez Hernández, 2015).

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la viabilidad técnico-económica del uso del polvo de la Moringa como coagulante natural en el proceso de tratamiento del acueducto rural ASUARTELAM

Objetivos específicos

Determinar la efectividad de la *Moringa oleífera* en la remoción de turbidez en el tratamiento de agua potable

Determinar el costo de producción, distribución e implementación del polvo de Moringa Oleífera como coagulante natural para la planta de tratamiento de agua potable del acueducto ASUARTELAM

Comparar la efectividad de remoción y costos asociados al uso de Moringa Oleífera como coagulante con respecto al uso de policloruro de aluminio, coagulante actualmente usado por el prestador

Marco teórico

Parámetros de calidad del agua potable

El potencial de Hidrógeno (pH)

El pH permite determinar la naturaleza corrosiva del agua, ya que entre mas bajo el valor de pH el agua se vuelve corrosiva. El pH se correlaciona con la conductividad eléctrica y la alcalinidad total (Gupta et al., 2009). Según Kāranta (1987) valores de pH más altos observados sugieren que el dióxido de carbono, el equilibrio carbonato-bicarbonato se ve más afectado debido al cambio en la condición fisicoquímica.

Color

La State Water Resources Control Board (s.f.) define el color aparente del agua en función del tipo de material sólido presente en ella, producido por los componentes disueltos y suspendidos y el cual se mide filtrando la muestra de agua para eliminar todo el material suspendido y midiendo el color del agua filtrada, que representa el color debido a los componentes disueltos. Varias causas naturales y artificiales son responsables de este parámetro en donde los escenarios más favorables para una alta coloración incluyen una actividad orgánica elevada con crecimiento de algas y presencia de minerales solubles en las cercanías de un cuerpo de agua.

Hierro total

Sigler y Bauder (2012) definen el hierro total como la concentración de Hierro que alcanza las aguas superficiales por la mineralización del fondo del cuerpo de agua y el cual reacciona con oxígeno y es convertido en visibles partículas de herrumbre rojo.

Nitratos

De acuerdo con Truque (s.f.) los nitritos en el agua son producto del aporte de fertilizantes, sistemas sépticos y almacenamiento de excrementos de corrales, porquerizas o granjas. Los nitratos no presentan un riesgo de envenenamiento para los humanos

La turbidez, coagulación y floculación

De acuerdo con Popek (2018, p.213) La turbidez es un parámetro de calidad del agua potable en donde la claridad del agua define una propiedad física de turbidez; la materia suspendida donde las partículas de arcilla y limo, la materia orgánica, los organismos microscópicos y los coloides, hace que las aguas naturales sean turbias. Esta propiedad se mide ópticamente como una propiedad de la dispersión de la luz en el agua en donde los medidores de turbidez utilizan el método nefelométrico para las mediciones de turbidez y la miden en unidades de nefelométricas de turbidez (UNT). El método nefelométrico consiste en medir la intensidad de la luz dispersada por una muestra y la compara con la luz de intensidad dispersa por un estándar de referencia en la cual la turbidez de la muestra es proporcional a la intensidad de la luz dispersa.

La coagulación y floculación como procesos de remoción de turbiedad

En principio, la coagulación implica la adición de un coagulante químico o coagulantes con el fin de acondicionar la materia suspendida, coloidal y disuelta para su posterior procesamiento por floculación o para crear condiciones que permitan la posterior eliminación de partículas y material disuelto. Según Howe et al., (2012, p.141) El objetivo del proceso de coagulación depende de la fuente de agua y de la naturaleza de los constituyentes orgánicos

suspendidos, coloidales y disueltos; en donde la coagulación por la adición de productos químicos tales como sales de alumbre y hierro y/o polímeros orgánicos puede implicar:

- a) Desestabilización de pequeñas partículas suspendidas y coloidales
- b) adsorción y/o reacción de porciones de la materia orgánica natural coloidal y disuelta a partícula y
- c) Creación de precipitados floculantes que barren a través del agua enredando pequeño material suspendido, coloidal y disuelto a medida que se decantan.

La coagulación se basa en desestabilizar las partículas que se encuentran en las aguas para que puedan ser eliminadas por procesos de tratamiento primario teniendo en cuenta que las partículas en el agua natural se pueden clasificar como hidrofóbicas (repelentes de agua) e hidrofílicas (atracción de agua), en donde estas últimas tienen una interfaz bien definida entre el agua y las fases sólidas y tienen una baja afinidad por las moléculas de agua; en cuanto a las partículas hidrofóbicas estas son termodinámicamente inestables y se agregarán con el tiempo.

Se clasifican como partículas hidrofílicas las arcillas, óxidos metálicos, proteínas o ácidos húmicos que tienen grupos funcionales de superficie polares o ionizados. Muchas partículas inorgánicas en aguas naturales, incluidos los óxidos metálicos hidratados (óxidos de hierro o aluminio), sílice (SiO_2) y las fibras de asbesto, son hidrófilos porque las moléculas de agua se unirán a los grupos funcionales de la superficie polar o ionizada; también varias partículas orgánicas también son hidrofílicas e incluyen una amplia diversidad de bio coloides (ácidos húmicos, virus) y microorganismos vivos o muertos suspendidos (bacterias, protozoos, algas). Debido a que los bio coloides pueden adsorberse en las superficies de partículas inorgánicas, las partículas en aguas naturales a menudo exhiben propiedades superficiales heterogéneas.

La mayoría de las partículas tienen química superficial compleja en donde las cargas superficiales surgen de varias fuentes. Howe et al., (2012) manifiesta que la carga superficial surge de cuatro maneras principales, las cuales se mencionan a continuación:

Reemplazo isomorfo (imperfecciones cristalinas)

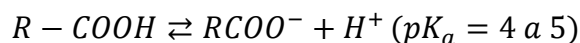
Bajo condiciones geológicas, los metales en los minerales de óxido metálico pueden ser reemplazados por átomos metálicos con menor valencia, impartiendo así una carga negativa al material cristalino. Ejemplo de esto es cuando un átomo de aluminio reemplaza a un átomo de silicio en una partícula de arcilla.

Imperfecciones estructurales

En la arcilla y partículas minerales similares, las imperfecciones que ocurren en la formación del cristal y los enlaces rotos en el borde del cristal pueden conducir al desarrollo de cargas superficiales.

Adsorción preferencial de iones específicos

Las partículas adsorben la materia orgánica, y estas macromoléculas grandes típicamente tienen una carga negativa porque contienen grupos de ácidos carboxílicos así:

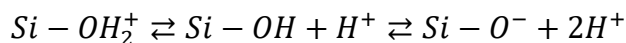


pK_a = Constante de disociación

Así, las superficies de partículas que han adsorbido materia orgánica se cargarán negativamente para valores de pH superiores a ~5.

Ionización De Grupos Funcionales Superficiales Inorgánicos

Muchas superficies minerales contienen grupos funcionales superficiales (por ejemplo, hidroxilo) y su carga depende del pH. Por ejemplo, la sílice tiene grupos hidroxilo en su superficie exterior, y estos pueden aceptar o donar protones de la siguiente forma:



$pH \ll 2$

$pH = 2$

$pH \gg 2$

(p.144).

El proceso de coagulación puede verse afectado por el pH, la alcalinidad, la temperatura, otros iones en el agua y la materia orgánica en el cual el rango de pH óptimo corresponde a la región de solubilidad mínima y es de aproximadamente 5,5 a 7,5 para el alumbre y de 5 a 8,5 para las sales férricas. Dado que el alumbre y las sales férricas son ácidos fuertes, la alcalinidad del agua es importante en la coagulación. Si la alcalinidad es demasiado baja, la adición de una dosis alta de alumbre puede hacer que el pH sea inferior al rango óptimo, y puede ser necesario agregar una base. El uso de polímeros de aluminio puede ser ventajoso en aguas de baja alcalinidad porque la acidez se ha neutralizado parcialmente y el pH no bajará tanto. Alternativamente, el agua con alta alcalinidad puede requerir ácido además del coagulante para bajar el pH en el rango óptimo. La temperatura afecta a las constantes de solubilidad para las reacciones de precipitación y puede tener un impacto en la cantidad de hidróxido metálico que se forma si la coagulación no está cerca del pH de la solubilidad mínima. El efecto más importante de la temperatura, sin embargo, es que el floculo que se forma puede estar cerca de la densidad del agua.

Las teorías de floculación han evolucionado a partir de las siguientes observaciones: La primera en que las partículas pequeñas experimentan un movimiento browniano (movimiento

aleatorio de una partícula en un fluido, sea líquido o gaseoso) debido a colisiones con moléculas de fluidos que resultan en colisiones partícula-partícula y en segundo lugar la agitación de las partículas que contienen agua la cual crea gradientes de velocidad que provocan colisiones de partículas. Estas interacciones se conocen como floculación a microescala (peri cinética) y macroescala (orto cinética), respectivamente. Otra forma de floculación ocurre debido a la sedimentación diferencial en la que las partículas grandes que se establecen en una cuenca quieta superan a las partículas pequeñas para formar partículas más grandes.

De acuerdo con Crittenden et al. (2012) en Howe et al., (2012, p.165) el modelado de los procesos de floculación parte del predecir el cambio de la distribución del tamaño de partícula en función del tiempo para un conjunto dado de condiciones químicas e hidrodinámicas. Cualquier modelo cinético general debe tener en cuenta los cambios en el número de partículas que se encuentran en todas las clases de tamaño. Las partículas de tamaño d_i chocan con las partículas de tamaño d_j , formando partículas de tamaño d_k cuando las colisiones son exitosas. Al mismo tiempo, los agregados de tamaño d_k pueden dividirse en agregados más pequeños debido a las fuerzas de cizallamiento hidrodinámicas.

La tasa general de colisión de partículas es una función de la tasa de floculación a macroescala (r_M), la tasa de floculación a microescala (r_μ) y la tasa de floculación diferencial de sedimentación (r_{DS}) entre partículas i e j .

La tasa de unión de partículas r_{ij} es una función de las concentraciones de partículas y una función de frecuencia de colisión β_{ij} :

$$r_{ij} = \alpha\beta_{ij}n_in_j$$

En donde r_{ij} = tasa de unión entre las partículas i e j ; α el factor de eficiencia de colisión (accesorios por colisión); $\alpha\beta_{ij}$ la función de frecuencia de colisión para partículas de clases de tamaño i e j ; n_i la concentración de partículas i y por último n_j la concentración de partículas j .

El propósito de las cuencas de floculación es proporcionar una mezcla suave que promueva la macro floculación durante un período de tiempo suficiente para permitir que se produzcan tanto la micro floculación como la macro floculación. Las instalaciones de floculación actuales se pueden dividir en dos grupos: mecánica e hidráulica. En floculación mecánica las levallas horizontales y las turbinas verticales se han convertido en las configuraciones más comunes para el motor principal, aunque se siguen desarrollando nuevas innovaciones. Ninguna disposición particular domina en la floculación hidráulica. Ocasionalmente, los diseñadores han utilizado la agitación con aire o chorros de agua bombeados para crear los gradientes de velocidad para floculación, pero estos esfuerzos han tenido un éxito limitado.

Tipos de coagulantes usados en la actualidad

Es muy conocido el uso de las sales de hierro y aluminio para coagulación en aguas, principalmente por su bajo costo. Los coagulantes metálicos y poliméricos usados actualmente están descritos en la literatura por Bratby, (2016) los cuales se resumen a continuación:

a. Sulfato de aluminio

Este es probablemente el coagulante más utilizado. y ha estado en uso para el tratamiento del agua durante varios siglos. Se fabrica a partir de la digestión de la bauxita mineral con ácido sulfúrico. Las cantidades de bauxita se balancean de forma estequiométrica justo por encima de las cantidades necesarias para combinar con el ácido. de modo que en el producto final ningún ácido libre esté presente. La evaporación del agua en el proceso da lugar a que el producto seco

tenga la fórmula aproximada $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ y con un contenido de aluminio que va de 7.4% a 9.5% (generalmente cerca de 9% como Al) por masa. La gravedad específica del alumbre líquido al 4,2% de Al varía de aproximadamente de 1,32 a 15°C a 1,33 a 40°C. La viscosidad correspondiente varía de aproximadamente a $0.011 \frac{N*s}{cm^2}$ (11 centipoise) a 40°C; a $0.028 \frac{N*s}{cm^2}$ (28 centipoise) a 15°C.

En general, el almacenamiento de alumbre líquido a temperaturas inferiores a 10 °C (50 °F) no es recomendado, para evitar los efectos de la cristalización.

b. Sulfato de aluminio acidificado (Alumbre ácido)

Este coagulante es preparado a partir de sulfato de aluminio y ácido sulfúrico. Los componentes varían de 26.5 a 43.5% sulfato de aluminio y 3 a 14% de ácido sulfúrico. El producto químico se suministra como un líquido con un pH que varía de 1,7 a 2,3. El alumbre ácido se utiliza en aplicaciones de coagulación mejoradas.

c. Cloruro de aluminio

Este coagulante de fórmula $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ normalmente se encuentra en forma de solución que contiene 10,5% como Al con un pH de aproximadamente 2,5 y una densidad de 1.300 kg/m³ respectivamente. Ha sido ampliamente utilizado para el acondicionamiento de lodos. Debido al ácido clorhídrico (HCl) liberado en la hidrólisis, la solución debe almacenarse en condiciones similares a las del cloruro férrico

d. Aluminato de sodio

El aluminato de sodio $NaAlO_2$ generalmente se suministra como un líquido viscoso, fuertemente alcalino y corrosivo. La fuerza de la solución es generalmente el 13% como Al. La

solución se mantiene estable manteniendo la relación molar de Na_2O a Al en aproximadamente 2.5:1.

Este coagulante se diferencia del alumbre en que es alcalino en lugar de ácido en sus reacciones. Rara vez se usa solo, pero generalmente con alumbre para obtener algún resultado especial. Por ejemplo, en la coagulación de aguas altamente coloreadas, el alumbre el cual es más ácido se agrega al agua para coagular el color a su pH bajo requerido. Pero esto, da lugar a concentraciones indeseables de compuestos solubles del aluminio; por lo que, se añade aluminato de sodio alcalino -y también cal si es necesario - para aumentar el pH a por lo menos 6,0 que hace que el aluminio soluble se precipite en una cuenca de sedimentación secundaria. Un ejemplo de coagulación por etapas utilizando alumbre y aluminato de sodio es el tratamiento de las aguas altamente coloreadas de la cuenca de Table Mountain en Sudáfrica.

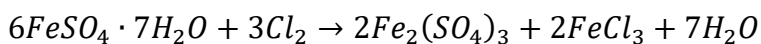
e. Sulfato ferroso

El sulfato ferroso $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ está disponible como cristales o gránulos que contienen 20% de Fe, los cuales son fácilmente solubles en agua. El sulfato ferroso reacciona con alcalinidad natural o alcalinidad añadida para formar hidróxido ferroso, $\text{Fe}(\text{OH})_2$, pero dado que el hidróxido ferroso es relativamente soluble, debe oxidarse a hidróxido férrico para ser útil. A valores de pH superiores a 8,5 la oxidación puede lograrse por aireación, por el oxígeno disuelto en el agua, o mediante la adición de cloro.

f. Sulfato ferroso clorado

En contraste con el alto valor de pH requerido para la oxidación por oxígeno, el cloro reaccionará en un amplio rango de pH para oxidar el hidróxido ferroso obtenido del sulfato ferroso. En la práctica, el sulfato ferroso y el cloro se alimentan por separado y generalmente se

mezclan justo antes de entrar en el sistema de coagulación. La reacción con cloro produce sulfato férrico y cloruro férrico y cada mg/l de sulfato ferroso teóricamente requiere 0,13 mg/l de cloro, aunque generalmente se añade un exceso de cloro para asegurar una reacción completa y para proporcionar cloro con fines de desinfección. La reacción es la siguiente:



La coagulación con sulfato ferroso es especialmente útil cuando se requiere precloración. Tiene la ventaja adicional sobre el sulfato de ferroso en que la coagulación se puede obtener en una amplia gama de valores de pH a partir del 4.0 a 11.0.

g. Cloruro férrico

Este coagulante ($FeCl_3$) está disponible comercialmente en las formas líquida, cristalina o anhidra, aunque la forma líquida es la más común. La forma líquida y cristalina son extremadamente corrosivas y deben manipularse de manera similar al ácido clorhídrico. En forma líquida se suministra como un 40 a 43% por masa $FeCl_3$ solución espesa de color marrón oscuro.

Ahora, los polímeros más usados

h. Clorhidrato de aluminio

Este es probablemente el primero de los coagulantes prepolimerizados, y es de alta densidad; fue desarrollado en el Reino Unido a principios de la década de 1950 principalmente como acondicionador de lodos. La fórmula teórica es $Al_2(OH)_5Cl$ con una basicidad relativa de aproximadamente el 83%. El producto comercial contiene aproximadamente 13% de Al; en comparación con el alumbre con aproximadamente 4% de contenido de Al. Es eficaz como coagulante primario.

Pruebas realizadas en el agua del río Colorado. comparando el uso de clorhidrato de aluminio y el alumbre como coagulantes primarios. Demostraron ventajas totales con el clorhidrato de aluminio ya que este fue eficaz cuando la turbidez del agua cruda eran inferiores a 30 NTU. Los volúmenes de lodos químicos de retro lavado y el volumen de agua utilizada en el proceso, fueron significativamente menores con clorhidrato de aluminio, en comparación con el alumbre.

i. Cloruro de polialuminio (PAC)

Hay numerosas formulaciones, de preparación de cloruro de polialuminio, aparte del clorhidrato de aluminio. La mayoría están en forma líquida, pero algunos secados por aspersión y el contenido de aluminio oscilan entre el 5 y el 12% de Al en el producto líquido. Las gravedades específicas de los productos líquidos varían de 1,2 a 1,4 a 20 °C.

j. Sulfato de silicato de polialuminio y cloruro de silicato de polialuminio

Es la incorporación de sulfato de aluminio en ácido silícico prepolimerizado (en forma de sílice activada) para formar un coagulante muy eficaz; pueden ser eficaces en el tratamiento de aguas residuales y superficiales, aunque pueden ser menos eficaces para la precipitación de fósforo. Se suministran en forma líquida, aunque los productos secos también están disponibles. El producto líquido se suministra con 4.4 a 7.5% como contenido de Al, con basicidades relativas de 40 a 70%. Las gravedades específicas de las soluciones varían pero son aproximadamente de 1,30.

Tipo de estructuras utilizadas para el proceso de floculación

Para Colombia, el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2010) establece dos tipos de floculadores a implementar los cuales son:

Floculadores hidráulicos

Romero Rojas (1999, p.80) expone que estas estructuras hacen uso del movimiento del agua, bien sea mediante flujo vertical u horizontal, presentando como ventajas una apropiada velocidad de flujo y la inexistencia de equipos mecánicos o electromecánicos para impulsar y como desventaja el pobre control de la mezcla de coagulante ante la presencia de caudales variables. Ejemplo de este floculador es el construido en la planta de tratamiento de agua potable del prestador donde se realizó este proyecto.

Floculadores mecánicos

Arboleda (2000, p.147) los define como aquellos que requieren una fuente de energía externa que mueva un agitador en un tanque o en una serie de tanque, en donde el agua permanece un tiempo teórico de detención y en el cual de acuerdo al sentido de giro del agitador se dividen en: giratorios los cuales los de paleta tienen baja velocidad de rotación y los de turbina una velocidad mayor. La segunda clase son los reciprocantes los cuales consisten en parrillas de madera que suben y bajan de forma alterna o en sistemas oscilantes como cintas que van y vienen dentro del tanque.

Estado del arte

Los primeros procesos de tratamiento de agua involucraron procesos naturales. Bratby (2006, citado por Másmela y Aguilar, 2017) manifiesta que los egipcios sobre el año 2000 A.C

usaban semillas, específicamente almendras para aclarar el agua del río. Aunque está muy en boga el uso de sales minerales y polímeros para el proceso de coagulación, recientemente se han realizado a nivel global investigaciones y ensayos sobre el uso de coagulantes de origen natural, tanto en procesos de tratamiento de aguas residuales como potables, los cuales se describen a continuación:

Tabla 1

Investigaciones realizadas sobre coagulantes de origen natural a nivel internacional

Autor	Región – País	Origen Coagulante	Resultados obtenidos
Ndabigengesere, Narasiah & Talbot (1995).	Quebec – Canadá	<i>Moringa oleífera</i>	Remoción entre el 80% al 90% en aguas residuales sintéticas con turbidez inicial de 105 NTU
Asrafuzzaman, Fakhruddin & Hossain (2011)	Dhaka – India	<i>Cicer arietinum</i>	Remoción del 95.89% en agua con turbidez inicial de 100 NTU
Birima, Hammad, Desa & Muda (2013)	Selangor – Malasia	<i>Arachis hypogaea L</i>	Remoción del 93.2% en aguas con turbidez inicial de 200 NTU

Hussain, Ghouri & Ahmad (2019).	Quetta – Pakistán	<i>Pinus gerardiana</i>	Remoción del 82% en agua turbia sintética con turbidez inicial de 72 NTU
Ramírez (2019).	Cuenca – Ecuador	<i>Tamarindus indica</i>	Remoción del 80% en agua turbia sintética con turbidez inicial de 190 NTU

Nota: Autoría propia

Tabla 2

Investigaciones realizadas sobre coagulantes de origen natural a nivel nacional

Autor	Municipio – Departamento	Origen Coagulante	Resultados obtenidos
Alvarado (2012)	Duitama – Boyacá	<i>Solanum tuberosum</i>	Remociones muy bajas de turbidez, eficiente reducción del color aparente
Feria, Bermudez & Estrada (2014)	Montería - Córdoba	<i>Moringa oleifera</i>	Remoción del 94.8% en el río Sinú con turbidez inicial de 230 NTU

Cuadros (2020).	Bogotá – Distrito Capital	<i>Opuntia ficus indica</i>	Remoción del 76% en agua residual con turbidez inicial de 393 NTU
-----------------	------------------------------	---------------------------------	---

Nota: Autoría propia

Como antecedentes podemos mencionar como punto de partida la investigación realizada por Ndabigengesere, Narasiah & Talbot (1995) en el cual determinaron el principio de su mecanismo de reacción mediante la identificación de sus principales componentes (proteínas lípidos y carbohidratos), el cual no se encuentra en la vaina sino directamente en sus semillas las cuales una vez secas, presentan efecto coagulante tanto con cascara como sin cáscara, siendo este último más efectivo, también el estudio revela que comparado con el aluminio, los volúmenes de lodos son menores con el uso de la moringa y baja alteración al pH y la conductividad.

Entre las investigaciones más recientes podemos destacar la de Feria, Bermúdez & Estrada (2014) en la cual con la toma de ocho muestras de agua del río Sinú comprobaron que mediante el uso de polvo de semilla de moringa desengrasada con n-hexano, se obtienen altos porcentajes de remoción de turbidez en aguas con alta turbiedad los cuales no se ven afectados por el pH inicial presente en el agua cruda.

Los coagulantes comunes son sulfato de aluminio, cloruro férrico, cloruros de polialuminio y polímeros sintéticos. Todos estos coagulantes tienen en común la capacidad de producir iones cargados positivamente cuando se disuelven en agua, lo que puede contribuir a la neutralización de la carga (Degrémont, 1979 p.136).

La dosis del coagulante depende de varios parámetros y su concentración de contaminantes, el pH y la temperatura. La dosis óptima para el agua se define como la dosis de coagulante que da la menor turbidez en el agua tratada; cuando la dosificación del coagulante se da más allá del punto óptimo se presentan desventajas como el aumento del contenido de aluminio y/o hierro en el agua tratada lo que también puede llegar a conducir a un aumento de la turbidez.

En la actualidad los coagulantes como el hierro y las sales de aluminio son usados ampliamente en la actualidad, pero últimamente se ha contado con muchos estudios en los cuales se comprueba que también se pueden utilizar coagulantes naturales como en nuestro caso las semillas del árbol de *Moringa oleifera*. Desde tiempos antiguos, el agua superficial había sido tratada con la ayuda de hierbas como coagulantes naturales durante siglos en la India. Las semillas maduras de *Strychnos potatorum*, raíces rúcidas del rizoma de *Vetiveria zizanioides*, las semillas de *Elettaria cardamomo* y hojas de *Phyllanthus emblica* se han registrado para ser utilizadas para el tratamiento del agua en tiempos pasados y presentes (Sadgir, 2007, p.137).

La *Moringa (Moringa oleifera)* es un árbol tropical el cual tiene su origen en la India, con múltiples usos y su característica principal es que es resistente con una enorme capacidad para soportar sequías prolongadas. Es autóctona de la ruta sub-Himalaya que se extiende desde el río Chenab hasta Sharda; se cultiva en áreas áridas a húmedas de la región tropical como un producto para consumo humano principalmente, además de su explotación como forraje animal, medicina, tinte y aceite. Prabhakar & Hebbar (2008), detalla a la *Moringa oleifera* como una especie fácil de reproducir y de crecimiento rápido, caracterizada por sus largas vainas en forma de palo de tambor que contienen semillas, crece hasta 4 metros y arroja sus hojas al inicio del invierno, dejando de producir flores. De igual forma afirma que los numerosos usos

económicos de *Moringa oleífera* junto con su fácil propagación han suscitado un creciente interés internacional por este árbol el cual ya se encuentra en la mayoría de los países tropicales (África, Asia y América Latina) (p.111).

Las propiedades de la *Moringa oleífera* como coagulante son descritas por Abiyu et al., (2018) argumentando que las proteínas en la semilla de Moringa solubles en agua poseen propiedades coagulantes similares a las de los polímeros catiónicos sintéticos de aluminio y el uso de especies de Moringa para la clarificación del agua es parte de los conocimientos indígenas africanos. Jahn (1991 citado por Abiyu et al., 2018, p.5) y Gottsch, (1992, p.26) estudiaron y confirmaron por primera vez las propiedades coagulantes de las semillas de Moringa después de observar a las mujeres en Sudán utilizar las semillas para aclarar las aguas turbias del Nilo y en Etiopía respectivamente. Ndabigengesere et al., (1995, p.782) manifiesta que los agentes activos de la coagulación presentes en la moringa son proteínas catiónicas dimericas de peso molecular de aproximadamente 13 kilodaltones (kDa) que tienen un punto isoeléctrico entre 10 y 11. Estas proteínas actúan como un polielectrolito catiónico, que se une a las partículas solubles y crea unión entre ellas, dando lugar a grandes flocs en el agua. La agitación y la mezcla aceleran la floculación electrostática, y los flocs condensan los contaminantes (Gottsch, 1992).

Caso de estudio

El acueducto ASUARTELAM (Asociación de Usuarios Acueducto Regional del Tequendama) es una entidad sin ánimo de lucro, de carácter comunitario, fundado y puesto en marcha en el año 1984 y que actualmente distribuye agua potable a 2200 suscriptores distribuidos en seis veredas de la zona rural del municipio de Tena y seis veredas de la zona rural del municipio de La Mesa.

Actualmente su sistema de tratamiento está sub dimensionado (fue diseñado para tratar un caudal de 14 L/s) y la empresa no cuenta actualmente con el suficiente músculo financiero para realizar los estudios y diseños y la construcción de una nueva planta de tratamiento. Actualmente el caudal concesionado y el que pasa por la planta de tratamiento es de 20 L/s, caudal el cual es otorgado por parte de la autoridad ambiental en la fuente superficial denominada Quebrada La Palestina, perteneciente a la cuenca media del Río Bogotá.

Descripción de las estructuras de tratamiento

Ubicación de la captación

La captación, la cual se realiza por medio de una bocatoma de fondo, está ubicada sobre el cuerpo de agua denominado por la Corporación autónoma Regional de Cundinamarca como Quebrada La Palestina, aunque los lugareños lo denominan quebrada Coyancha.

La planta de tratamiento se encuentra aproximadamente a cincuenta y cinco (55) metros de la bocatoma, la cual se une a esta mediante una tubería de aducción de seis pulgadas (6.0”) en PVC, la cual data del momento de su construcción en el año 1984.

Figura 1*Ubicación de la captación y planta de tratamiento de ASUARTELAM*

Fuente: Autoría propia

Nota. Los puntos fueron tomados en sitio mediante GPS GARMIN Oregon 650 y exportados a Google Earth.

Tabla 3

Georreferenciación del punto de captación y la planta de tratamiento

Lugar	Latitud	Longitud	Altitud
Bocatoma	4°40'36.41"N	74°22'34.16"O	1842 msnm
Planta de tratamiento	4°40'34.61"N	74°22'34.21"O	1833 msnm

Fuente: Autoría propia

Tanque de quietamiento

Estructuralmente el tanque de quietamiento está construido en mampostería de ladrillo y se encuentra en buen estado, pero no cumple con la norma de sismo resistencia lo que lo hace vulnerable a un sismo, dado que no está construido de concreto con su correspondiente refuerzo.

Figura 2

Tanque de quietamiento



Fuente: Autoría propia

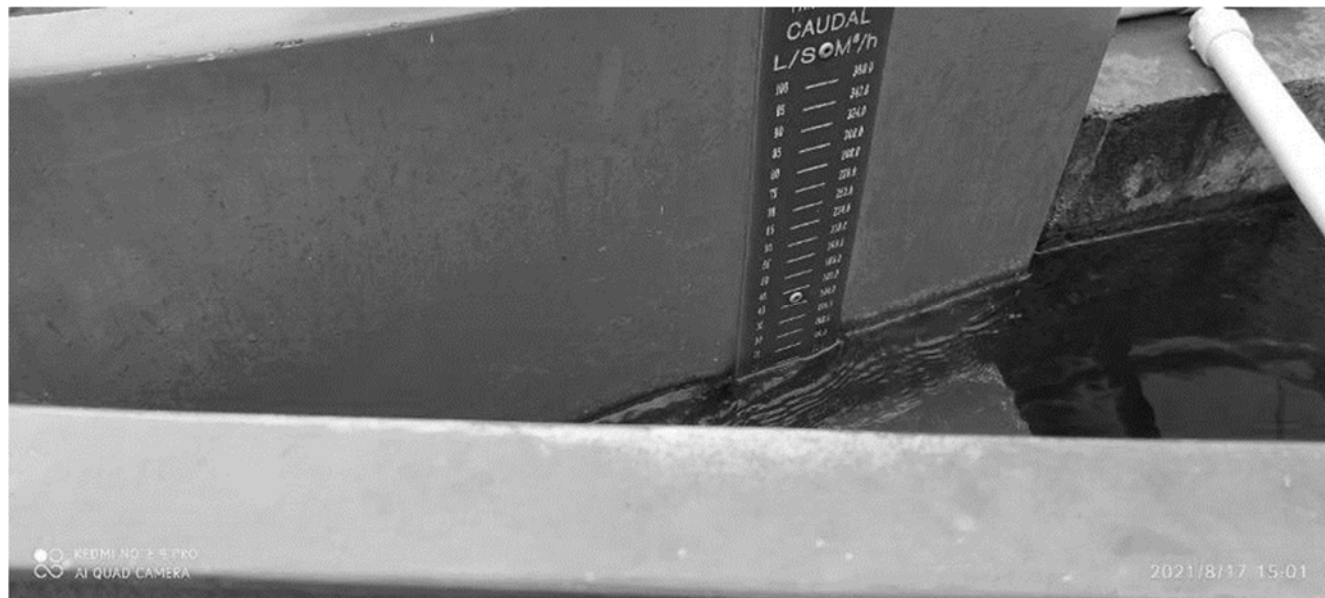
Canaleta Parshall

El caudal de ingreso a la planta es medido por medio de un canal Parshall fabricado en fibra de vidrio, que se encuentra instalado al inicio del tratamiento, donde se le adiciona el coagulante por medio de una bomba dosificadora marca Hanna Instruments, referencia BL-5. El aforador Parshall recibe el agua del tanque de quietamiento de manera superficial y la conduce a la unidad de floculación también superficialmente, inmediatamente después de la mezcla

rápida producida en el resalto hidráulico. El ancho de la garganta en la canaleta es de 15,0 cm, aproximadamente seis pulgadas (6”).

Figura 3

Aforador Parshall



Fuente: Autoría propia

Nota: De acuerdo con la regleta, el aforador puede medir caudales de hasta 100 litros por segundo.

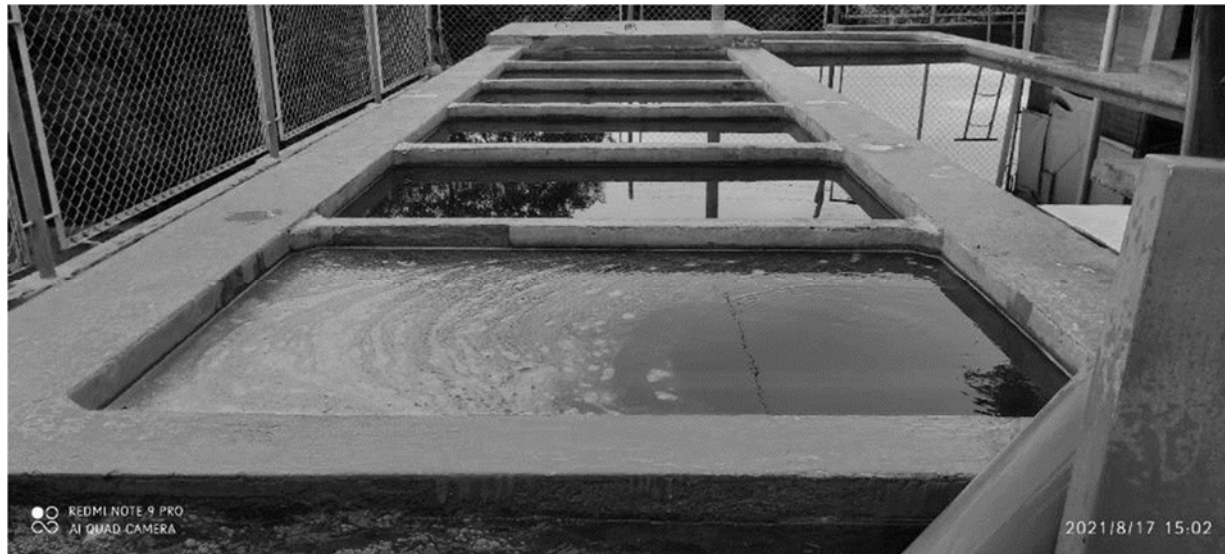
Figura 4*Bomba dosificadora Hanna BL-5*

Fuente: Autoría propia

Floculador hidráulico de flujo vertical

El sistema de floculación está compuesto de doce canales de flujo vertical que forman seis cámaras implementadas por trece tabiques en concreto. Físicamente, el floculador se encuentra en buenas condiciones; sin embargo, se evidencia claramente que al estar elaborado en mampostería de ladrillo, la constante humedad y exposición al fluido genera vegetación y algas en las paredes internas de los floculadores, sumado a esto, la obra es muy vulnerable a sismos por carecer de concreto y refuerzo.

Internamente, incluyendo todos sus compartimientos y la cámara de salida, posee una longitud de 9,45 m y un ancho de 1,75 m; el espesor de los muros es de 0,30 m; su altura es variable: en el extremo de aguas arriba es de 2,28 m; en el extremo de aguas abajo es de 2,48 m y en la parte central es de 2,68 m.

Figura 5*Floculador hidráulico de flujo vertical*

Fuente: Autoría propia

Nota: Nótese en la imagen el tabique que divide la cámara.

Sedimentador de Alta Tasa

El tanque sedimentador de la planta de tratamiento es de forma rectangular en planta y con muros de ladrillo; internamente, sin incluir la cámara de entrada, posee una longitud de 5,93 m y un ancho de 1,87 m. El espesor de los muros es de 0,30 m. Su altura es variable: en el extremo de aguas arriba es de 1,92 m; en el extremo de aguas abajo es de 1,93 m y en la parte central es de 2,12 m. Posee placas inclinadas de asbesto, por lo cual es un sedimentador de alta tasa.

Figura 6*Sedimentador de Alta Tasa*

Fuente: Autoría propia

Nota: Se evidencian las placas inclinadas de asbesto, las cuales acababan de ser lavadas

Unidad de filtración

La unidad de filtración fue construida entre los meses de abril y junio de 2021 y puesta en servicio a mediados del mes de julio del mismo año. Consiste en 4 tanques fabricados en acero al carbono recubiertos internamente con pintura epóxica y en los cuales están distribuidos los lechos filtrantes compuesto por antracita, sílice en dos densidades diferentes y grava. La unidad está diseñada para tratar el caudal concesionado y para reducir 10 UNT.

Figura 7*Unidad de Filtración*

Fuente: Autoría propia

Nota: Se evidencia que están en una altura menor respecto a las demás estructuras de la planta, con el fin de tener la cabeza de presión suficiente para el retro lavado.

Desinfección

La desinfección se realiza mediante la dosificación de cloro gaseoso (Cl_2), la cual se realiza a través de un rotámetro (clorador) instalado en la válvula del cilindro y de allí conducido al eyector ubicado en la tubería de salida del agua filtrada el cual según Arboleda (2000):

Consiste un tubo Venturi a través del cual pasa una corriente de agua, que crea una subpresión en un diafragma metálico, obligando a éste a desplazarse y creando un vacío parcial en todos los conductos y válvulas del clorador. En el eyector el gas cloro se mezcla con agua y produce una solución cuya concentración debe ser unos 3500 mg/L (p.711).

Figura 8

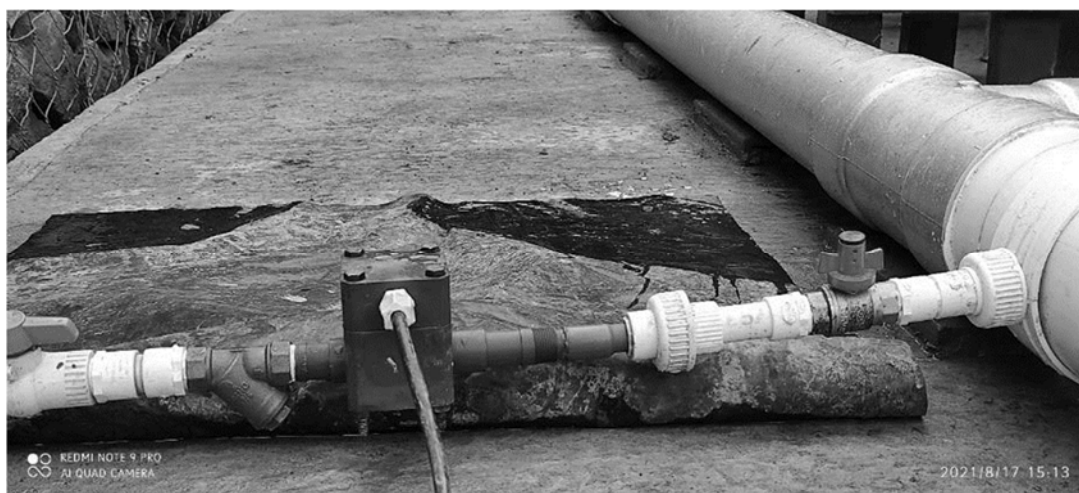
Sistema de desinfección – clorador



Fuente: Autoría propia

Figura 9

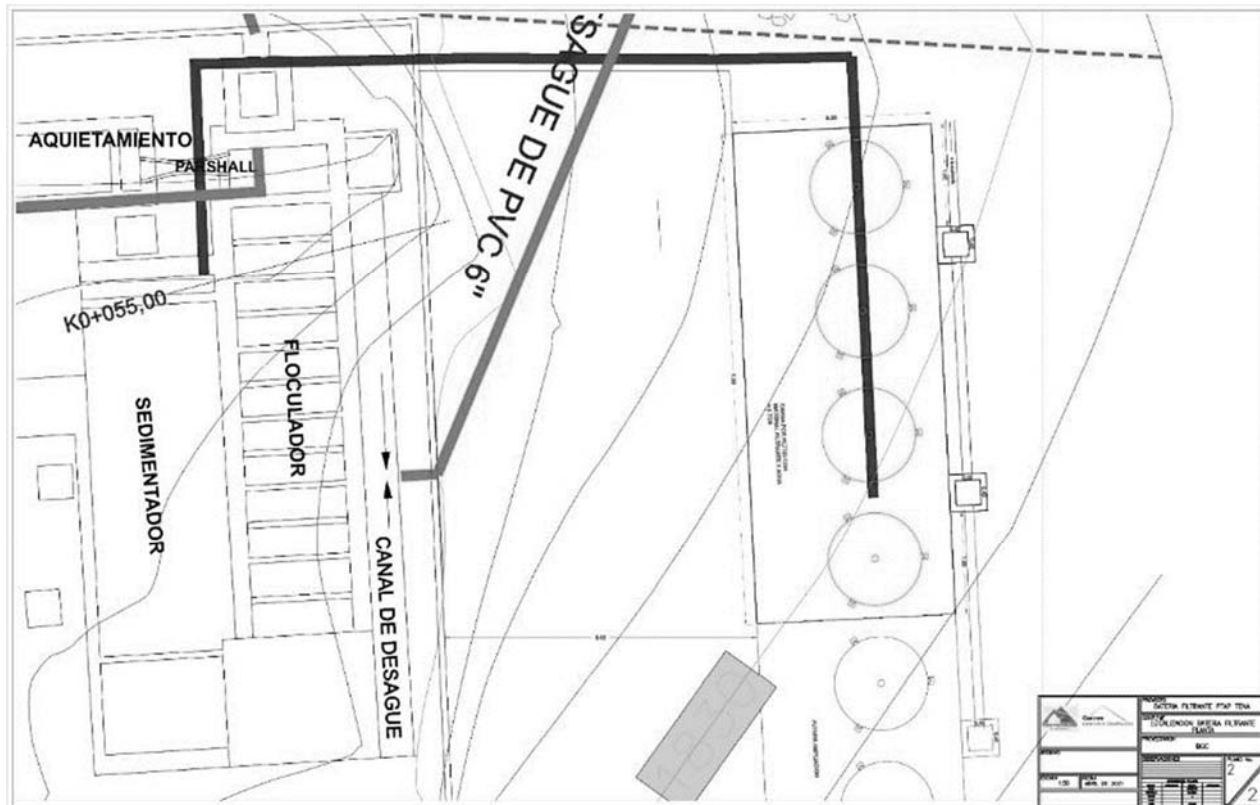
Sistema de desinfección – eyector



Fuente: Autoría propia

Figura 10

Disposición estructuras en planta de tratamiento



Fuente: Cortesía Acueducto ASUARTELAM

Metodología

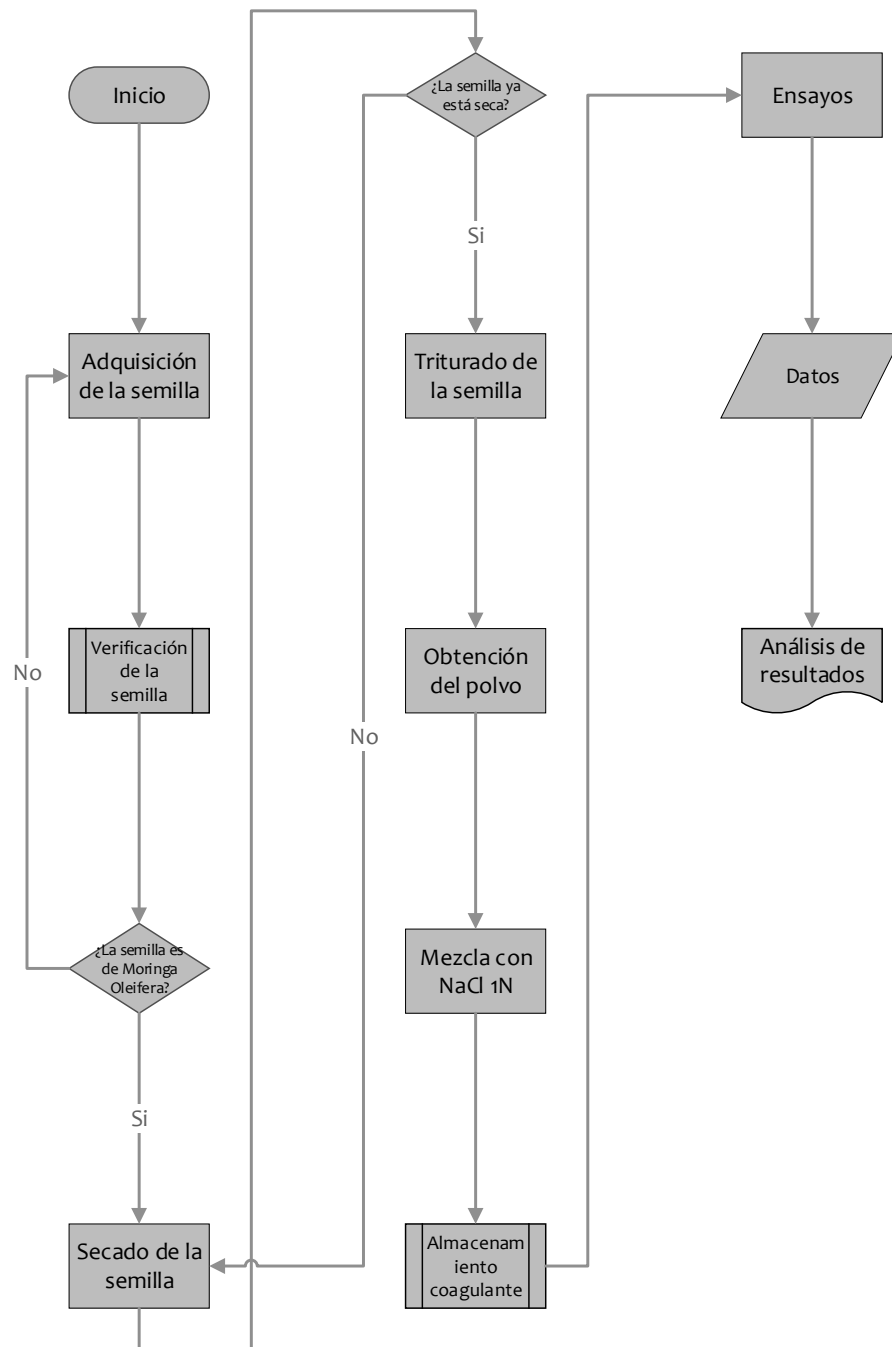
La metodología del presente trabajo de investigación se dividió en dos etapas. La primera etapa consistió en la obtención de las semillas de *Moringa oleífera*, para su posterior preparación como coagulante, estas semillas fueron obtenidas a través de Semilleros del Tequendama S.A.S, quien nos suministró cinco kilos de la semilla en su vaina en el mes de marzo de 2021. El diagrama de flujo del proceso se detalla más adelante (figura 11)

Para verificar si las semillas eran de la especie que se esperaba, se revisó en la literatura y de acuerdo con Vozzo (2002):

“Los frutos pendulares (vainas o baquetas) se nacen solos o en parejas. Oscilan entre 15 y 120 cm, pero suelen tener entre 30 y 50 cm de largo y unos 2 cm de espesor. Son de color verde a púrpura y embotadamente triangular o casi cilíndrica en la sección transversal, exhiben nueve costillas y se estrechan hasta cierto punto. Las baquetas maduran en aproximadamente 6 semanas, luego se abren a lo largo de tres válvulas que revelan de 20 a 25 semillas incrustadas en una médula seca, blanca, similar a un tejido. y dispuestos en una sola fila. Las semillas son redondas a triangulares de marrón a negro, y por lo general llevan tres alas de papel” (p.580) (figura 12)

Figura 11

Diagrama de flujo del proceso



Fuente: Autoría propia

Figura 12

Semillas adquiridas



Fuente: Autoría propia

Figura 13

Descripción gráfica de la Moringa oleífera



Fuente: Recuperada de Vozzo (2002, p.581)

Nota: La forma de la vaina es igual a la adquirida.

Teniendo la certeza que las vainas si eran de *Moringa oleífera*, se evidenció que la médula de estas todavía contenía agua, razón por la cual se colocaron a secar bajo el sol por un periodo de seis semanas hasta la segunda semana del mes de mayo de 2021, en las cuales las vainas abrieron por si solas, dejando expuestas las semillas con sus respectivas alas de papel. El total de semilla obtenida fue de un kilogramo, quiere decir que el 80% de la vaina era cáscara, médula y agua.

Figura 14

Semillas de moringa en su vaina

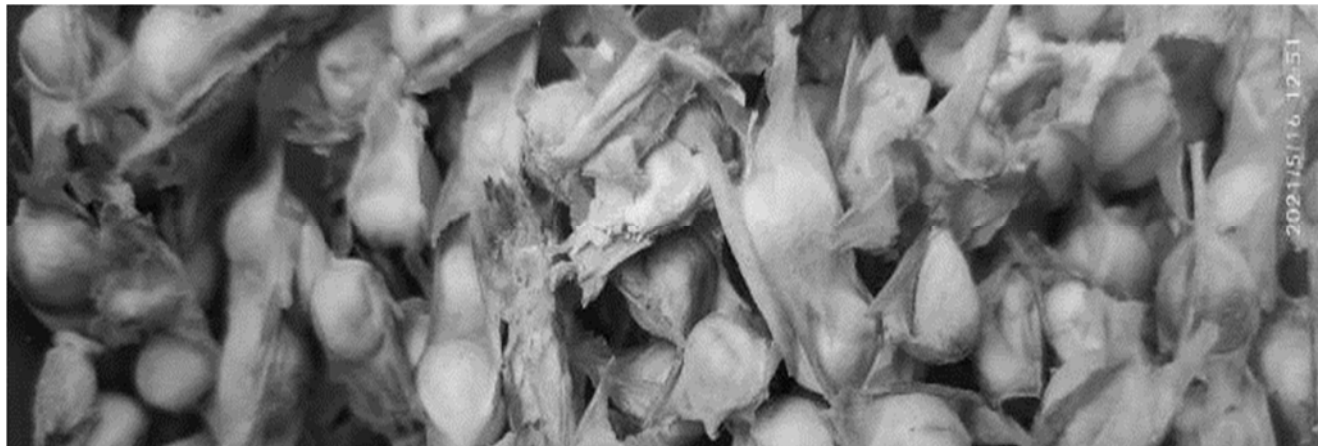


Fuente: Autoría propia

Nota Nótese la disposición de las semillas en la vaina, recubiertas de su papel

Figura 15

Semilla de moringa, recolectada fuera de la vaina



Fuente: Autoría propia

La preparación del coagulante se realizó de acuerdo con el método de preparación propuesto por Kalibbala et al. (2009, p.709) en donde se adecuó la semilla para luego en sesión en el laboratorio 307 de la sede nacional José Celestino Mutis se:

- a) Se trituro la semilla obtenida de vainas secas mediante el uso de una licuadora de cocina (figura 15), obteniendo así el polvo fino de la semilla (figura 16).

Figura 16

Triturado de la semilla



Fuente: Autoría propia

Figura 17

Polvo de semilla de moringa



Fuente: Autoría propia

- b) En el laboratorio, se desengrasó mezclando el polvo en etanol al 95% por treinta minutos. Luego los sólidos se separaron por centrifugación para luego ser secados a temperatura ambiente por 24 horas. (Figuras 17 y 18)

Figura 18

Polvo de semilla en alcohol etílico



Fuente: Autoría propia

Figura 19

*Centrifugación de sólidos a 4000 r*min⁻¹*



Fuente: Autoría propia

- c) Después con la muestra seca en el laboratorio de la PTAP se preparó una mezcla de 5 gramos de polvo con 500 mL de solución extractora, el cual para este caso será NaCl a 1 N; la cual se agitó por 30 minutos en un agitador magnético (en este caso un Hanna Instruments HI 180) para luego ser filtrado a través de un papel Whatman número 3; repitiendo la operación hasta poder obtener 10 litros de solución (figuras 19, 20 y 21)

Figura 20

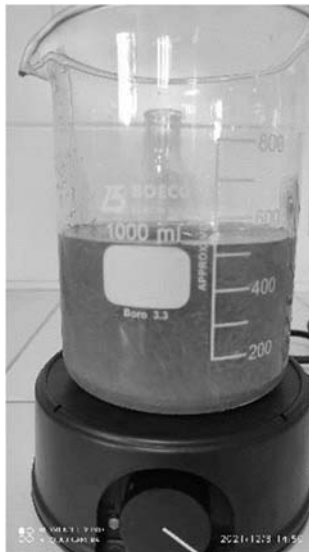
Cloruro de sodio usado en preparación del coagulante



Fuente: Autoría propia

Figura 21

Mezcla del polvo con NaCl IN



Fuente: Autoría propia

Figura 22

Solución coagulante preparada



Fuente: Elaboración propia

- d) La solución filtrada se envasa en recipientes de vidrio ámbar, refrigerada pudiendo ser utilizada dentro de los siete días después de preparada (figura 22).

Figura 23

Almacenamiento de la solución.



Fuente: Autoría propia

La segunda etapa consistente en el diseño experimental comprendió la realización de las tomas de muestras a la entrada del sistema de potabilización, a los cuales se le tomaron los parámetros de pH, temperatura (tomados con un termómetro-medidor de pH Hanna Instruments HI 98128 – figura 23), color aparente (mediante kit comparador de color Hach 2234-00 – figura 24) y turbidez (Turbidímetro por fotometría Hanna HI93703 rango 0 a 1000 NTU -figura 25) , propiedad del Acueducto. Luego se procedió en cada uno de las tomas a realizar los ensayos de

jarras, estos realizados con el equipo propiedad también del acueducto (figura 26) para así poder obtener las dosis óptimas para la aplicación en el proceso de tratamiento.

Teniendo en cuenta el no afectar la continuidad en la operación del prestador, fue posible realizar tres ensayos realizados los días 04, 06 y 11 de diciembre en hora aleatoria, también se aprovechó la medición de parámetros que se controlan y miden en la planta del prestador como hierro y nitratos mediante el fotómetro multiparámetro Hanna Instruments HI83308 (figura 27), recién adquirido por el acueducto. En el ensayo del día 11 de diciembre fue posible probar el coagulante en el floculador y sedimentador, teniendo en cuenta que el servicio en el sistema estaba suspendido por movimientos de masa en la red de conducción y sumado a que el tiempo de retención hidráulica de la planta es de tan solo 24 minutos (1 minuto de mezcla rápida, 15 minutos del floculador transversal y 8 del sedimentador). Dato entregado por el área técnica del prestador y por el operador de planta de la ptap que se encontraba de turno.

Figura 24

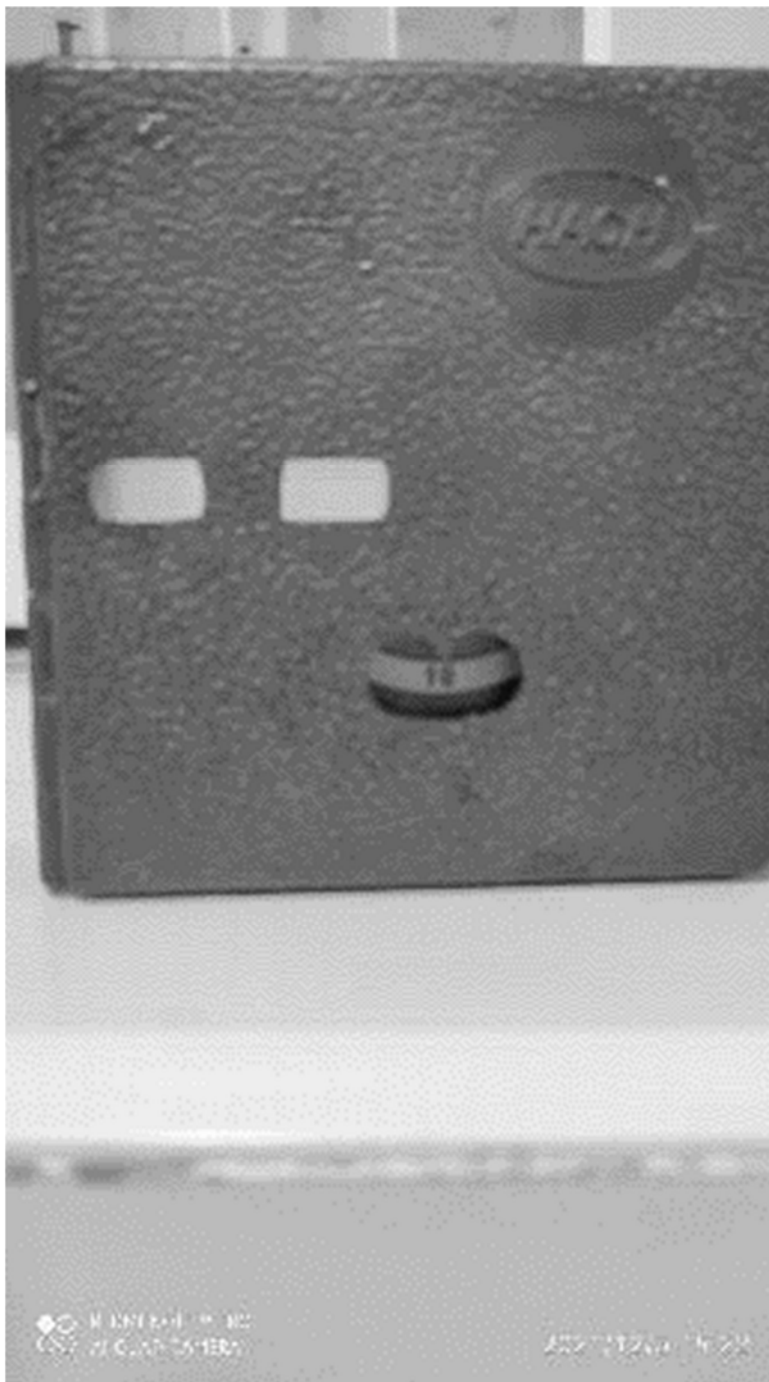
pH metro y termómetro Hanna HI98128



Fuente: Autoría propia

Figura 25

Kit comparador de color Hach 2234-00



Fuente: Autoría propia

Figura 26

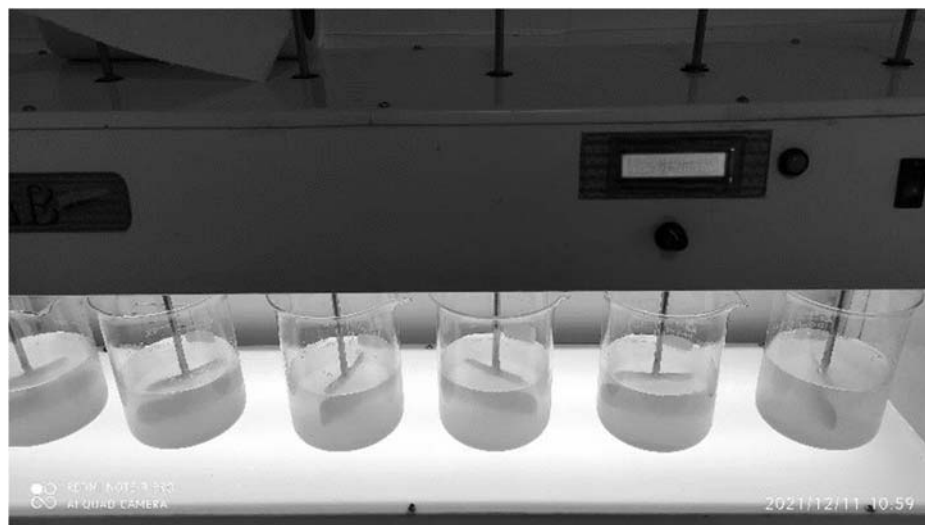
Turbidímetro Hanna HI93703



Fuente: Autoría propia

Figura 27

Equipo de ensayo de jarras de 6 puestos



Fuente: Autoría propia

Figura 28

Fotómetro multiparámetro Hanna HI83308



Fuente: Autoría propia

Resultados

Ensayo del 04 de diciembre de 2021

El ensayo comenzó a las 14:30 horas en el cual el agua de la fuente presentó una turbiedad de 106 NTU, pH de 7.24 y temperatura de 18.5° y color grisáceo. Se realizó ensayo de jarras con dosificaciones iniciales de 20, 40, 60, 80, 100 y 120 ppm

El balance de masas permitió encontrar las dosis para cada uno de los ensayos mediante la siguiente formula:

$$V_1 * C_1 = V_2 * C_2$$

$$V_1 = \frac{V_2 * C_2}{C_1}$$

En donde el volumen 1 y la concentración 1 corresponden al coagulante y el volumen 2 y la concentración 2 corresponden a la muestra. Con este balance de masas se formuló el libro de Excel para poder determinar las dosis para los ensayos de jarras.

Para este ensayo se tuvo como control la dosificación de hidroxipolicloruro de aluminio (marca comercial utilizada por el prestador *Quminfloc*) y las remociones obtenidas con este coagulante polimérico el cual fue dosificado a razón de 0.46 mL/s de acuerdo a los ensayos realizados por los operadores de planta del prestador.

Tabla 4

Ensayo de jarras del 04 de diciembre

	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6	PAC Prestador
C1 (mg/L)	10000	10000	10000	10000	10000	10000	
V2 (mL)	500	500	500	500	500	500	
C2 (mg/L)	20	40	60	80	100	120	
V1 (mL)	1	2	3	4	5	6	0,46
Turbidez Inicial (NTU)	106	106	106	106	106	106	106
Turbidez Final (NTU)	22,7	14,73	11,16	12,07	12,34	16,14	19,3
% remoción	78,58%	86,10%	89,47%	88,61%	88,36%	84,77%	81,79%
Ph		7,24	7,14	7,77			
Hierro		0,701	0	0			
Nitratos		13	0	0			
Color Aparente		10	0	0			
		Fuente	Sobrenadante	PAC Prestador			

Fuente: Autoría propia

nitratos	18	0	0
Color aparente	90	10	30
	Fuente	Sobrenadante	PAC Prestador

Fuente: Autoría propia

Ensayo del 11 de diciembre de 2021

El ensayo comenzó a las 10:45 horas en el cual el agua de la fuente presentó una turbiedad de 83 NTU, pH de 8.97 y temperatura de 11.2° y color pardo. Se realizó ensayo de jarras con dosificaciones de 50, 60, 70, 80, 90 y 100 ppm. Control de *Quimifloc* dosificado a razón de 1.25 mL/s

Tabla 6

Ensayo de jarras 11 de diciembre

	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6	PAC
C1 (mg/L)	10000	10000	10000	10000	10000	10000	
V2 (mL)	500	500	500	500	500	500	
C2 (mg/L)	50	60	70	80	90	100	
V1 (mL)	2,5	3	3,5	4	4,5	5	1,25
Turbidez Inicial (NTU)	83	83	83	83	83	83	83

Turbidez Final (NTU)	41,8	32,41	18,39	24,42	25,85	24,35	10
% remoción	49,64%	60,95%	77,84%	70,58%	68,86%	70,66%	87,95%

pH	8,97	7,17	7,53
hierro (mg/L)	1,008	0,00	0
nitratos (mg/L)	18	0	0
Color Aparente			
UPC	90	20	10
	Fuente	Sobrenadante	PAC Prestador

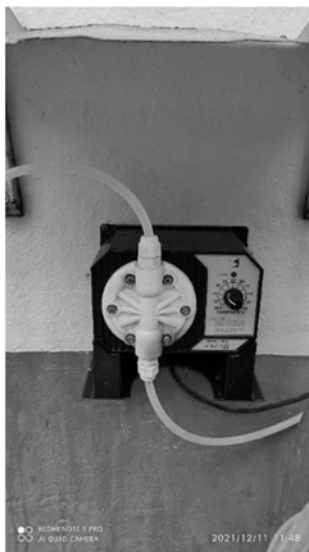
Fuente: Autoría propia

En este ensayo fue posible ver la actividad del coagulante en el floculador y el sedimentador de la planta de tratamiento, el cual se dosificó a razón de 3.5 mL/seg de acuerdo con el ensayo de jarras realizado. Los ensayos de jarras realizados comprendieron una mezcla rápida de $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ @ 1 minuto y una floculación a $40 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ @ 15 minutos. El ensayo pudo realizarse gracias a un cierre total de las redes de conducción por reparación.

El coagulante el cual fue dosificado mediante una bomba dosificadora peristáltica Hanna BL-5, a razón de 210 mL/min (figura 28 y 29), presentó en el floculador coágulos uniformes, los cuales se pudieron ver en los tabiques del floculador transversal (ver figura 30). A la salida del floculador presentó una turbidez de 18 UNT a los 20 minutos de comenzada la dosificación, teniendo concordancia con lo encontrado en el ensayo. Luego, en la estructura de sedimentación, el flóculo no logró ser atrapado en su totalidad por los paneles de sedimentación, y dando una turbidez de 26 UNT (figura 31).

Figura 29

Bomba dosificadora Hanna BL 5



Fuente: Autoría propia

Figura 30

Dosificación del coagulante. Se visualiza el pomo de succión de la bomba



Fuente: Autoría propia

Figura 31

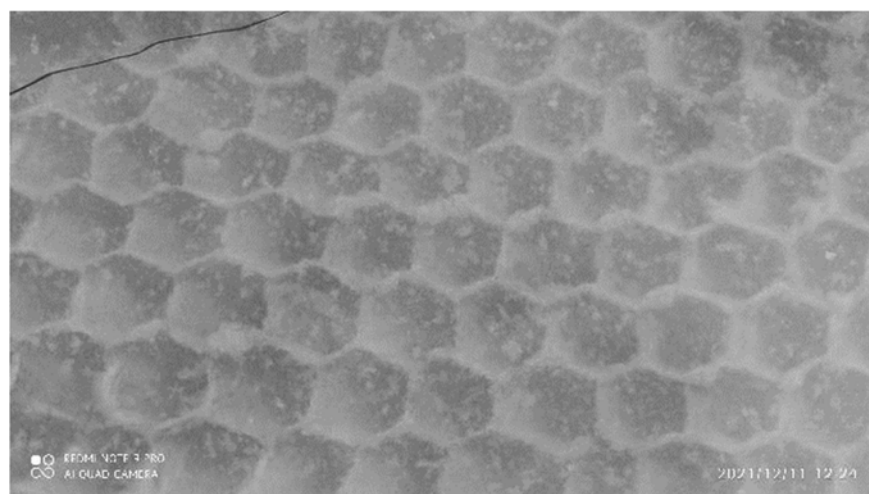
Flóculos generados en el floculador



Fuente: Autoría propia.

Figura 32

Flóculos pasando por los paneles de sedimentación



Fuente: Autoría propia

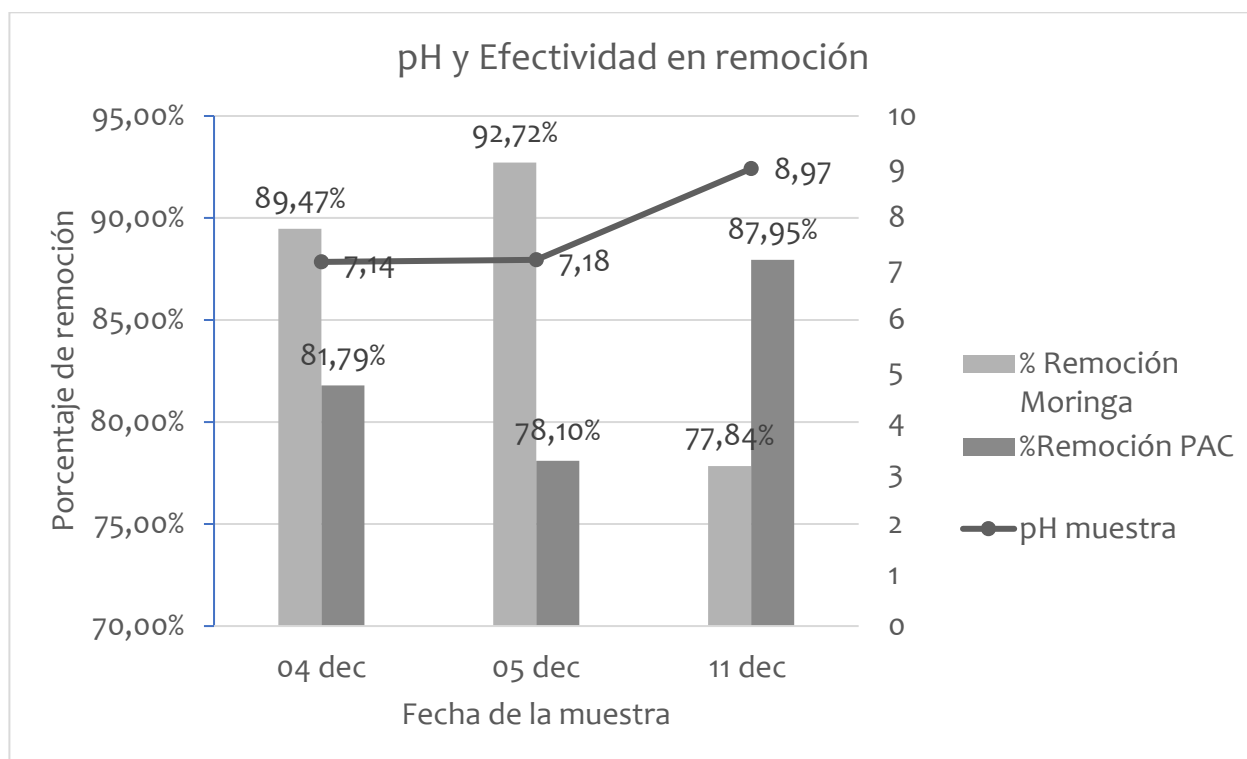
Se evidenció que la solución de polvo de moringa generó un flóculo muy liviano el cual se rompió fácilmente al pasar del floculador al sedimentador.

De los ensayos realizados, se encontraron también los siguientes resultados

pH y eficiencia de remoción

Figura 33

Relación del pH y la efectividad en remoción



Fuente: Autoría propia

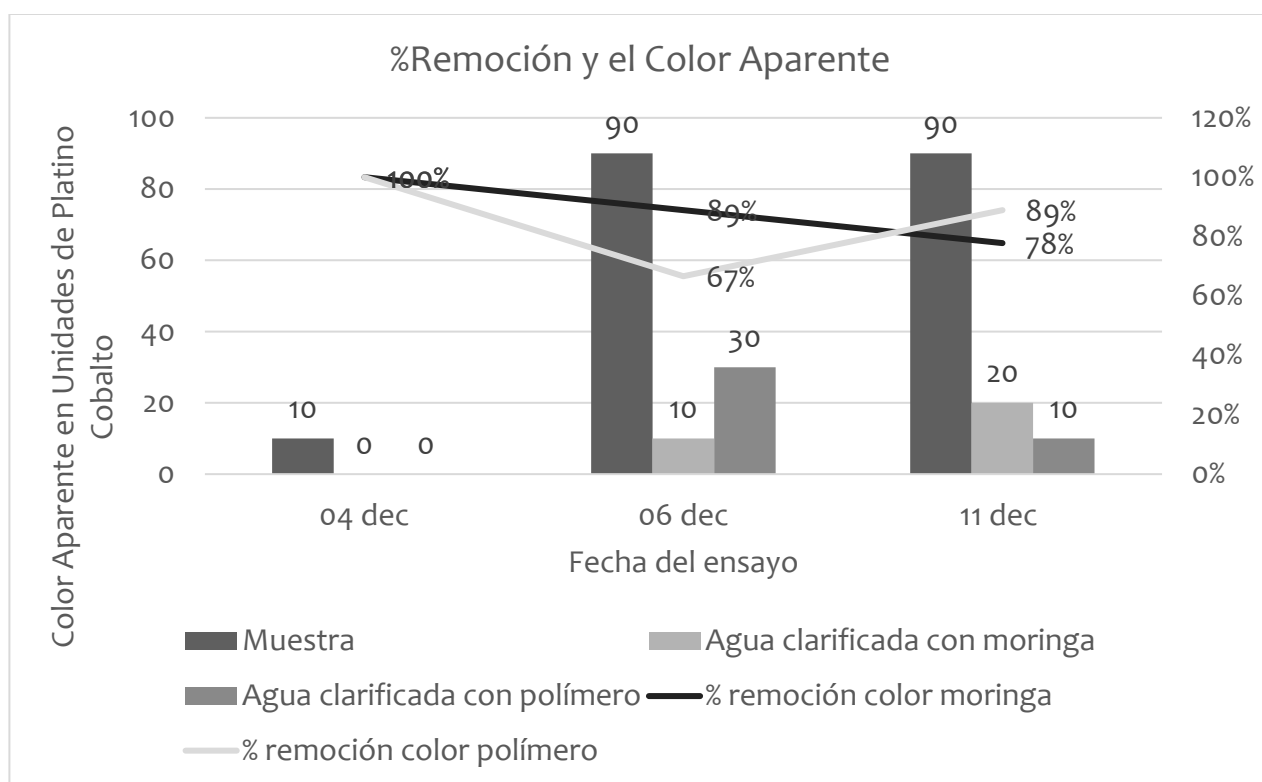
La efectividad del coagulante es directamente proporcional al pH de la muestra, por lo que se evidenció que el coagulante trabajó mejor en pH cercanos a 7.0, ya que con un valor básico de aproximadamente 9, el coagulante perdió un 14.9% de eficiencia respecto a su mejor

taza de remoción, el cual fue con un pH de 7.18; aunque para el caso del polímero tuvo mejor respuesta en pH alto que el coagulante a base de semilla de moringa.

Remoción y Color Aparente

Figura 34

Relación entre el porcentaje de remoción y el color aparente



Fuente: Autoría propia

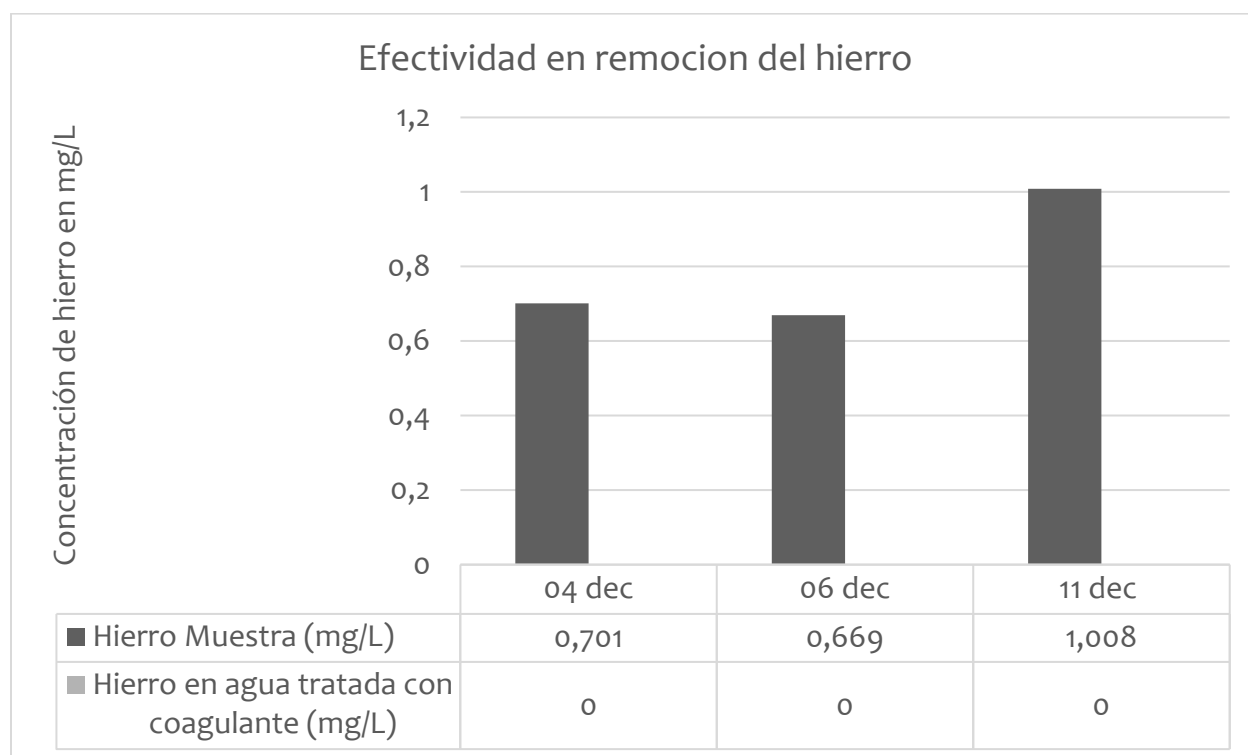
El gráfico nos indica la relación directa que existe entre la turbidez y el color aparente, Así que entre mayor el porcentaje de remoción del coagulante, también su eficiencia en la remoción del color. En términos de lo establecido con la Resolución 2115 de 2007 en el Artículo 2, el color aparente para el ensayo 3 está por encima del valor máximo permitido, el cual es de 10 unidades de platino – cobalto (UPC)

Remoción del hierro

La concentración de hierro en el agua captada para las muestras estaba por encima de los límites establecidos en el Artículo 7 de la Resolución 2115 de 2007 (valor máximo aceptable de 0.3 mg/L). Sin embargo, el coagulante removió las concentraciones de hierro en su totalidad.

Figura 35

Remoción del hierro



Fuente: Autoría propia

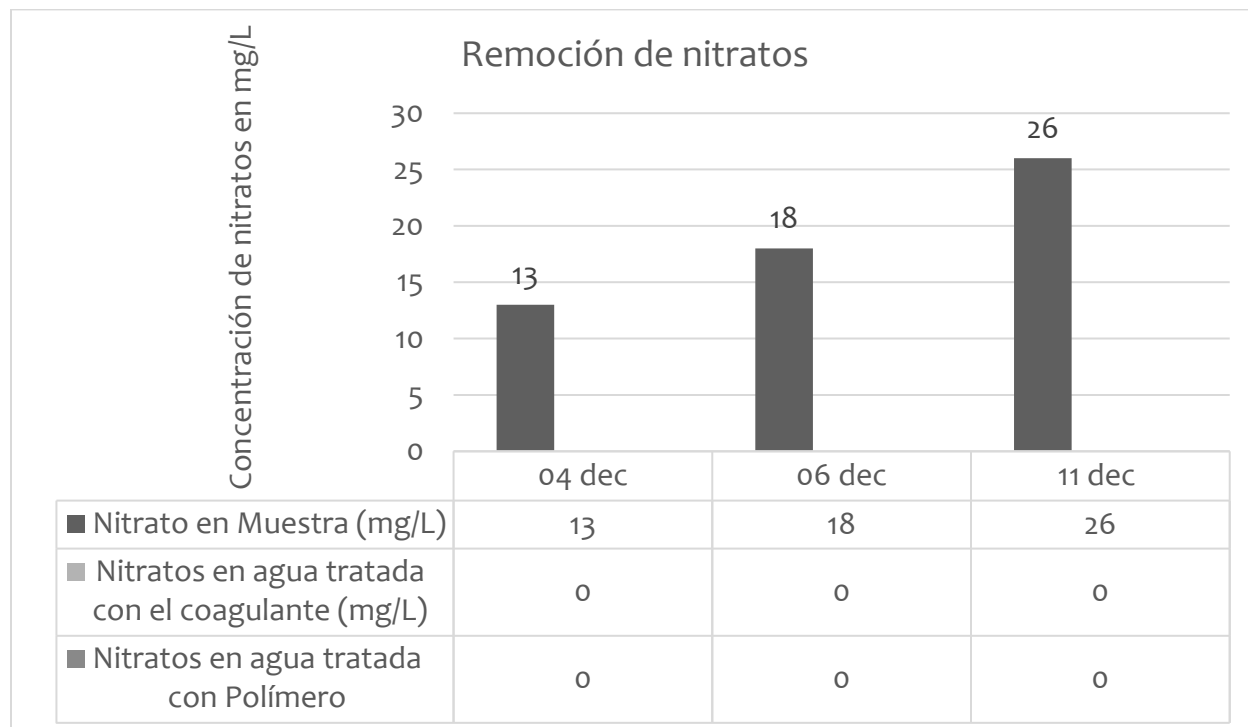
Remoción de nitratos

Las concentraciones de nitratos en el agua de las muestras tomadas de la fuente fueron de 13, 18 y 26 mg/L, los cuales también están por encima del valor máximo permitido establecido en el Artículo 6 de la Resolución 2115 de 2007, el cual es de 10 mg/L. A pesar de las

concentraciones elevadas el coagulante demostró poder remover totalmente estos compuestos. El coagulante control también removió totalmente estas concentraciones.

Figura 36

Efectividad en remoción de nitratos



Fuente: Autoría propia

Costos del proyecto

El estudio del coagulante constó de tres etapas: la primera consistente en la obtención de la semilla de moringa en su vaina; la segunda la obtención del extracto de la semilla y por último la etapa de pruebas y ensayos, de la cual se obtuvieron los siguientes costos asociados al proyecto:

Tabla 7

Costos del proyecto

Etapa	Proceso	Unidad de medida	Cantidad	Costo (en COPS)
1. Obtención de la semilla	Compra de la semilla	Kilogramo	5	\$175.000
	Desengrase de la semilla con alcohol etílico	Litro	1	\$110.000
2. Obtención del extracto de la semilla	Uso de instrumental de laboratorio del acueducto (estimado de acuerdo al costo del trabajo del	Día	1	\$20.000

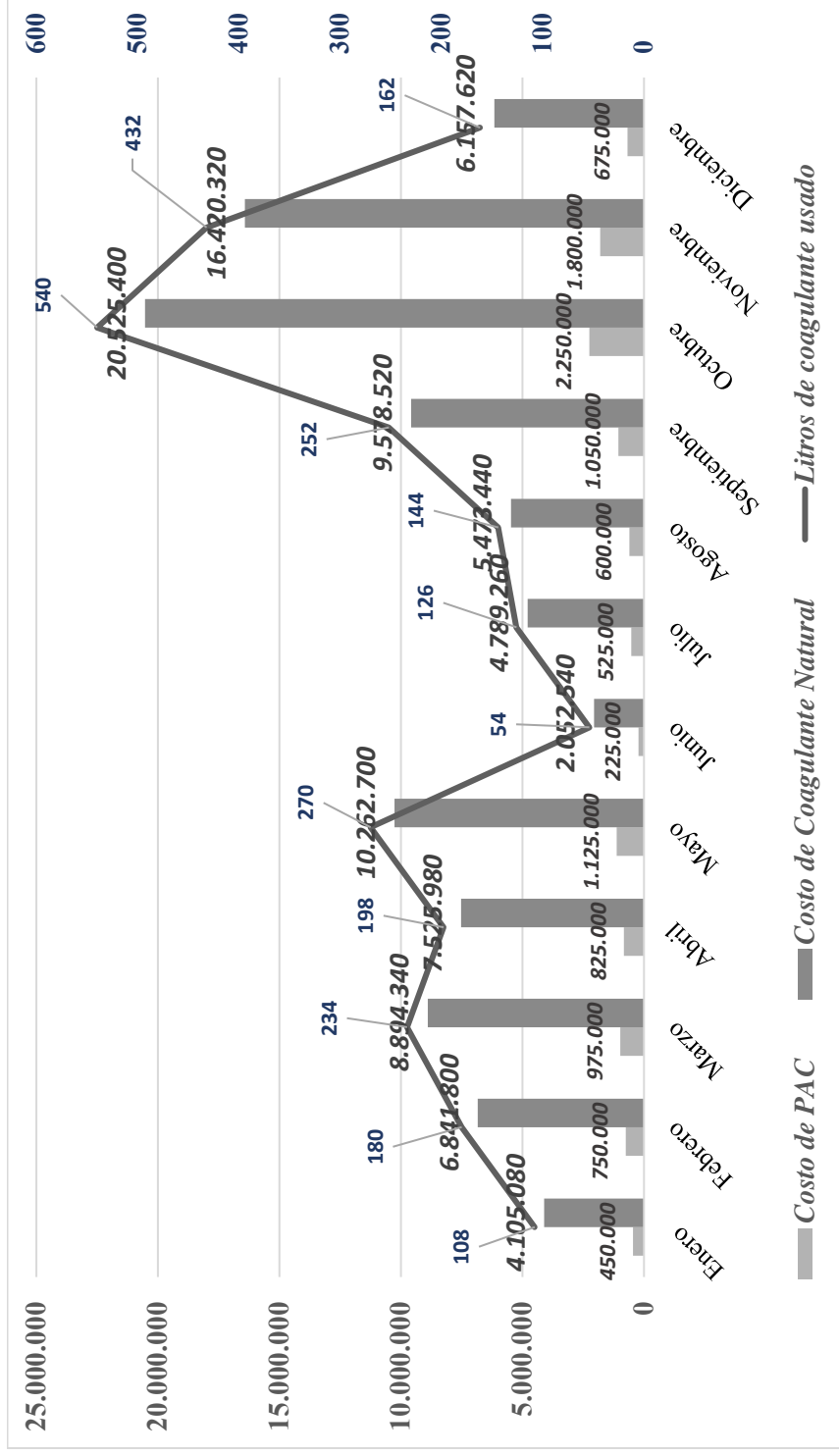
operador de planta)				
Papel de filtro	Unidad	10		\$11.000
Frascos de ámbar	Unidad	6		\$12.000
Cloruro de sodio al 99%	Gramos	100		\$10.000
Agua destilada	Litros	10		\$42.100
<i>Subtotal Obtención del coagulante</i>				<i>\$380.100</i>
3. Pruebas y ensayos	Uso de equipos de fotometría y test de jarras	Día	3	\$75.000
	Uso de bomba peristáltica	Día	3	\$30.000
<i>Subtotal ensayos</i>				<i>\$105.000</i>
<i>Total del proceso</i>				<i>\$485.100</i>

Nota: precios año 2021. Fuente: Autoría propia

Con base en el costo de producir 10 litros de solución coagulante (\$380.100), se procede a comparar gráficamente el costo de coagulación con la solución de moringa contra el coagulante utilizado por el prestador de acuerdo con el gasto registrado por la empresa durante el año 2021:

Figura 37

Comparación costo coagulación con moringa vs. PAC



Fuente: Autoría propia

Discusión de los resultados

La principal ventaja de la moringa es su eficacia para la remoción de la turbidez, ya que se obtuvieron tasas de remoción más efectivas que el PAC en el ensayo de jarras, sin embargo, al ser sometido al uso en el proceso de coagulación – sedimentación, se evidenció que el peso del floculo generado es liviano, haciendo que este se rompiera a su paso por el sedimentador, haciendo aumentar la turbidez del agua clarificada respecto a la turbidez registrada a la salida del floculador. Es necesario hacer énfasis en que el proyecto buscaba la efectividad de la moringa como agente coagulante en escala real, teniendo en cuenta que la mayoría de los estudios de la *Moringa oleífera* fueron realizados en condiciones de laboratorio y con turbiedades sintéticas.

La moringa, además de remover la turbidez, demostró eficacia para remover totalmente concentraciones de nitratos, hierro total y color aparente, características que inciden significativamente en la calidad del agua para consumo humano de acuerdo a lo establecido en la Resolución 2115 de 2007.

Es evidente que mientras un litro de PAC tiene un costo aproximado de \$4.200, producir un litro de solución coagulante de moringa ronda por los \$38.000, siendo una gran desventaja frente al coagulante comercial para un prestador rural. Es necesario indicar que el costo de la preparación del coagulante natural se ve fuertemente afectado por el alto costo del alcohol etílico y el cloruro de sodio, productos usados en el desengrase y la extracción de la solución. Para el caso del prestador ASUARTELAM, realizar un proceso de coagulación con la solución de moringa realizada en el proyecto hubiera costado 9 veces más que el actual con hidroxipolicloruro de aluminio.

Una dificultad presentada en el ensayo es que la solución se descompone pasados los siete días a partir de preparada, a pesar de conservarse refrigerada y protegida de la luz solar, lo que implicaría para un prestador en una zona apartada el no poder disponer de provisiones del coagulante para largos periodos de tiempo.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Se llega a la conclusión que el extracto del polvo de semilla de moringa tiene efectos coagulantes que lo hacen idóneo para su uso como coagulante principal en procesos de tratamiento de agua potable, teniendo en cuenta sus altas tasas de remoción y con tiempos de floculación y sedimentación cortos. Sin embargo, para su uso extendido en sistemas de áreas remotas o rurales, no es totalmente viable, toda vez que el precio de adquisición de la semilla es alto y el tiempo de acondicionamiento de las vainas para obtener semillas es largo.

La moringa como agente coagulante tiene la ventaja de además de remover la turbidez y el color, es un buen agente removedor de hierro y nitritos, contaminantes descritos como nocivos para la salud pública en la Resolución 2115 de 2007.

También se evidenció que la moringa tiene elevadas tasas de remoción cuando el pH del agua está en niveles cercanos a 7.0 y esta decrece drásticamente en aguas con pH mayor a 8, lo que significa que para que este coagulante funcione se debe estabilizar el pH del agua. Además, se observó que el coágulo generado es susceptible a romperse con facilidad, esto evidenciado en el paso del agua del floculador al sedimentador.

Recomendaciones

Se recomienda la búsqueda de métodos más accesibles para el tratamiento de la semilla, sobre todo en el proceso de desengrase, pues se requiere el uso de alcoholes o derivados del petróleo para este proceso, lo que hace que el proceso genere residuos no amigables con el ambiente y más aún cuando se propende su uso en zonas rurales, dispersas o apartadas.

Se recomienda evaluar la efectividad de este coagulante en otras fuentes de abastecimiento para establecer efectividades con pH menores de 7 y porcentajes de remoción de otros contaminantes descritos en la resolución 2115 de 2007 como fluoruros, aluminio, zinc, entre otros.

Se recomienda propender por la promoción, comercialización y producción intensiva de la semilla de moringa, toda vez que, aunque esta especie vegetal se encuentra en el país, solo se aprovecha su follaje en la industria de alimentos y de farmacología vegetal, lo que hace que el precio de la semilla sea alto dado que esta se desaprovecha y no entra en cadena de comercialización y/o producción.

También se recomienda que la solución coagulante se use dentro de los primeros siete días de producida, pues, aunque se almacene en frascos de ámbar y se refrigerada, la solución se fermenta y adquiere un olor nauseabundo, haciéndola inútil, lo que sugiere realizar investigaciones sobre el uso de bayas de especies como el Fresno de montaña *Sorbus aucuparia* que aporten ácido sórbico, compuesto ampliamente utilizado a escala industrial como conservante que tiene alta eficacia contra bacterias, mohos y levaduras (Barros, 2008, p.61).

Por último, se recomienda el estudio de productos coadyuvantes para potencializar la eficiencia y las propiedades coagulantes de la moringa, toda vez que para efectos de este proyecto el punto más importante era el uso de la moringa como agente coagulante a escala real en una planta de tratamiento de agua potable.

Bibliografía

- Abiyu, A., Yan, D., Girma, A., Song, X., & Wang, H. (2018). Wastewater treatment potential of *Moringa stenopetala* over *Moringa olifera* as a natural coagulant, antimicrobial agent and heavy metal removals. *Cogent Environmental Science*, 4(1).
<https://doi.org/10.1080/23311843.2018.1433507>
- Aguilar, N. & Másmela, A. P. (2017). *Evaluación de almidón de Manihot esculenta (Yuca) y Musa AAB Simmonds. (Plátano) en procesos de coagulación y floculación para el tratamiento de aguas residuales en la PTARD del parque agroindustrial de occidente – PAO.*
<https://repository.unad.edu.co/handle/10596/12023>.
- Alvarado Carmona, L. (2012). Uso de las Cáscaras de Papa como Coagulante Natural en el Tratamiento de Aguas Potables de la Planta” La Diana”. Publicaciones E Investigación, 6, 115. <https://doi.org/10.22490/25394088.1115>
- Arboleda, J. (2000). Conceptos básicos sobre la química del agua. En J. Arboleda, *Teoría y práctica de la purificación del agua* (3ra ed., p. 15). McGraw-Hill.
- Arboleda, J. (2000). Diseño de estaciones de cloración. En J. Arboleda, *Teoría y práctica de la purificación del agua* (3ra ed., p. 711). Mc-Graw Hill.
- Arboleda, J. (2000). Diseño de Mezcladores y Floculadores. En J. Arboleda, *Teoría y práctica de la purificación del agua* (3ra ed., p. 147). Mc-Graw Hill.

- Asrafuzzaman, M., Fakhruddin, A., & Hossain, M. (2011). Reduction of Turbidity of Water Using Locally Available Natural Coagulants. *ISRN Microbiology, 2011*, 1-6. <https://doi.org/10.5402/2011/632189>
- Banco de la República. (2021). *Tasa Representativa del Mercado (TRM - Peso por dólar)*. Banco de la República | Colombia. Recuperado el 19 enero de 2022, de <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/trm>.
- Barreto Pardo, J., Vargas Moncada, D., Ruiz Martínez, L., & Gomez Ayala, S. (2019). Evaluación de coagulantes naturales para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental, 11*(1), 105-116. <https://doi.org/10.22490/21456453.3081>
- Barros, C. (2008). *Los aditivos en la alimentación de los españoles y la legislación que regula su uso* [Ebook] (p. 61). Vision libros. Recuperado el 27 de febrero de 2022, de, <https://books.google.com.co/books?id=bhcAjKO4qV8C&pg=PA61&dq=obtencion+del+ácido+sorbico&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwiryYKRyaj2AhXEQzABHYEsBK0QuwV6BAgKEAk#v=onepage&q=obtencion%20del%20ácido%20sorbico&f=false>.
- Birima, A., Hammad, H., Desa, M., & Muda, Z. (2013). Extraction of natural coagulant from peanut seeds for treatment of turbid water. *IOP Conference Series: Earth And Environmental Science, 16*, 012065. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/16/1/012065>
- Bratby, J. (2021). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment* [Ebook] (3rd ed., pp. 34-41). IWA Publishing. Recuperado 14 junio 2021, de <https://books.google.com.co/books?id=G17KjgEACAAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>.

- Carrasco, W. (2016). Estado del arte del agua y el saneamiento rural en Colombia. *Revista De Ingeniería*, (44), 51. Recuperado el 10 de febrero de 2020 de <https://core.ac.uk/download/pdf/268121499.pdf>.
- Cuadros, L. (2020). *Evaluación de la Remoción de la Turbidez del Agua del Rio Fucha por Medio del Fruto de la Planta Arbustiva Cactus (Opuntia ficus indica) como Coagulante Natural*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Dearmas Duarte, D., & Ramírez Hernández, L. (2015). Remoción de nutrientes mediante coagulantes naturales y químicos en planta de tratamiento de aguas residuales, Valledupar Colombia. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 6(2), 183. <https://doi.org/10.22490/21456453.1415>
- Duran Hernández, Z. L., Roa, R., Coronel, D., & Alvarado, A. (2017). Análisis del proceso de coagulación de un agua residual usando un coagulante natural y un coagulante químico. *Documentos De Trabajo ECAPMA*, (2). <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.1821>
- Echeverría Molina, J., & Anaya Morales, S. (2018). El derecho humano al agua potable en Colombia: Decisiones del Estado y de los particulares. *Vniversitas*, 67(136), 1-14. <https://doi.org/10.11144/javeriana.vj136.dhap>
- Feria, J., Bermúdez, S., & Estrada, A. (2014). Eficiencia de la semilla Moringa Oleífera como coagulante natural para la remoción de la turbidez del río Sinú. *Producción + Limpia*, 9(1), 9-22. Recuperado el 03 octubre 2020, de <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v9n1/v9n1a01.pdf>.

- Franco, F. (2013). *Presiones, Impactos y Efectos Antrópicos sobre los Ríos* [Ebook] (pp. 4-6). Universidad Nacional de Colombia. Recuperado 20 junio 2021, de http://idea.manizales.unal.edu.co/publicaciones/boletines_ambientales/boletin115.pdf.
- Gottsche, E. (1992). Purification of turbid surface water by plants in Ethiopia. *Walia*, 1992(14), 23-28. https://doi.org/10.10520/AJA00837059_112
- Gupta, D., Sunita, & Saharan, J. (2009). Physicochemical Analysis of Ground Water of Selected Area of Kaithal City (Haryana) India. *Researcher*, (1), 2. Recuperado el 15 febrero de 2022, de http://www.sciencepub.net/researcher/0102/01_0563_dD_P_GUPTA.pdf.
- Howe, K., Hand, D., Crittenden, J., Trussell, R., & Tchobanoglous, G. (2012). Coagulation and Flocculation. In K. Howe, D. Hand, J. Crittenden, R. Trussell & G. Tchobanoglous, *Principles of Water Treatment* (pp. 139-187). John Wiley & Sons.
- Hussain, S., Ghouri, A., & Ahmad, A. (2019). Pine cone extract as natural coagulant for purification of turbid water. *Heliyon*, 5(3), e01420. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01420>
- Kalibbala, H., Wahlberg, O., & Hawumba, T. (2009). The impact of *Moringa oleifera* as a coagulant aid on the removal of trihalomethane (THM) precursors and iron from drinking water. *Water Supply*, 9(6), 707-714. <https://doi.org/10.2166/ws.2009.671>
- Kāranta, S. (1987). *Ground water assessment* (pp. 725-726). Tata McGraw-Hill.
- Krupińska, I. (2020). Aluminium Drinking Water Treatment Residuals and Their Toxic Impact on Human Health. *Molecules*, 25(3), 641. <https://doi.org/10.3390/molecules25030641>

- Martínez-Orjuela, M., Mendoza-Coronado, J., Medrano-Solís, B., Gómez-Torres, L., & Zafra-Mejía, C. (2020). Evaluación de la turbiedad como parámetro indicador del tratamiento en una planta potabilizadora municipal. *Revista UIS Ingenierías*, 19(1), 15-24. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n1-2020001>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: Título C. Sistemas de Potabilización* [Ebook] (pp. 80-81). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. recuperado 15 de febrero de 2022, de <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/titulo-c-dic-4-2013.pdf>.
- Ndabigengesere, A., Narasiah, K., & Talbot, B. (1995). Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using Moringa oleifera. *Water Research*, 29(2), 703-710. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00161-y](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00161-y)
- Popek, E. (2018). Practical Approach to Sampling. *Sampling And Analysis Of Environmental Chemical Pollutants*, 145-225. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803202-2.00004-5>
- Prabhakar, M., & Hebbar, S. (2008). Annual Drumstick (Moringa oleifera Lam). En K. Peter, *Underutilized and Underexploited Horticultural Crops* (p. 111). New India Publishing Agency. Recuperado el 04 febrero 2021, de <https://books.google.com.co/books?id=IPo-7-zmrZcC&pg=PA111&dq=moringa+oleifera&hl=es419&sa=X&ved=2ahUKEwigv9yipqDsAhWsxVkkHXDwAns4MhDoATABegQIBhAC#v=onepage&q=moringa%20oleifera&f=false>

- Ramírez, L. (2019). Evaluación de semillas de tamarindo (*Tamarindus indica*) como coagulante para disminuir la carga contaminante en el tratamiento de aguas en relación a un coagulante comercial (Trabajo de grado). Universidad Politécnica Salesiana.
- Romero Rojas, J. (1999). Floculación. En J. Romero Rojas, *Potabilización del agua* (3rd ed., p. 80). Alfaomega Grupo Editor.
- Sadgir, P. (2007). *Traditional water purification*. Conferencia, 5th IWHA Conference, Tampere, Finland.
- Sigler, A., & Bauder, J. (2012). *Hierro total*. Bozeman: Montana State University.
- Snoeyink, V., Schock, M., Sarin, P., Wang, L., Chen, A., & Harmon, S. (2003). Aluminium-containing scales in water distribution systems: Prevalence and composition. *Journal Of Water Supply: Research And Technology-Aqua*, 52(7), 455-474.
<https://doi.org/10.2166/aqua.2003.0042>
- State Water Resources Control Board. *Fact Sheet 3.1.5.9 - Color of Water Fact Sheet* (pp. 1-2). Sacramento: State Water Resources Control Board.
- Truque, P. *Armonización de los estándares de agua potable en las Américas* [Ebook] (p. 11). Recuperado el 15 February 2022, de <http://www.oas.org/dsd/publications/classifications/Armoniz.EstandaresAguaPotable.pdf>.
- Vozzo, J. (2002). *Tropical Tree Seed Manual* [Ebook] (pp. 580-581). United States Department of Agriculture. Recuperado 18 junio 2021, de <https://books.google.com.co/books?id=gwMUAAAAYAAJ&printsec=frontcover&dq=Tr>

[opical+tree+seed+manual&hl=en&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=Tropical%20tree%20seed%20manual&f=false.](#)

Zhang, Y., Shi, B., Zhao, Y., Yan, M., Lytle, D., & Wang, D. (2016). Deposition behavior of residual aluminum in drinking water distribution system: Effect of aluminum speciation. *Journal Of Environmental Sciences*, 42, 142-151.
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.05.010>