



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Modelamiento de la coagulación de aguas residuales, aplicando
Opuntia ficus-indica

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Ambiental

AUTORES:

Ortiz Llamosas, Camila Natalia (orcid.org/0000-0002-8991-7987)

Ydme Mamani, Maximo Efrain (orcid.org/0000-0002-9318-2995)

ASESOR:

Dr. Valdiviezo Gonzales, Lorgio Gilberto (orcid.org/0000-0002-8200-4640)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y Gestión de Recursos Naturales

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

**LIMA – PERÚ
2023**

DEDICATORIA

A mi madre Janet, hermano Javier y mi recordado padre Víctor que es mi ángel y guía desde el cielo. A mi nueva motivación de vida mi hija Luana por darme esa fuerza que me impulsó a culminar con mis estudios y hacer realidad esta meta trazada.

Camila

A mi querida esposa Grace que ha aportado en mi formación personal y académica día a día ha motivado a salir adelante siendo un gran motivo en mi vida y en la culminación de esta etapa académica.

Maximo

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Universidad César Vallejo y a mis docentes que nos han brindado sus conocimientos y apoyo para lograr culminar la carrera de ingeniería.

A nuestro asesor Dr. Lorgio Gilberto Valdiviezo Gonzales por su enseñanza y dedicación para el desarrollo de este trabajo de investigación, inculcándonos el más extenso conocimiento científico, lo que nos permite poder crecer como profesionales.

DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD DEL ASESOR



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, VALDIVIEZO GONZALES LORGIO GILBERTO, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA NORTE, asesor de Tesis titulada: "Modelamiento de la coagulación de aguas residuales, aplicando Opuntia ficus-indica", cuyos autores son ORTIZ LLAMOSAS CAMILA NATALIA, YDME MAMANI MAXIMO EFRAIN, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 10.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

LIMA, 21 de Diciembre del 2023

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
VALDIVIEZO GONZALES LORGIO GILBERTO DNI: 40323063 ORCID: 0000-0002-8200-4640	Firmado electrónicamente por: LVALDIVIEZOG el 23-12-2023 11:51:03

Código documento Trilce: TRI - 0704980





UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Declaratoria de Originalidad de los Autores

Nosotros, ORTIZ LLAMOSAS CAMILA NATALIA, YDME MAMANI MAXIMO EFRAIN estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA NORTE, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: "Modelamiento de la coagulación de aguas residuales, aplicando Opuntia ficus-indica", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Nombres y Apellidos	Firma
CAMILA NATALIA ORTIZ LLAMOSAS DNI: 77345792 ORCID: 0000-0002-8991-7987	Firmado electrónicamente por: CORTIZLL el 21-12-2023 22:06:50
MAXIMO EFRAIN YDME MAMANI DNI: 44944533 ORCID: 0000-0002-9318-2995	Firmado electrónicamente por: MEYDMEY el 21-12-2023 22:49:10

Código documento Trilce: TRI - 0704981

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD DEL ASESOR	iv
DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD DE LOS AUTORES	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	3
III. METODOLOGÍA	9
3.1. Tipo y Diseño de Investigación	9
3.1.1. Tipo de Investigación	9
3.1.2. Diseño y nivel de la Investigación	9
3.2. Variables y Operacionalización	9
3.2.1. Variables	9
3.2.2. Operacionalización	10
3.3. Población, Muestra, Muestreo, y Unidad Muestral	10
3.3.1. Población	10
3.3.2. Muestra	10
3.3.3. Muestreo	10
3.3.4. Unidad muestral	10
3.4.- Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	11
3.4.1 Técnica de la investigación	11

3.4.2 Instrumentos de recolección de datos	11
3.4.3 Validez	11
3.4.4 Confiabilidad	11
3.5.- Procedimiento	12
3.6. Método de Análisis de Datos	16
IV. RESULTADOS	17
V. DISCUSIÓN	23
VI. CONCLUSIONES	26
VII. RECOMENDACIONES	27
REFERENCIAS	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Registros de toma de datos del proceso	11
Tabla 2: Georreferenciación del punto del efluente del agua residual de la PTAR	12
Tabla 3: Materiales y equipos utilizados	14
Tabla 4: Parámetros a realizar en el agua residual doméstica	16
Tabla 5: Factores y niveles para el Diseño Box-Behnken	16
Tabla 6: Diseño Box-Behnken.	17
Tabla 7: Resultados iniciales de la muestra de agua residual	18
Tabla 8: Resultados de la prueba de jarras	18
Tabla 9: Eficiencia de remoción para cada parámetro	19
Tabla 10: Solución sugerida por el Diseño Box-Behnken	21
Tabla 11: Predicciones de resultados	21
Tabla 12: Ecuaciones de predicción	22

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de bloques PTAR	8
Figura 2: Diagrama de flujo del modelamiento de coagulación de aguas residuales aplicando <i>Opuntia ficus-indica</i>	12
Figura 3: Recolección de muestra	12
Figura 4: Preparación del coagulante	13
Figura 5: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados	20

RESUMEN

Actualmente la reutilización del agua residual podría contribuir positivamente al cambio climático. Estas aguas en su mayoría se tratan con coagulantes químicos provocando contaminación al suelo. Por ello, el presente trabajo de investigación propone una alternativa natural teniendo como objetivo general modelar la coagulación de aguas residuales, aplicando *Opuntia ficus-indica*. Para la metodología se realizó 30 experimentos aplicando el diseño Box-Behnken en el test de jarras con dosis de 1, 2 y 3 g/l del coagulante a 100 rpm durante el tiempo de 20 a 30 min a diferentes pH (7,8 y 9), luego se evaluaron los parámetros turbidez, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos, DBO_5 , DQO. La máxima remoción alcanzada fue de 98.7%, 63%, 77.5%, 79.4%, 52.6% y 39.9% respectivamente. Asimismo, se identificó que la mayor eliminación de estos parámetros fue a pH neutro y ligeramente alcalino (7-8), una dosis en el rango de 2-3 g/l de *Opuntia ficus-indica* y un tiempo de agitación de 20 a 30 min. La *Opuntia ficus-indica* se presenta como una buena alternativa para la coagulación de aguas residuales.

Palabras clave: Agua residual, *Opuntia ficus-indica*, Box Behnken, coagulación.

ABSTRACT

Currently, the reuse of wastewater could contribute positively to climate change. Most of these waters are treated with chemical coagulants causing soil contamination. Therefore, the present research work proposes a natural alternative having as general objective to model the coagulation of wastewater, applying *Opuntia ficus-indica*. For the methodology, 30 experiments were carried out applying the Box-Behnken design in the jar test with doses of 1, 2 and 3 g/l of the coagulant at 100 rpm for 20 to 30 min at different pH (7, 8 and 9), then the parameters turbidity, total solids, total suspended solids, dissolved solids, BOD₅, COD were evaluated. The maximum removal achieved was 98.7%, 63%, 77.5%, 79.4%, 52.6% and 39.9%, respectively. Likewise, it was identified that the highest removal of these parameters occurred at neutral and slightly alkaline pH (7-8), a dose in the range of 2-3 g/l of *Opuntia ficus-indica* and an agitation time of 20 to 30 min. *Opuntia ficus-indica* is presented as a good alternative for wastewater coagulation.

Keywords: Wastewater, *Opuntia ficus-indica*, Box Behnken, coagulation.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la población ha crecido considerablemente, originando la polución de aguas y el vertimiento de estas a cuerpos de agua sin ser previamente tratadas, esto debido a la falta de gestión de las autoridades, lo que conlleva a malos olores, las que se convierten en impropias y peligrosas para el consumo agrícola y humano. Se considera que el 80 % de los efluentes se vierten al agua sin una previa depuración adecuada (World Water Assessment Programme, 2012)

La reutilización adecuada del agua residual sería una solución en cuanto a las cuestiones vinculadas al cambio climático, debido a que, el saneamiento contribuiría con los gases de efecto invernadero, entre ellos la descomposición de materia orgánica y los residuos fecales vertidos al medio ambiente (Paucar y Iturregui, 2020)

Se estima que al 2030 las aguas residuales domésticas incrementarían en 24% con respecto a la producción actual y para el 2050 aumentaría un 51% con respecto a los datos actuales (Qadir et al., 2020).

Dentro del Perú, el tratamiento de aguas provenientes de los domicilios no tiene una gestión adecuada, debido a que, no se cuenta con infraestructura adecuada, falta de conciencia ambiental y regulaciones insuficientes. Existen actualmente 202 plantas de tratamiento de aguas residuales en el Perú de las cuales 171 se encuentran operativas (SUNASS, 2015).

La presente investigación utilizó la *Opuntia ficus-indica* con el fin de depurar aguas, para la obtención de aguas tratadas y así observar la coagulación vegetal frente a un coagulante químico, ya que en diversos casos se utiliza el cloruro férrico y el sulfato de aluminio para esclarecer el agua y estos residuos contaminan al medio ambiente (Bouaouinea et al. 2021).

Por ello, el proyecto presentó como problema general ¿Cuáles son los modelos que permiten predecir la coagulación de aguas residuales, aplicando *Opuntia ficus-indica*? Por medio del problema general se formularon los problemas específicos detallados a continuación ¿Cuál es el efecto de la dosis, pH y tiempo de agitación en la remoción de DBO_5 , DQO, Turbidez, OD, SD, ST, SST? ¿Cuales son los valores óptimos de dosis de *Opuntia ficus-indica*, pH y tiempo de agitación para la coagulación de aguas residuales, aplicando *Opuntia ficus-indica*? ¿Cuáles serán

las ecuaciones de predicción para la remoción de contaminantes en la coagulación de aguas residuales?

La presente investigación se justifica teóricamente, debido a que la coagulación de aguas se plantean en base a información de trabajos científicos que sirven como guía para este desarrollo. La justificación ambiental se dio porque al tratar las aguas residuales no se altera el equilibrio del suelo agrícola, haciendo que este sea sostenible a través del tiempo. Además, tiene un aporte social, ya que al ser tratada las aguas residuales domésticas no generarán problemas de salud.

Considerando lo anteriormente descrito, se tuvo como objetivo general: Modelar la coagulación de aguas residuales, aplicando *Opuntia ficus-indica* y como objetivos específicos: Determinar el efecto de la dosis, pH y tiempo de agitación en la remoción de DBO_5 , DQO, Turbidez, OD, SD, ST, SST; Identificar los valores óptimos de dosis, pH y tiempo de agitación en el tratamiento de coagulación; y Determinar las ecuaciones de predicción para la remoción de contaminantes.

Además, se formuló la siguiente hipótesis general: Los modelos matemáticos obtenidos permiten predecir la coagulación de aguas residuales, aplicando *Opuntia ficus-indica* y como hipótesis específicas: La dosis, pH y tiempo de agitación tendrá un efecto significativo en la remoción de DBO_5 , DQO, turbidez, OD, SD, ST, SST. La dosis óptima de *Opuntia ficus-indica* será mayor a 2 g/L, el pH óptimo será de 7 y el tiempo de agitación será de 30 min para la coagulación de aguas residuales. Las ecuaciones de predicción serán capaces de optimizar los resultados en la remoción de todos los contaminantes estudiados.

II. MARCO TEÓRICO

En relación de lo mencionado anteriormente, los trabajos previos internacionales y nacionales proporcionaron información de la *Opuntia Ficus-indica* con el fin de aumentar el oxígeno disuelto y reducir DBO_5 , DQO, Turbidez, SD,ST, SST presentes en aguas residuales de una PTAR.

Mora-Aparicio et al. (2022) realizaron una investigación determinando parámetros fisicoquímicos en el agua residual doméstica en una PTAR donde se obtuvieron reducciones DQO de 49.8% y en Sólidos Suspendidos Totales un 68.5% utilizando el método convencional y se estima que reducirían el DQO a 52.2 % aplicando un tratamiento secundario.

Jaramillo et al., (2013) en su investigación aplican el diseño Box-Benhken para optimizar la adsorción de colorante azul ácido con los tallos de flores, codificaron sus tres variables como dosis, concentración del colorante y tiempo de contacto. Este modelo estadístico permitió reducir el número de pruebas llegando a un resultado mayor al 98% aplicando 7,8 g, colorante concentrado de 11,7 mg/L y tiempo de contacto de 104 min. Llegando a la conclusión de sugerir el uso de tallos de flores como una alternativa natural con gran potencial para la remoción de colorantes ácidos. Utilizando este diseño para optimizar el número de pruebas que darían un mayor resultado.

Jaco et al. (2022) en su investigación realizada con la *Opuntia Ficus-indica* se realizaron diferentes pruebas jarras con tiempo de sedimentación de 30 min y dosis optima de 1,625 g/l a pH 8.1 buscando la eficiencia como coagulante para tratar aguas residuales, esta investigación fue realizada en un sistema piloto con pruebas de jarras donde se utilizó la *Opuntia Ficus-indica* triturada en polvo, habiéndose obtenido resultados de solidos suspendidos totales de un 96.67 %, turbidez 88.19 % y un DBO_5 de 72.81%. Lo que demuestra que la materia orgánica en este tratamiento también tuvo una considerable reducción ya que el DBO_5 tiene una relación directa con la materia orgánica.

Eichhorn et al. (2022) mostraron la combinación de los cladodios de *Opuntia ficus-indica* y semillas de *Moringa Oleífera* llevando a horno 80°C por un periodo de 12 horas para optimizar y usando una granulometría de 125 μ m las propiedades del tratamiento del agua realizaron una dilución de 0,5 mol/L de NaCl. La combinación

de estos dos coagulantes logró remover la turbidez en un 76% y solo *Opuntia ficus-indica* tuvieron resultados de 18% siendo un valor despreciable que no se tuvo en cuenta, concluyeron que esta combinación puede ofrecer grandes ventajas.

Otálora et al., (2022) investigaron la cáscara de la fruta de *Opuntia Ficus-indica* se recolecto y se llevó a estufa a 50°C por 3 horas, con una granulometría de 250 μm , como potencial coagulante en la aplicación de aguas. Este estudio realizó la caracterización estructural del mucílago a nivel laboratorio y se verificó la existencia de grupos funcionales hidroxilo y carboxilo en el mucilago lo que proporciona propiedades coagulantes a través de mecanismos de unión y adsorción.

Vargas y Benites et al., (2022) investigaron el aprovechamiento de coagulantes como alternativa para reducir turbidez de estaciones depuradoras de aguas residuales donde evaluaron la *Opuntia ficus-indica* y a la *Caesalpinia spinosa* en comparación al sulfato de aluminio para reducir la turbidez de muestras de agua de un efluente, mediante el método de jarras para el proceso de coagulación mostraron resultados del 59,42% de disminución de turbidez aplicando *Opuntia Ficus-indica* y 55,78% usando la *Caesalpinia spinosa*. Concluyeron que estos coagulantes ofrecen porcentajes considerables en los resultados de mejora a la turbidez y al reemplazar el uso de sulfato de aluminio por este método reduciría los impactos negativos al medio ambiente.

Bouaouinea y Bourvenb et al. (2021) determinaron la eficiencia del tratamiento de efluentes textiles con un nuevo reactivo derivado de *Opuntia Ficus-indica* que se encuentra mayoritariamente en la zona de estudio (Marruecos), donde detallan que la remoción de turbidez surgió de manera significativa eliminándose el 96% así como la producción de lodos en contraste con otros coagulantes químicos como el cloruro férrico y sulfato de aluminio.

Rivera y Hernández et al. (2021) en su investigación caracterizaron la OFI como un potencial coagulante, evaluaron las características físico-químicas relacionadas a sus capacidades de adsorción, luego fue extraído y pulverizado mediante técnicas de calentamiento para su evaluación química mediante grupos funcionales mediante espectrometría. Los resultados permitieron identificar el uso potente del nopal como coagulante por estar constituido de polisacáridos, proteínas y otros compuestos que permiten la adsorción de minerales y metales pesados para la descontaminación del agua.

Vidal y Moscote et al. (2020) estudiaron la *Opuntia Ficus-indica* como coagulante durante el tratamiento, este análisis se realizó en un método muy utilizado siendo la prueba de jarras que opera varias revoluciones por minuto donde se observaron eliminación de turbidez del 97% al 99,5%. Concluyendo que la variación de la mezcla lenta solo influyó con la segunda muestra, siendo el tratamiento más efectivo a 30 revoluciones por minuto.

Choque-Quispe y Ligarda-Samanez et al. (2020) estudiaron la capacidad coagulante de *Echinopsis pachanoi* (San Pedro), *Neoraimondia arequipenses* (Ulluquite) y *Opuntia Ficus-indica* (Tuna) en las aguas residuales. Aplicaron dosis de coagulante de las tres especies. Teniendo como conclusión el resultado más favorable en remoción de turbidez al 98,98% perteneciente a la planta.

Choudhary et al, (2019) en su investigación utilizó por primera vez el mucílago de *Opuntia Ficus-indica* como biocoagulante para el pretratamiento de aguas afectadas. Concluyeron que para la turbidez se obtuvo un 98 % de remoción, ya que este compuesto coagulante presenta cadenas de polisacáridos que actúan como cationes divalentes y produce la formación de grandes coágulos filiformes que revela la posibilidad que el tratamiento se dé por adsorción facilitada por la formación de puentes entre partículas; También desarrollaron un estudio comparativo de este biocoagulante frente al alumbre dando resultados que después del tratamiento con *Opuntia Ficus-indica* donde se encontró un lodo compacto y de menor volumen en comparación con el alumbre.

Das y Ojha et al., (2021) estudiaron el uso de biocoagulantes ecológicos proporcionando una comprensión más clara del estado actual, los desafíos y las soluciones para la biofloculación en la remediación de aguas residuales utilizando materiales verdes como la *Opuntia Ficus-indica* en materia de un medio ambiente más limpio. Concluyeron que estos floculantes de origen vegetal pueden usarse para reemplazar los métodos químicos que han demostrado tener efectos degenerativos para el medio ambiente y salud humana.

Bouchareb y Delbal et al, (2021) establecieron un método para la extracción del agente coagulante en polvo de semillas de *Moringa Oleifera* para tratar estas aguas. Concluyendo que su máxima remoción de turbidez fue de 97% y para el DBO₅ se eliminó más del 98%.

Hadadi et al., (2022) compararon el rendimiento de cuadro biocoagulantes de origen vegetal frente el alumbre y el cloruro férrico para la mejora de la turbidez en el agua sintética con bentonita eliminando casi el 100% de la turbidez. Este trabajo no solo destaca que la *Moringa Oleifera* y la *Opuntia Ficus-indica* son efectivos para eliminar la turbidez, sino también muestran el gran potencial de las semillas de *Aloe Vera* y *Pinus Halepensis* como biocoagulantes prometedores para el tratamiento de aguas.

También es necesario conceptualizar las palabras fundamentales en esta investigación:

Aguas residuales: Son aquellas con propiedades se ven alteradas por el uso doméstico, agrícola, industrial, etc. Como también las aguas que se unen a estas como aguas pluviales que recorren diversas áreas del territorio que están presentes en las PTAR, almacenamiento y disposición (Jaume 2011)

La coagulación: Implica la creación de partículas al introducir un coagulante al agua, esta aplicación se mezcla energéticamente para desestabilizar las partículas del contaminante por neutralización de cargas, actualmente los coagulantes con mayor utilización son los compuestos inorgánicos de aluminio o hierro como el sulfato ferroso, sulfato de aluminio, aluminato de sodio, cloruro férrico y sulfato férrico, siendo afectados estos coagulantes naturales por las condiciones del agua y la naturaleza de las partículas en suspensión (Cabrera Martínez 2018). No obstante, hay varias desventajas relacionadas con la utilización de estos coagulantes, como la elevada inversión requerida y la generación de considerables cantidades de lodos y la alteración que causa en el pH del agua tratada. Los principales parámetros que afectan la coagulación vienen siendo el pH, la carga superficial de las partículas, concentración del coagulante y el tipo de coagulante (Tarón-Dunoyer, Guzmán-Carrillo y Barros-Portnoy 2017). La coagulación se refiere al proceso de desestabilización de la materia coloidal en suspensión. Estas partículas en suspensión mantienen de forma natural un equilibrio de cargas positivas y negativas que las mantienen separadas de forma estable. Al romper este equilibrio, estos coloides pueden coagularse (Derypol, 2021)

Las Cactáceas: Son reconocidas con el nombre de Cactus, existen mas de 200 géneros y 2500 especies, en su mayoría poseen espinas y crecen en climas secos y cálidos (Vargas et al. 2018)

Opuntia ficus-indica: También llamada Tuna o Nopal, es una especie que pertenece a la familia de las Cactáceas, es muy utilizada como medicina para controlar la diabetes, las partes de la planta comestibles son su tallo, flores y su fruto, además funciona como coagulante natural en la purificación de agua, ya que poseen una alta cantidad de antraquinonas y carbohidratos que se concentran en la parte de los tallos. (Villanueva et al. 2019)

Otra definición es: Especie que pertenece la familia Cactaceae, siendo una especie muy abundante en el continente americano, principalmente habitan en regiones áridas. Los cladodios de cactus están constituidos principalmente por un heteropolisacarido, el mucílago es una mezcla de polisacáridos ácidos y neutros (Ordoñez et al. 2019). Además, se adapta fácilmente a las condiciones de vida de regiones áridas y semi áridas, tiene buena tolerancia a sequías, presenta frutos comestibles y también comercializables (Terán et al. 2015). También estudios anteriores indican que los nopales (hojas) jóvenes presentan mayor cantidad de proteínas y carbohidratos que los nopales mayores a 1 año de edad (Guzmán y Chávez, 2007).

Sólidos disueltos totales (SDT): Estos incluyen sales inorgánicas, entre las que podemos encontrar: sodio, potasio, magnesio, cloruros, fosfatos, junto con la existencia de compuestos orgánicos en los cuerpos de agua de zonas urbanas o industriales (Chulluncuy-Camacho 2011). Representa de todos los elementos que están presentes en el agua diferente a los sólidos en suspensión (Chibinda, Arada-Pérez y Pérez-Pompa, 2017)

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5): Cantidad de oxígeno que es necesaria para que microorganismos aeróbicos estabilicen la materia orgánica biodegradable presente en una muestra de agua (Metcalf and Eddy 2013)

Demanda Química de Oxígeno (DQO): Cantidad de oxígeno requerida para llevar a cabo la oxidación química de la materia orgánica y algunas sustancias inorgánicas presentes en una muestra de agua (Metcalf and Eddy, 2013).

Turbidez: Medida de la claridad óptica de una muestra de agua y se asocia con la presencia de partículas suspendidas o materia en suspensión en el agua (Encyclopedia of Hydrological Sciences, 2005)

Oxígeno disuelto (OD): cantidad de oxígeno en forma molecular presente y solubilizado en una muestra de agua, desempeñando un papel crucial en la vida acuática y la respiración de los organismos en ambientes acuáticos (Frey et al. 1984)

Potencial de hidrogeno (pH): manera de cuantificar si una solución es ácida o alcalina, y se basa en la cantidad de iones de hidrógeno presentes en la solución (Caldera et al. 2019)

Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR): Es un sistema donde el agua es tratada a través de diversos procesos, con el fin de alcanzar niveles aceptables según las normativas de calidad, estándares ambientales y que éstas puedan ser reutilizadas (Paucar y Iturregui 2020)

Prueba de jarras: Es una técnica que se utilizó en la investigación, el cual simula el proceso de coagulación – floculación en la planta de tratamiento de agua potable, sin embargo, esta prueba se realiza en laboratorio, tiene la finalidad de determinar cuál es la dosis óptima del coagulante a utilizar para una determinada muestra de agua (Castellanos, 2017).



Figura 1: Diagrama de bloques PTAR

En la Figura 1 se presentan todas las etapas por la que pasa el agua residual en una planta de tratamiento.

Diseño Box-Behnken: Puede ser aplicado para optimizar el rendimiento de los procesos de reducción, el mismo que permite ensayar varios factores simultáneamente, combinados o aislados, proporcionando un diagrama de influencia sobre el rendimiento final empleando la metodología de superficie de respuesta (Delzo Salomé et al. 2021). Es utilizado para determinar la matriz experimental en concordancia con factores considerados los cuales son codificados y presentan tres niveles (Vicuña et al. 2022)

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y Diseño de Investigación

3.1.1. Tipo de Investigación

Este estudio presentó un tipo de investigación aplicada utilizando la *Opuntia ficus-indica*.

Esta investigación de este tipo fue destinada a la solución de problemas, dentro de la ciencia (Niño Rojas 2019).

3.1.2 Diseño y nivel de la Investigación

El diseño utilizado en este trabajo fue experimental, de nivel explicativo y con tiempo transversal, el cual tendrá un enfoque cuantitativo. Es un diseño experimental con más de una variable, que interactúan entre sí para determinar el efecto que tiene una sobre otra. (Llopis, 2017)

La investigación cuantitativa o positiva busca las causas de los problemas mediante la objetividad y la obtención de datos que privilegian la información estadística, la verificación y la generalización de resultados (Galeano, 2004).

3.2. Variables y Operacionalización

3.2.1. Variables

Las variables son los que intervienen en la investigación, de acuerdo al funcionamiento que estas tendrán en el tratamiento del agua residual doméstica.

Variable Independiente: *Opuntia ficus-indica*

Variable dependiente: Modelamiento de la coagulación de aguas residuales

3.2.2. Operacionalización

La operacionalización es donde mencionamos las definiciones conceptuales que están de acuerdo en cómo se realiza la investigación y tiene un autor, la definición operacional, es el conocimiento plasmado del investigador acerca del estudio realizado, las dimensiones son los objetivos y cada uno con sus indicadores como la forma de realizar sus mediciones. **(Ver Anexo N°1)**

3.3. Población, Muestra, Muestreo, y Unidad muestral

3.3.1. Población

Es el conjunto con un determinado fin de elementos, pero a la vez es grande cuyas características corresponden a datos similares (Soliz, 2019).

La población de esta investigación son las aguas residuales de una PTAR en el distrito de Santa Rosa.

3.3.2. Muestra

Es la porción que fue escogida de una población, en que todos los elementos tienen componentes similares, no se distinguen de los demás (Soliz 2019).

La muestra se tomó en el efluente de las aguas residuales antes del ingreso al desarenador perteneciente al pretratamiento de la PTAR, se tomaron 16 litros del agua residual para su tratamiento respectivo conformada por 30 tratamientos de 500 ml y 1 litro para la muestra de los valores iniciales.

3.3.3. Muestreo

El muestreo fue no probabilístico por conveniencia, debido a la disponibilidad de acceso a la PTAR realizado después de haber tomado la muestra, esta se homogenizó en el lugar donde se realizó el experimento con un tiempo no mayor a 24 horas, el volumen será de 30 litros.

3.3.4. Unidad muestral

Cuando se realizó el tratamiento del agua residual doméstica, el volumen muestral fue de 0.5 L que sirvió para los análisis del control del proceso y asegurar que cumpla los objetivos planteados.

3.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.4.1 Técnica de la investigación

Los estudios experimentales utilizaron como técnica la observación, con ello se tomó las decisiones de verificar de acuerdo con la normativa cómo fue el tratamiento con respecto a los parámetros que se desarrollaron.

3.4.2 Instrumentos de recolección de datos

Los datos que fueron tomados en el proceso están recolectados en registros siendo estos:

Tabla 1. Registros de toma de datos del proceso.

Registros	Descripción
Registro 1	Recolección de las aguas tratadas en una PTAR
Registro 2	Dosis óptima de la <i>Opuntia ficus-indica</i> para la coagulación del agua residual doméstica
Registro 3	El pH óptimo para la remoción de sólidos suspendidos totales y materia orgánica utilizando <i>Opuntia ficus-indica</i>
Registro 4	Tiempo de agitación adecuado para el proceso de coagulación con <i>Opuntia ficus-indica</i>

3.4.3 Validez

La validez fue revisada por especialistas en ingeniería ambiental, con grado de magíster o Doctorado en la especialidad de la carrera ambiental, con colegiatura no menor a 5 años.

3.4.4 Confiabilidad

La confiabilidad estuvo sujeta al porcentaje de la calificación de los especialistas, y de saber que una repetición estará siempre con un margen cercano a la ya realizada.

3.4. Procedimiento

El procedimiento empleado para el modelamiento de coagulación de aguas residuales aplicando *Opuntia ficus-indica* se detalla en la siguiente figura:

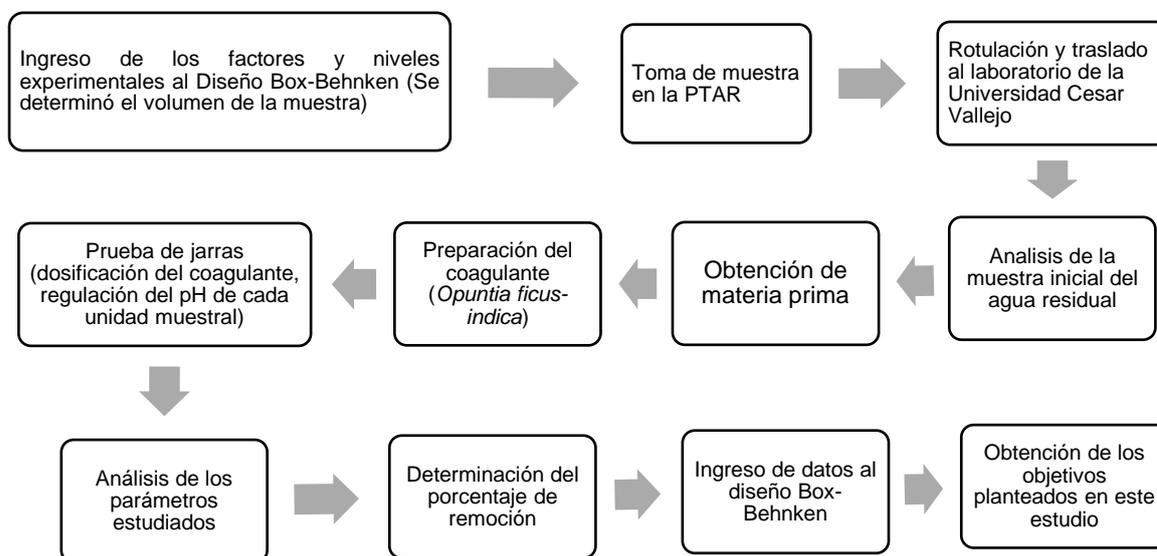


Figura 2: Diagrama de flujo del modelamiento de coagulación de aguas residuales aplicando *Opuntia ficus-indica*

Registro 1: Recolección de las aguas residuales de una PTAR

Ubicación de la zona de estudio: La zona de estudio está ubicada en la provincia de Lima, en el distrito de Santa Rosa donde se encuentra la PTAR.

Tabla 2. Georreferenciación del punto del efluente del agua residual del PTAR.

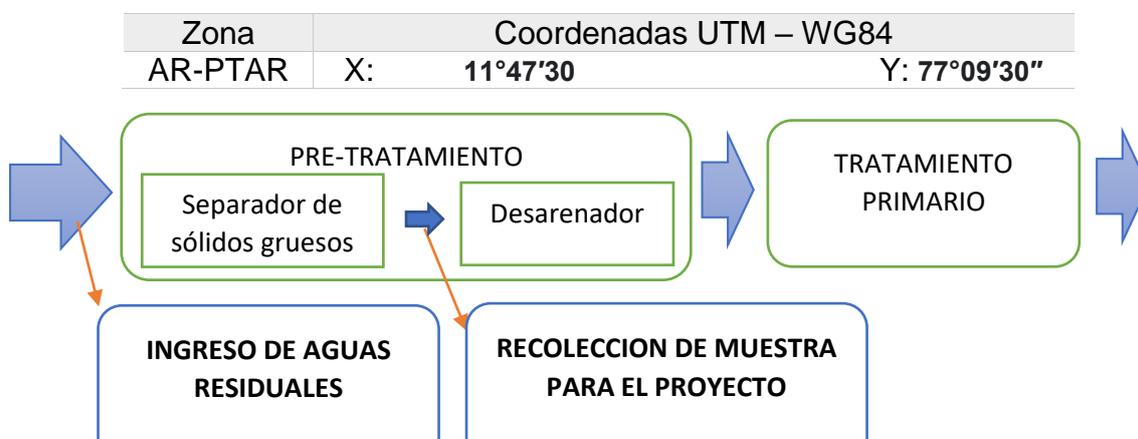


Figura 3: Recolección de muestra (Elaboración propia).

En la figura 3 se señala el punto de muestreo del agua residual que fue tratada para reducir los parámetros estudiados, la muestra fue tomada antes del ingreso al desarenador ya que este fue diseñado para mejorar la remoción y separación de tierra y arena lo que ayuda a sedimentar estos materiales presentes en el agua residual (Greely and Hansen, 2017). Uno de los parámetros estudiados son los sólidos suspendidos que están presentes en el agua residual que al pasar por el desarenador se decanta gran cantidad de este material, es por ello que se tomó la muestra antes de pasar por este proceso.

Método utilizado para toma de muestra del agua residual doméstica

El protocolo de monitoreo de la calidad del agua proveniente de los efluentes de la PTAR fue el indicado para obtener la muestra. La que consistió en tomar una muestra representativa. Se midieron parámetros de campo como el pH, temperatura, las que fueron anotadas en la libreta de registro y trasladadas en condiciones de refrigeración en un cooler.

Lugar de recolección de la muestra de *Opuntia ficus-indica*

La *Opuntia ficus-indica* fue recolectada en la provincia de Ancash, provincia de Carhuaz, donde se tomó las muestras de manera aleatoria simple, ya que éstas fueron representativas para obtener nuestra materia prima.

Preparación del coagulante

Se utilizaron los cladodios de *Opuntia ficus-indica* pelados y cortados, se colocaron en el horno a 80 °C por un periodo de 12 horas, posterior a eso se procedió a triturar y tamizar en una malla de 125 μ m (Eichhorn y Weckmüller et al., 2022).

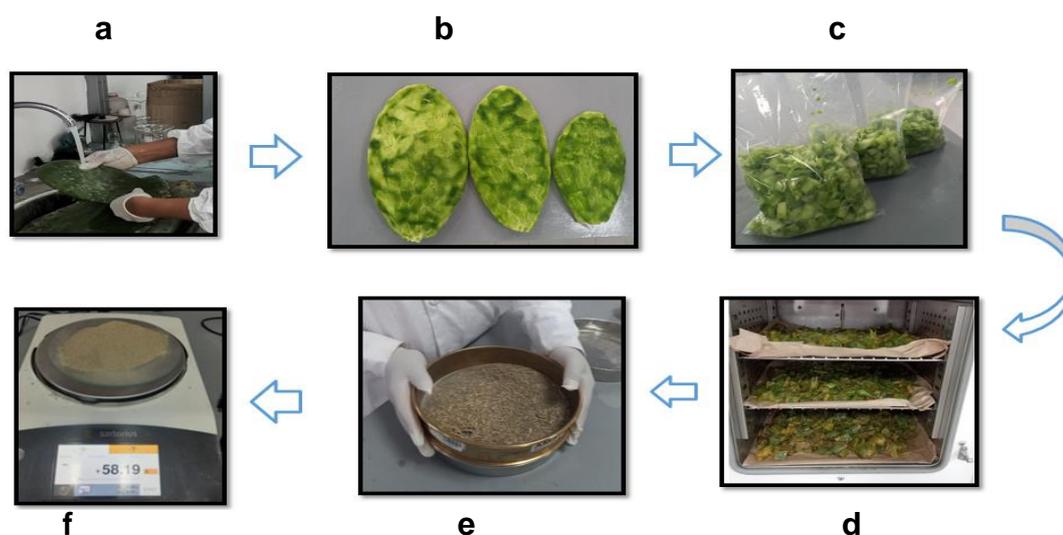


Figura 4: Preparación del coagulante a) Lavado, b) Pelado, c) Cortado, d)Secado, e)Tamizado, f) Pesado.

Materiales y equipos utilizados

Tabla 3. Materiales y equipos utilizados.

Materiales	Equipos
02 bidones de 20 litros	01 GPS
02 jarras de 2.5 lts.	01 cronometro
05 metros de soguilla	01 cinta métrica
02 Cooler de 50 lts.	03 frascos borosilicatados
20 bolsas de polietileno	02 equipos de protección personal
Cuaderno, indelebles.	Dicromato de potasio
02 litros de Hidróxido de sodio (NaOH)	02 litros de ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)
Sulfato de manganeso	Tiosulfato sódico
01 Tamiz	02 Mortero
2 c/u Vasos precipitados de 250ml	01 Varilla
01 Pipeta	01 Propipeta
02 Probeta de 100ml	01 Matraz de 250ml
01 Gotero	03 Crisol
01 Soporte universal	01 Desecador
01 Desecador	01 Floculador- test de jarras
01 Centrifuga	01 Balanza
Dicromato de potasio 100 g	Ácido sulfúrico 2 litros
Sulfato de mercurio 100 g	Sulfato de plata 100 g
Biptalato de potasio 100 g	Agua destilada 15 litros
Fosfato monopotásico 100 g	Fosfato dipotásico 100 g
Fosfato disódico dihidratado 100	Cloruro de amonio 100 g
Sulfato de magnesio 100 g	Cloruro de calcio 100 g
Cloruro férrico 100 g	hidróxido de sodio 50 g
papel filtro Nro. 40 y 80	papel filtro de fibra de vidrio 1 caja

Registro 2: Granulometría óptima de la *Opuntia ficus-indica* para la coagulación de aguas residuales.

Pruebas de Jarras para determinar el efecto del pH óptimo mediante la Turbidez y poder determinar la eficiencia del *Opuntia ficus -indica*.

El pH es importante en un sistema de coagulación – floculación debido a que estas en muchos casos al momento del tratamiento toman coloración, especialmente cuando se trabaja con materia orgánica (Lorenzo-Acosta, 2006).

Por tal razón, se realizó una prueba de turbidez con la muestra tomando 6 vasos precipitados de 500 ml, en las cuales se obtuvo en cuenta los pH de 7, 8 y 9 las que fueron agitadas por un tiempo de 20, 25 y 30 minutos, para luego dejarlo en reposo por 30 minutos y medir en un espectrofotómetro de turbidez, con las dosis de 1, 2 y 3 g/l

Registro 3: El pH óptimo para la coagulación de aguas residuales, aplicando *Opuntia ficus –indica*

Dosis de *Opuntia ficus-indica*

Para determinar la dosis (1, 2 y 3 g/L) de *Opuntia ficus -indica*, se procederá a realizar lo siguiente:

Método prueba de jarras

La propiedad de coagulación y floculación de la *Opuntia ficus-indica*, se dió de acuerdo con las distintas concentraciones de *Opuntia* (1, 2, 3 g/L) que se obtuvo en el tamizado, para cada uno de los casos se evaluaron en una prueba de jarras, considerando el pH y la temperatura del agua residual y se controló mediante espectrofotometría para ubicar la más óptima. Asimismo, los tiempos fueron controlados por un periodo de agitación de 20 minutos, 25 minutos, 30 minutos.

Remoción de Sólidos Suspendidos Totales y materia orgánica

Se concluyó el proceso de coagulación y floculación del *Opuntia ficus -indica*, el cual se puso en reposo por 30 minutos y se evaluaron la materia orgánica y los sólidos suspendidos totales.

Registro 4: Tiempo de agitación adecuado para el tratamiento con *Opuntia ficus – indica*.

Los parámetros fueron evaluados de acuerdo al actual decreto supremo del ministerio del ambiente, con respecto a los Límites Máximos Permisibles en PTAR Domésticas.

Tabla 4: Parámetros a realizar en el agua residual doméstica.

Parámetros	Método utilizado
Potencial de hidrogeno	Método potenciométrico (acido/base)
Turbidez	Método Espectrofometrico (NTU)
Sólidos totales	Método gravimétrico) (mg/l)
Sólidos disueltos	Método gravimétrico) (mg/l)
Sólidos suspendidos totales	Método filtración al vacío (mg/l)
Oxígeno disuelto	Método Winkler (mgO ₂ /l)
Demanda química de oxigeno	Método dicromato de Potasio 1N (mgO ₂ /l)
Demanda bioquímica de oxigeno	Método Winkler (mgO ₂ /l)

3.6. Método de Análisis de Datos

El análisis de datos fue regido por la herramienta estadística de Diseño de optimización Box-Behnken, para esto se descargó el software Minitab 2023. Este método tiene la finalidad de reducir el número de experimentos y llegar a la mayor reducción de contaminantes con pocos intentos, de acuerdo a los 3 factores estudiados (pH, dosis y tiempo de agitación). Los cuales se codifican en (-1) bajo, (0) intermedio y (+1) alto.

Tabla 5. Factores y niveles para el Diseño Box-Behnken.

Factor/Nivel	-1	0	+1
pH	7	8	9
Dosis (g/L)	1	2	3
Tiempo de agitación (min)	20	25	30

Se codificó de acuerdo al ingreso de datos en el Diseño Box-Behnken teniendo en cuenta una repetición. El total de experimentos fue de 30 y se realizaron de acuerdo con la matriz de la tabla 6:

Tabla 6. Diseño Box-Behnken (Elaboración propia).

ORDEN	pH	DOSIS (g/l)	TIEMPO DE AGITACIÓN (min)
1	7	2	30
2	9	3	25
3	9	1	25
4	8	1	20
5	8	3	20
6	8	2	25
7	9	3	25
8	8	2	25
9	7	2	20
10	9	2	20
11	7	3	25
12	7	1	25
13	8	3	30
14	8	1	30
15	8	3	20
16	8	1	20
17	9	1	25
18	8	1	30
19	8	2	25
20	8	2	25
21	7	3	25
22	7	1	25
23	8	2	25
24	8	3	30
25	9	2	30
26	9	2	20
27	7	2	20
28	8	2	25
29	9	2	30
30	7	2	30

4. RESULTADOS:

Se realizó la medición de los parámetros estudiados en la muestra inicial por triplicado.

Se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 7: Resultados iniciales de la muestra de agua residual.

Muestra inicial	pH	O. Disuelto	Turbidez	DBO ₅	DQO	S.T	S.D	S.S.T
		mg/L	NTU	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
R1	8.07	1.12	972	854	1014	841.2	452.6	334.8
R2	8.06	1.17	961	867	1018	846.1	455.3	334.3
R3	8.05	1.25	944	861	1020	845.6	461.5	334.1
Promedio	8	1	959	861	1017	844	456	334

Tabla 8: Resultados de la prueba de jarras.

N° JARRA	pH	O. Disuelto	Turbidez	DBO ₅	DQO	S.T	S.D	S.S.T
		mg/L	NTU	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	7.69	4.08	32.8	458	653	326.2	94.11	75.11
2	8.66	4.05	72.1	456	651	324.8	94.57	76.21
3	8.81	4.08	34	452	648	328.4	94.22	75.78
4	8.22	4.11	27.9	416	638	316.2	94.12	75.85
5	7.94	5.01	51.8	418	642	315.7	94.63	76.12
6	7.99	5.08	37.7	408	633	328.3	94.28	75.68
7	7.43	4.39	93.7	422	637	314.7	95.01	76.07
8	7.93	4.29	39.1	435	641	321.5	94.68	75.52
9	7.65	4.41	30.8	438	639	312.7	94.07	75.59
10	7.73	4.28	98.2	464	657	331.1	95.02	76.04
11	7.68	5.12	98.2	457	655	331.4	94.63	75.64
12	7.61	4.26	47.9	464	652	322.6	94.14	75.54
13	9.72	5.07	12.5	411	645	314.1	94.03	75.09
14	8.98	5.11	46.3	437	648	328.7	94.52	75.38
15	8.14	5.06	87.5	463	659	335.4	95.07	76.11
16	8.73	5.03	37.7	455	656	314.3	94.14	75.82
17	9.78	5.05	88.4	462	658	341.3	94.85	76.27
18	8.92	4.19	70.4	479	671	339.5	94.79	76.31
19	9.40	5.12	88.2	419	615	338.8	94.82	76.84
20	8.49	5.18	84.3	428	618	345.1	94.78	76.12
21	7.50	5.31	48.2	437	627	326.7	94.21	75.74
22	7.71	4.89	64.5	439	633	329.3	94.19	75.63
23	9.46	5.31	101	463	669	352.7	95.03	76.14
24	8.10	5.28	95	421	631	352.2	95.01	76.12
25	9.38	5.46	105	418	615	356.4	95.07	76.63
26	9.17	4.93	103	422	621	353.2	95.05	76.68
27	7.68	4.91	73.6	436	627	328.8	94.76	76.87
28	7.93	5.25	65.5	411	612	325.8	94.78	75.82
29	9.31	5.19	94.6	419	616	323.1	94.89	76.18
30	7.82	5.33	40.5	415	611	314.9	94.27	75.11

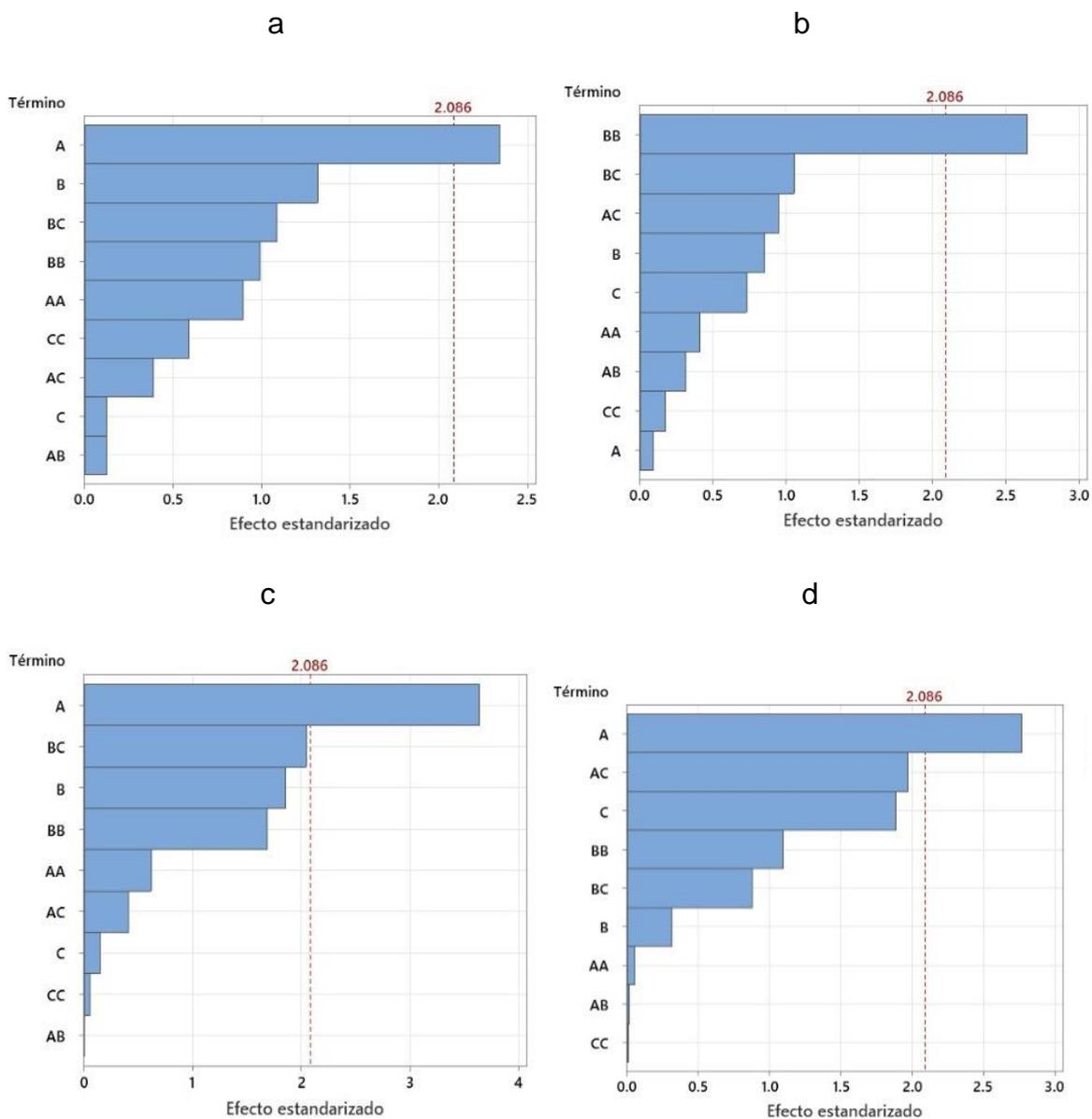
A continuación, en la tabla 9, se presentan los resultados obtenidos en los 30 experimentos realizados en la prueba de jarras indicando el porcentaje de remoción de cada parámetro estudiado.

Tabla 9: Eficiencia de remoción para cada parámetro.

Orden	Parámetros			Eficiencia						
	pH	Dosis (g/l)	Tiempo de agitación (min)	Turbidez (%)	Incremento OD (%)	DBO ₅ (%)	DQO (%)	ST (%)	SD (%)	SST (%)
1	7	2	30	96.6	71.1	46.8	35.8	61.4	79.4	77.5
2	9	3	25	92.5	70.9	47.0	36.0	61.5	79.3	77.2
3	9	1	25	96.5	71.1	47.5	36.3	61.1	79.4	77.3
4	8	1	20	97.1	71.3	51.7	37.3	62.5	79.4	77.3
5	8	3	20	94.6	76.4	51.4	36.9	62.6	79.3	77.2
6	8	2	25	96.1	76.8	52.6	37.8	61.1	79.3	77.4
7	9	3	25	90.2	73.1	51.0	37.4	62.7	79.2	77.3
8	8	2	25	95.9	72.5	49.5	37.0	61.9	79.3	77.4
9	7	2	20	96.8	73.2	49.1	37.2	63.0	79.4	77.4
10	9	2	20	89.8	72.4	46.1	35.4	60.8	79.2	77.3
11	7	3	25	89.8	77.0	46.9	35.6	60.7	79.3	77.4
12	7	1	25	95.0	72.3	46.1	35.9	61.8	79.4	77.4
13	8	3	30	98.7	76.7	52.2	36.6	62.8	79.4	77.5
14	8	1	30	95.2	76.9	49.2	36.3	61.1	79.3	77.5
15	8	3	20	90.9	76.7	46.2	35.2	60.3	79.2	77.2
16	8	1	20	96.1	76.5	47.1	35.5	62.8	79.4	77.3
17	9	1	25	90.8	76.6	46.3	35.3	59.6	79.2	77.2
18	8	1	30	92.7	71.8	44.3	34.0	59.8	79.2	77.2
19	8	2	25	90.8	77.0	51.3	39.5	59.9	79.2	77.0
20	8	2	25	91.2	77.2	50.3	39.3	59.1	79.2	77.2
21	7	3	25	95.0	77.8	49.2	38.4	61.3	79.4	77.4
22	7	1	25	93.3	75.9	49.0	37.8	61.0	79.4	77.4
23	8	2	25	89.5	77.8	46.2	34.2	58.2	79.2	77.2
24	8	3	30	90.1	77.7	51.1	38.0	58.3	79.2	77.2
25	9	2	30	89.1	78.4	51.4	39.5	57.8	79.2	77.1
26	9	2	20	89.3	76.1	51.0	39.0	58.2	79.2	77.1
27	7	2	20	92.3	76.0	49.3	38.4	61.1	79.2	77.0
28	8	2	25	93.2	77.5	52.2	39.8	61.4	79.2	77.3
29	9	2	30	90.1	77.3	51.3	39.4	61.7	79.2	77.2
30	7	2	30	95.8	77.9	51.8	39.9	62.7	79.3	77.5

Se evaluó la influencia de los factores estudiados para determinar los parámetros que tienen más influencia en la remoción:

Figura 5: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para a) turbidez; b) DQO; c)SD y d)SST



Leyenda:

- A: pH
- B: Dosis
- C: Tiempo de agitación
- AA, AB, AC, BB, CC: Son las interacciones entre parámetros.

En el diagrama de Pareto (Figura a) indica que el factor pH es significativo para el parámetro de turbidez, esto se determinó observando el valor p en el ANOVA ($p > 0.05$).

En la Figura b indica que solo la interacción BB (Dosis*Dosis) es significativa para remociones de DQO.

En la Figura c se muestra el diagrama de Pareto que indica que solo el factor de pH es significativo para SD.

En el diagrama de Pareto (Figura d) señala que solo el factor de pH es significativo para la remoción de SST.

Los demás parámetros estudiados como son OD, DBO_5 y ST según el análisis de regresión indican que no son significativos.

En la tabla 10, nos indica los valores óptimos de pH, dosis y tiempo de agitación.

Tabla 10: Solución sugerida por el diseño Box-Behnken

Variable	Valor
pH	7.19
Dosis (g/l)	3
Tiempo de agitación (min)	30

En la tabla 11, se presenta la predicción de respuesta del diseño Box-Behnken para los parámetros estudiados

Tabla 11: Predicciones de resultados

Parámetro	Predicción (%)
SST	77.5
SD	79.4
ST	61.4
DQO	37.09
DBO_5	50.07
OD	76.8
Turbidez	95.8

Tabla 12: Ecuaciones de predicción.

Parámetros	Ecuación completa	R^2
Turbidez	61.0+15.3*pH- 9.4dosis – 1.02 Tiempo de agitación – 0.93 pH*pH+ 1.02 dosis*dosis + 0.0245Tiempo de agitación* Tiempo de agitación – 0.123 pH*dosis – 0.077 p H* Tiempo de agitación +0.216 dosis* Tiempo de agitación	35.17%
DQO	74.1 – 7.2 pH + 2.23dosis – 0.86 Tiempo de agitación + 0.250 pH*pH- 1.606 dosis*dosis - 0.0043Tiempo de agitación* Tiempo de agitación + 0.184 pH*dosis + 0.111 pH* Tiempo de agitación +0.123 dosis* Tiempo de agitación	34.95%
SD	81.00 – 0.248 pH – 0.425dosis – 0.0060 Tiempo de agitación + 0.0147 pH*pH - 0.0402 dosis*dosis + 0.000053Tiempo de agitación* Tiempo de agitación + 0.0 pH*dosis + 0.00186 pH* Tiempo de agitación +0.00937 dosis* Tiempo de agitación	54.72%
SST	74.1 – 7.2 pH + 2.23dosis – 0.86 Tiempo de agitación + 0.250 pH*pH- 1.606 dosis*dosis - 0.0043Tiempo de agitación* Tiempo de agitación + 0.184 pH*dosis + 0.111 pH* Tiempo de agitación +0.123 dosis* Tiempo de agitación	46.24%
	Ecuación reducida	R^2 - Ajustado
Turbidez	Turbidez % = 61.0 + 15.3 pH	6.00%
DQO	DQO% = 74.1 - 1.606 dosis*dosis	5.67%
SD	S.D% = 81.00 - 0.248 pH	34.35%
SST	S.S.T% = 74.1 - 0.248 pH	22.04%

V. DISCUSIÓN

Los resultados de la prueba de jarras se presentan en la Tabla 9. Mostrando los valores máximos de remoción de Turbidez (98.7%), DBO₅ (52.6%), DQO (39.9%), ST (63%), SD (79.4%), SST (77.5%) y en el caso de Oxígeno disuelto nos referimos a un incremento de 78.4%. La mayor eliminación de estos parámetros se observa a pH neutro y ligeramente alcalino (7-8), una dosis en el rango de 2-3 g/l de *Opuntia ficus-indica* y un tiempo de agitación de 20 a 30 min.

Según Beyene et al., (2016) nos muestran en su estudio que la capacidad de coagulación del polvo de *Opuntia ficus-indica* aumenta del 23.9% a 54% a medida que la dosis aumenta de 0.50 g/l a 3.5 g/l, un comportamiento similar se dio en nuestro estudio cuando se incrementó la dosis de 1 a 3 g/L. Sin embargo, los resultados en medio alcalino (pH=9) en la mayoría de parámetros tuvieron una disminución en la remoción. Esto lo explica Choudhary et al. (2019) indicando que en pH alcalino el tamaño de las moléculas y el ordenamiento de las cadenas de polisacáridos del coagulante se alteran afectando la actividad de eliminación de turbidez, por lo que el diámetro de las moléculas se ve significativamente influenciado por el cambio de pH de la solución. A medida que el pH incrementó, el diámetro de las moléculas aumentó y disminuye la superficie de interacción polisacárido-contaminante.

Respecto al efecto de pH en la remoción de los parámetros estudiados, según el diagrama de Pareto (Figura 5), solo es significativo en la remoción de Turbidez (a), SD (c) y SST (d). Los resultados obtenidos muestran que a pH cercano a 7-8 se obtienen las más altas remociones de turbidez (96%), SD (79.4%) Y SST (77.5%). Este resultado obtenido fue explicado por Hadadi et al., (2022) indicando que el pH afecta a la carga superficial del coagulante mostrando una eliminación de turbidez del 95.19% en el rango de pH 2 a 8 utilizando *Opuntia ficus-indica*. Resultados similares fueron reportados por Choudhary et. al (2019) con una remoción máxima de turbidez de 98% a pH 7-8, explicando que la carga negativa de los polisacáridos a pH neutro y ligeramente alcalino provoca una repulsión hidrostática entre moléculas, lo que da como resultado un diámetro hidrodinámico más pequeño proporcionando

mayor superficie de contacto para interactuar con los contaminantes de la solución provocando una mayor remoción.

Las moléculas de *Opuntia ficus-indica* actúan predominantemente en la adsorción y el mecanismo de coagulación de puente entre partículas mediante la desestabilización de las partículas que tiene lugar a la adsorción en las cadenas de polisacáridos del coagulante formando el puente en términos más complejos de partícula-polisacárido-partícula formándose coágulos fáciles de sedimentar (Choudhary, Ray y Neogi 2019).

Respecto al efecto de la dosis sobre la remoción de los parámetros estudiados (b) la interacción dosis*dosis solo es significativo en la remoción de DQO. Los resultados obtenidos muestran que a una dosis de 2 g/L se obtiene la más alta remoción al (39.9%) de DQO (Tabla. 9). Beyene et al., (2016) obtuvo resultados de eliminación de DQO (7-41%) a medida que la dosis de polvo de *Opuntia ficus-indica* aumenta de 0,50 g/l a 3,50 g/l, es decir a mayor dosis es mayor el contenido de polisacáridos y por lo tanto a mayor remoción.

En este estudio la mayor remoción de DQO se obtuvo con dosis de 2 g/L sin embargo con la más alta dosis (3 g/L) hubo una disminución. Esto lo explica Chen et al., (2023) que reportó un efecto negativo en la reducción de DQO por el exceso de coagulante debido a la inversión de carga donde la sobredosis provoca que las partículas suspendidas cargadas negativamente sufrieran una reestabilización.

Según Beyene et al., (2016) nos indica que los principales factores que afectan el proceso de coagulación son la dosis óptima, tiempo de mezcla y el pH. Sin embargo, según nuestros resultados solo tienen influencia la dosis y el pH.

En base a los resultados experimentales hemos podido predecir la máxima remoción de cada uno de los parámetros estudiados en los modelos presentados en la Tabla 12, cada ecuación está en función a los valores de pH y dosis que son significativos, representan de manera simbólica el modelo de respuesta considerando todos términos lineales. Además, presenta un R^2 y un R^2 ajustado. Los modelos obtenidos para la remoción de turbidez, DQO, SD y SST presentan un R relativamente bajo siendo el mayor de 54.72% indicando

que el modelo no es capaz de predecir con exactitud los valores de remoción. Jaramillo et. al (2013) trabajaron con un R^2 ajustado de 66,89% donde los autores refieren que no representa adecuadamente el proceso estudiado. Nuestro mayor R^2 ajustado fue de 34.35% por lo tanto, no es capaz de predecir la remoción de los parámetros estudiados.

VI. CONCLUSIONES

Respecto al efecto de la dosis, pH y tiempo de agitación se determinó que el pH fue el parámetro que demostró significancia sobre la remoción de turbidez, sólidos disueltos, sólidos suspendidos totales. Esto debido a que el pH neutro y ligeramente alcalino provoca una repulsión entre moléculas del coagulante originando una mayor superficie de interacción con el contaminante. Asimismo, la interacción dosis*dosis se mostró significativa para la remoción de DQO. Esto demuestra la gran capacidad de *Opuntia ficus-indica* en la remoción de carga orgánica, donde a una dosis de 2 g/l permitió la más alta remoción de DQO.

La dosis óptima del polvo de *Opuntia Ficus-indica* fue de 2 g/l ya que esta cantidad contiene mayor disponibilidad de contenido de polisacáridos efectuando una mayor remoción. Sin embargo, para 3 g/l mostró una sobredosis provocando que las partículas se queden suspendidas en el agua originando una menor remoción. El pH óptimo fue de 7-8, esto se debe a una disminución del tamaño de las moléculas en este medio facilitando la formación del puente polisacárido-partícula, con respecto al medio alcalino (pH=9) no se obtuvieron mayores remociones ya que las moléculas del coagulante incrementaron en tamaño teniendo una menor superficie de interacción. En el tiempo de agitación óptimo fue de 20 a 30 min, pero este no tuvo significancia sobre la remoción de parámetros. Los máximos valores de remoción alcanzados fueron de Turbidez 98.7%, DBO_5 52.6%, DQO 39.9%, ST 63%, SD 79.4%, SST 77.5% y en el caso de Oxígeno disuelto nos referimos a un incremento de 78.4%.

La aplicación del diseño Box-Behnken permitió obtener modelos matemáticos a fin de predecir la remoción de Turbidez, DBO_5 , DQO, ST, SD, SST y OD considerando solo aquellos parámetros que tiene significancia. Sin embargo, el mayor R^2 ajustado es de 34.35% (SD), lo que significa que los modelos no predicen adecuadamente ninguno de los parámetros evaluados.

VII. RECOMENDACIONES

En relación con los resultados obtenidos en la investigación se recomienda lo siguiente:

Identificar la dosis, pH y tiempo de agitación óptimo para cada parámetro estudiado, ya que en este estudio se identificó el valor óptimo en general.

Evaluar la relación del polvo de *Opuntia ficus-indica* en dosis entre 2 a 4 g/l, diferente pH (6-10) y tiempo de agitación (35 a 45 min) para la reducción de SST y materia orgánica, ya que en este estudio se evaluó solo 3 alternativas de cada parámetro y cada resultado fue distinto para remover los contaminantes estudiados.

Dado que en este estudio se identificó al pH y dosis*dosis como parámetros que tienen efecto significativo en la remoción, se recomienda evaluar otros parámetros como velocidad de agitación (150 rpm) que influye directamente en el tiempo de agitación.

Se recomienda utilizar de 2 a 4 repeticiones para que el Diseño Box-Benken evalúe con mayor exactitud los resultados y sus predicciones sean más precisas.

REFERENCIAS

- BEYENE, H.D., HAILEGEBRIAL, T.D. y DIRERSA, W.B., 2016. Investigation of Coagulation Activity of Cactus Powder in Water Treatment. *Journal of Applied Chemistry*, vol. 2016, ISSN 2356-7171. DOI 10.1155/2016/7815903.
- BOUAOUINEA, O y BOURVENB.I, 2021. Eficiencia de un proceso de coagulación-floculación utilizando *Opuntia ficus-indica* para el tratamiento de un efluente textil. Desalination Publications. DOI 10.5004/dwt.2021.27650
- BOUCHARB, R., DERBAL, K. y BENALIA, A., 2021. Optimization of active coagulant agent extraction method from Moringa Oleifera seeds for municipal wastewater treatment. *Water Science and Technology*, vol. 84, no. 2, ISSN 19969732. DOI 10.2166/wst.2021.234.
- CABRERA MARTÍNEZ, N.C., 2018. Test of natural coagulants extracted from Ipomoea incarnata and Moringa oleífera in the purification of industrial wastewater in Cartagena de Indias/Ensayo de coagulantes naturales extraídos de Ipomoea incarnata y Moringa olífera en la depuración de ag... *Prospectiva*, vol. 16, no. 2, ISSN 16928261. DOI 10.15665/rp.v16i2.1434.
- CALDERA, Y., LAGUNA, K., MILLÁN, E., GONZÁLEZ, Y. y GUTIÉRREZ, E., 2019. *Opuntia ficus indica*: un coagulante alternativo para el tratamiento de aguas con alta turbidez y pH ácido. *Revista Arbitraria Venezolana del Núcleo Costa Oriental del Lago*, vol. 14,
- CASTELLANOS, Fredy, 2017. Revisión del uso de coagulantes naturales en el proceso de clarificación del agua en Colombia. Universidad Militar Nueva Granada [en línea], pp. 1-18. Recuperadode:<https://repository.unimilitar.edu.co/handle10654/17102?local>.
- CHEN, T., ISMAIL, N., OH, K.S. y TEE, L.H., 2023. Coagulation-flocculation process for greywater treatment using Chitosan and Hibiscus Sabdariffa. *Journal of Physics: Conference Series*. S.I.: Institute of Physics, vol. 2523. DOI 10.1088/1742-6596/2523/1/012013.
- CHIBINDA, C., ARADA-PÉREZ, M. de los A. y PÉREZ-POMPA, N., 2017. Caracterización por métodos físico-químicos y evaluación del impacto cuantitativo de las aguas del Pozo la Calera. *Revista Cubana de Química*, vol. 29, no. 2, ISSN 2224-5421.
- CHOQUE-QUISPE, D., LIGARDA-SAMANEZ, C.A., RAMOS-PACHECO, B.S., SOLANO-REYNOSO, A.M., CHOQUE-QUISPE, Y., PERALTA-GUEVARA, D.E. y QUISPE-QUISPE, Y., 2020. Optimization of the flocculating capacity of natural coagulants in

- water treatment. *DYNA (Colombia)*, vol. 87, no. 212, ISSN 00127353. DOI 10.15446/dyna.v87n212.80467.
- CHOUHDARY, M., RAY, M.B. y NEOGI, S., 2019. Evaluation of the potential application of cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a bio-coagulant for pre-treatment of oil sands process-affected water. *Separation and Purification Technology*, vol. 209, ISSN 18733794. DOI 10.1016/j.seppur.2018.09.033.
- CHULLUNCUY-CAMACHO, N.C., 2011. Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería Industrial*, vol. 0, no. 029, ISSN 1025-9929. DOI 10.26439/ing.ind2011.n029.232.
- DAS, N., OJHA, N. y MANDAL, S.K., 2021. Wastewater treatment using plant-derived bioflocculants: Green chemistry approach for safe environment. *Water Science and Technology*, vol. 83, no. 8, ISSN 19969732. DOI 10.2166/wst.2021.100.
- DELZO SALOMÉ, A.S., HUARI VILA, O.P., SALAZAR MERCADO, J.E. y CASIMIRO SORIANO, E.M., 2021. Diseño box – Behnken para optimizar el rendimiento de un pico sistema solar fotovoltaico. *TECNIA*, vol. 31, no. 2, ISSN 0375-7765. DOI 10.21754/tecnia.v21i2.1018.
- DERYPOL, 2021. Water Treatment Products. Barcelona, España: Derypol S.A. Retrieved from https://www.derypol.com/wpcontent/uploads/2021/09/BrochureWaterTreatment2021ENG_compressed.pdf.
- EICHHORN, C., WECKMÜLLER, S. y URBAN, W., 2022. Natural Flocculant from a Combination of Moringa oleifera Seeds and Cactus Cladodes (*Opuntia ficus-indica*) to Optimize Flocculation Properties. *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 21, ISSN 20734441. DOI 10.3390/w14213570.
- Encyclopedia of Hydrological Sciences*, 2005. S.l.: s.n.
- FICUSINDICA, O., [sin fecha]. PAPEL • ACCESO ABIERTO. , DOI 10.1088/1742-6596/2046/1/012057.
- FREY, D.G., 1984. Goldman, C. R., and A. J. Horne. 1983. Limnology. McGraw-Hill Book Co., New York. 464 p. \$31.95. *Limnology and Oceanography*, vol. 29, no. 2, ISSN 0024-3590. DOI 10.4319/lo.1984.29.2.0447b.
- GALEANO, M.E., 2004. *Estrategias de investigación social cualitativa El giro en la mirada*. S.l.: s.n.

- GUZMÁN, D. Y CHAVEZ, J. ESTUDIO BROMATOLÓGICO DEL CLADODIO DEL NOPAL (*Opuntia ficus-indica*) PARA EL CONSUMO HUMANO, Rev Soc Quím Perú. 2007, 73, Nº 1 (41-45)
- HADADI, A., IMESSAOUDENE, A., BOLLINGER, J.C., ASSADI, A.A., AMRANE, A. y MOUNI, L., 2022. Comparison of Four Plant-Based Bio-Coagulants Performances against Alum and Ferric Chloride in the Turbidity Improvement of Bentonite Synthetic Water. *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 20, ISSN 20734441. DOI 10.3390/w14203324.
- JACO, E., GÓMEZ, W., LOROÑA, F., ZAMORA, N. y HUAMAN, N., 2022. Eficiencia de la *Opuntia ficus indica* como coagulante para el tratamiento de las aguas residuales grises y su aplicación en un sistema piloto. *Ingeniería del Agua*, vol. 26, no. 3, ISSN 1134-2196. DOI 10.4995/ia.2022.17478.
- JARAMILLO, A.C., ECHAVARRÍA, A.M. y HORMAZA, A., 2013. Diseño Box-Behnken para la optimización de la adsorción del colorante azul ácido sobre residuos de flores. *Ingeniería y Ciencia*, vol. 9, no. 18, ISSN 17949165. DOI 10.17230/ingciencia.9.18.4.
- JAUME, A., 2011. Depuración De Aguas Residuales Urbanas. *Pixy*, no. 1897,
- LLOPIS, David. 2022. Metodología de la investigación. Disponible en: <https://poliformat.upv.es/access/content/user/24389381/Contenido%20abierto%20al%20p%C3%ABlico/Metodolog%C3%ADa%20de%20la%20investigaci%C3%B3n/3.2%20Metodologi%CC%81a%20experimental.pdf>.
- LORENZO-ACOSTA, Y., 2006. Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. XL, no. 2, ISSN 0138-6204.
- METCALF AND EDDY, I., 2013. *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Vol II*. S.I.: s.n. vol. II.
- MORA-APARICIO, C., ALFARO-CHINCHILLA, C., PÉREZ-MOLINA, J.P. y VEGA-GUZMÁN, I., 2022. Environmental contribution of Los Tajos wastewater treatment plant in the removal of physicochemical and microbiological pollutants. *Uniciencia*, vol. 36, no. 1, ISSN 22153470. DOI 10.15359/ru.36-1.33.
- NIÑO ROJAS, V.M., 2019. *Metodología de la Investigación. Diseño, ejecución e informe*. S.I.: s.n.
- ORDOÑEZ, Elizabeth S., et al. Cuantificación de polifenoles totales y capacidad antioxidante en cáscara y semilla de cacao (*Theobroma cacao* L.), tuna (*Opuntia ficus*

- indica Mill*), uva (*Vitis Vinífera*) y uvilla (*Pourouma cecropiifolia*). *Scientia Agropecuaria*, 2019, vol. 10, no 2, p. 175-183. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.02.02>
- OTÁLORA, M.C., WILCHES-TORRES, A., LARA, C.R., CIFUENTES, G.R. y GÓMEZ CASTAÑO, J.A., 2022. Use of *Opuntia ficus-indica* Fruit Peel as a Novel Source of Mucilage with Coagulant Physicochemical/Molecular Characteristics. *Polymers*, vol. 14, no. 18, ISSN 20734360. DOI 10.3390/polym14183832.
- PAUCAR, F. y ITURREGUI, P., 2020. The challenges of wastewater reuse in Peru. *South Sustainability*, DOI 10.21142/ss-0101-2020-004.
- QADIR, M., DRECHSEL, P., JIMÉNEZ CISNEROS, B., KIM, Y., PRAMANIK, A., MEHTA, P. y OLANIYAN, O., 2020. Global and regional potential of wastewater as a water, nutrient and energy source. *Natural Resources Forum*, vol. 44, no. 1, ISSN 14778947. DOI 10.1111/1477-8947.12187.
- SUNASS, 2015. DIAGNÓSTICO DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL ÁMBITO DE OPERACIÓN DE LAS ENTIDADES PRESTADORAS DE SERVICIOS DE SANEAMIENTO, 1 era edición. Tarea Asociación Gráfica Educativa
- SOLIZ, D., 2019. Cómo hacer un perfil proyecto de investigación científica. *Cómo hacer un perfil proyecto de investigación científica*. S.l.: s.n.,
- TARÓN-DUNOYER, A.A., GUZMÁN-CARRILLO, L.E. y BARROS-PORTNOY, I., 2017. Evaluación de la *Cassia fistula* como coagulante natural en el tratamiento primario de aguas residuales. *Orinoquia*, vol. 21, no. 1, ISSN 0121-3709. DOI 10.22579/20112629.396.
- TERÁN, Y., NAVAS, D., PETIT, D., GARRIDO, E. y D'AUBETERRE, R., 2015. Análisis de las características físico-químicas del fruto *Opuntia ficus -indica* (L.) Miller, cosechados en Lara, Venezuela. *Revista Iberoamericana Tecnología Postcosecha*, vol. 16, no. 1,
- VARGAS, M.A., ARMAS, A.S., VALENCIA, Z.L. y BENITES, E., 2022. Safety in Wastewater Treatment Plants and the use of Natural Coagulants as an Alternative for Turbidity. *Chemical Engineering Transactions*, vol. 91, ISSN 22839216. DOI 10.3303/CET2291051.

- VARGAS, José Luis, 2018. Comparación de la capacidad coagulante del *Opuntia ficus indica* mill de tres departamentos para el tratamiento de aguas del Rio Chillón-Aahh Santa Cruz Del Norte- Lima 2018. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/21095>.
- VICUÑA, E., GALINDO Y SOTO. A, 2022. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE REMOCIÓN DE PB^{2+} Y ZN^{2+} POR EL MATERIAL ADSORBENTE- FLOCULANTE NEONITEMR. Rev Soc Quím Perú. DOI 10.37761/rsqp.v87i4.362
- VIDAL-TOVAR, MOSCOTE-VIDES, VIDES-REDONDO Y SEVERICHE, 2020. Evaluación del poder de tos de la *Opuntia ficus indica* para la remoción de turbiedad en aguas del río Guatapuri (Caribe colombiano). Expotecnología 2019 "Investigación, Innovación y Desarrollo en Ingeniería" DOI :10.1088/1757-899X/844/1/012003
- VILLANUEVA, Jheyser, 2019. Efecto de tres concentraciones de mucílago de tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) y de San Pedro (*Echinopsis pachanoi* (Britton & Rose) Friedrich & G.D. Rowley) en la clarificación del agua. [en línea], pp. 55. Recuperado de: <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/3474>
- WWAP (WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME), 2012. *World Water Development Report Volume 4: Managing Water under Uncertainty and Risk*. S.l.: s.n. vol. 1.

ANEXOS

Anexo N° 1: Matriz de Operacionalización de Variables

Variable	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Mediciones
Independiente <i>Opuntia ficus-indica</i>	Especie que pertenece la familia Cactaceae, siendo una especie muy abundante en el continente americano, principalmente habitan en regiones áridas. Los cladodios de cactus están constituidos principalmente por un heteropolisacárido, el mucílago es una mezcla de polisacáridos ácidos y neutros (Ordoñez et al. 2019).	Se adapta fácilmente a las condiciones de vida de regiones áridas y semi áridas, tiene buena tolerancia a sequías, presenta frutos comestibles y también comercializables. Posee la una característica coagulante indispensable para el tratamiento de aguas residuales (Terán et al., 2015).	Granulometría óptima de la <i>Opuntia ficus-indica</i> para coagulación de aguas residuales. Eficiencia de remoción utilizando <i>Opuntia ficus-indica</i> .	Análisis granulométrico Pruebas de turbidez en jarras Dosis de <i>opuntia ficus-indica</i> Tiempos del tratamiento en prueba de jarras Remoción de parámetros	% NTU g/L min %

Variable	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Mediciones
Dependiente Modelamiento de la coagulación de aguas residuales	Las aguas residuales son aquellas con propiedades se ven alteradas por el uso doméstico, agrícola, industrial, etc. Como también las aguas que se unen a estas como aguas pluviales que recorren diversas áreas del territorio que están presentes en las PTAR, (Jaume 2011).	Poseen características no aptas para el consumo humano y para el uso en cultivos, por eso pasan un tratamiento depurativo, con el fin de una reutilización adecuada y aprovechamiento sostenible (Jaume 2011)	Características del agua residual domestica durante el proceso de coagulación con <i>Opuntia ficus-indica</i> .	Potencial de hidrogeno Solidos totales Solidos disueltos Solidos suspendidos totales Oxígeno disuelto Demanda química de oxigeno Demanda bioquímica de oxigeno	Acido/base mg/l mg/l mg/l mg/l mg/l mg/l

Anexo N° 2: Matriz de consistencia

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	Hipótesis General	Tipo de estudio: Aplicada
¿Cuáles son los modelos que permiten predecir la coagulación de aguas residuales, aplicando <i>Opuntia ficus-indica</i> ?	Modelar la coagulación de aguas residuales, aplicando <i>Opuntia ficus-indica</i>	Los modelos matemáticos obtenidos permiten predecir la coagulación de aguas residuales, aplicando <i>Opuntia ficus-indica</i>	Diseño de estudio: Experimental
PROBLEMA ESPECÍFICO	OBJETIVO ESPECÍFICO	Hipótesis específicas	POBLACIÓN
¿Cuál es el efecto de la dosis, pH y tiempo de agitación en la remoción de DBO ₅ , DQO, Turbidez, OD, SD, ST, SST?	Determinar el efecto de la dosis, pH y tiempo de agitación en la remoción de DBO ₅ , DQO, Turbidez, OD, SD, ST, SST	La dosis, pH y tiempo de agitación tendrán un efecto significativo en la remoción de DBO ₅ , DQO, turbidez, OD, SD, ST, SST	Muestra Muestreo Unidad muestral
¿Cuáles son los valores óptimos de dosis de <i>Opuntia ficus-indica</i> , pH y tiempo de agitación para la coagulación de aguas residuales?	Identificar los valores óptimos de dosis, pH y tiempo de agitación en el tratamiento de coagulación	La dosis óptima de <i>Opuntia ficus-indica</i> será mayor a 2 g/L, el pH óptimo será de 7 y el tiempo de agitación será de 30 min para coagulación de aguas residuales.	TÉCNICA E INSTRUMENTO Observación
¿Cuáles serán las ecuaciones de predicción para la coagulación de aguas residuales?	Determinar las ecuaciones de predicción para la remoción de contaminantes.	Las ecuaciones de predicción serán capaces de optimizar los resultados en la remoción de todos los contaminantes estudiados.	INSTRUMENTOS
			Diseño Box-Behnken Registros

Anexo N° 3:



Lavado de la materia prima *Opuntia ficus-indica*



Pelado de materia prima



Proceso de picado y embolsado



Verificación de horno en óptimas condiciones



Opuntia ficus-indica en el horno



Horno a 70 °C



Verificación extracción de humedad (24 HORAS DESPUÉS)



Avance extracción de humedad al 50% (48 HORAS DESPUÉS)



Avance extracción de humedad al 100% (96 HORAS DESPUÉS)



Peso total (*Opuntia ficus-indica* seca)



Dosificación en la prueba de jarras



Medición de pH



Inicio de la prueba de jarras