

Efficacy of the organic coagulants in the reduction of turbidity in municipal irrigation water in Lima, Peru

Abstract – Generally, the water used by the districts of Lima, Peru, to irrigate the green areas in their jurisdiction is surface water treated with inorganic coagulants such as aluminum sulfate and iron sulfate. These products are chemical compounds of aluminum or iron salts used to make water potable and eliminate impurities through coagulation and flocculation processes; however, the use of these chemical compounds has disadvantages associated with high prices, generation of toxic sludge, and adverse effects on health and the environment. Therefore, this study proposes an alternative to contribute to sustainable management at the local level. Thus, the aim of this paper was to evaluate the efficacy of papaya seed (*Carica papaya*) and prickly pear (*Opuntia ficus indica*) as organic coagulants to reduce the turbidity of irrigation water in the district of Magdalena del Mar, Lima, Peru. The methodology is purely experimental, since it uses the jar test to determine the optimum concentrations of both coagulants. The results show that these concentrations are 0.2 and 0.1 g/L, with an efficacy of 97% and 95% with respect to the reduction of turbidity in irrigation water, for papaya seed and prickly pear seed, respectively. For the above reasons, it is recommended that the research be expanded to consider economic aspects in order to evaluate the feasibility of use by local governments.

Keywords – green areas, irrigation, coagulation, flocculation, water turbidity, efficacy

Eficacia de coagulantes orgánicos en la reducción de la turbidez de agua de riego municipal en Lima, Perú

Resumen – Generalmente, el agua que utilizan los distritos de Lima, Perú, para regar las áreas verdes de su jurisdicción son aguas superficiales tratadas con coagulantes inorgánicos como el sulfato de aluminio y sulfato de hierro. Este tipo de productos son compuestos químicos de sales de aluminio o hierro usados para potabilizar y eliminar impurezas del agua por medio de procesos de coagulación y floculación, no obstante, el uso de estos compuestos químicos tiene desventajas asociadas a elevados precios, generación de lodos tóxicos; y efectos adversos sobre la salud y el ambiente. Por ello, esta investigación plantea una alternativa para contribuir a la gestión sostenible a nivel local. De esta manera, el objetivo de este estudio fue evaluar la eficacia de la semilla de papaya (*Carica papaya*) y la penca de tuna (*Opuntia ficus indica*) como coagulantes orgánicos para disminuir la turbidez del agua de regadío en el distrito de Magdalena del Mar, Lima, Perú. La metodología es experimental pura, puesto que utiliza la prueba de jarras para determinar las concentraciones óptimas de ambos coagulantes. Los resultados muestran que estas concentraciones son de 0,2 y 0,1 g/L, con una eficacia de 97% y 95% respecto de la disminución de la turbidez de las aguas de riego, para la semilla de papaya y penca de tuna, respectivamente. Por lo expuesto, se recomienda ampliar la investigación considerando aspectos económicos para evaluar la factibilidad de uso por parte de los gobiernos locales.

Palabras clave – áreas verdes, riego, coagulación, floculación, turbidez de agua, eficacia

I. INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos se encuentran contaminados a nivel físico, químico y biológico. La contaminación física se presenta principalmente por la alteración de la temperatura, color y densidad, mientras que la contaminación química se manifiesta por la modificación de las sustancias disueltas y la demanda de oxígeno disuelto. Por último, la contaminación biológica es causada, básicamente, por la presencia de patógenos bacterianos [1].

En los últimos años, la contaminación del agua ha sido exacerbada por vertimientos industriales, agrícolas y urbanos [2]. Además, el aumento demográfico, el desarrollo de actividades humanas; y la expansión urbana son otras causas que contribuyen a la contaminación del agua [3].

[4], señalan que conflictos por el uso del agua podrían originarse por la asignación incorrecta de este recurso entre usos alternativos o entre regiones geográficas. Estos conflictos

podrían intensificarse por la creciente escasez relativa de agua, su menor calidad, la deficiente gestión de los recursos hídricos, la variabilidad climática debido a la ocurrencia del Fenómeno del Niño, el cambio climático; y el crecimiento de la población. En ese sentido, una gestión eficiente del agua en un escenario de creciente escasez y aumento de la demanda representa un propósito relevante en países en desarrollo, específicamente en áreas urbanas de Latinoamérica y el Caribe [5].

En línea con lo anterior, el Instituto Nacional de Estadística e Informática [6], señala que, para el año 2050 aproximadamente mil millones de habitantes residirán en áreas urbanas con escasez de agua, debido al crecimiento de la población e incremento de la demanda de agua potable. En el caso del Perú, indica que más de 3,6 millones de ciudadanos no cuentan con agua potable y que sólo el 64% de peruanos cuentan con acceso a agua potable en sus viviendas. Asimismo [7], afirma que entre los años 2017 y 2018, el 10,6% los peruanos carecían de agua a través de la red pública, por ende, su abastecimiento de agua fue de otras fuentes como cisternas (1,3%), pozos (1,2%) y el 3,2% de ríos, acequias y manantiales.

Además el 70% de la población del Perú reside en la costa desértica, donde solo hay un 2% de disponibilidad de agua, a diferencia de la selva del país que cuenta con una disponibilidad hídrica de 97,4% y solo el 14,2% de la población reside en ella, reflejando un problema en la distribución del uso del agua [8].

El recurso hídrico es vital y esencial para las actividades del hombre, desde el consumo doméstico, uso en la industria; y la agricultura. Del total de volumen de agua del Perú, el 85,74% es para uso agrícola, el 6,66% es para el uso poblacional, el 6,09% se emplea para el uso industrial, el 1,09% corresponde al uso minero; y finalmente el 0,42% es para el uso pecuario [9].

A su vez, [10], señalan que el uso doméstico del agua se clasifica en consumo (para beber, cocinar), higiene (necesidades básicas de limpieza personal y doméstica) y uso recreativo (riego de plantas, jardines, lavado de autos, etc.). Este estudio también remarca que, en países en desarrollo, el uso doméstico del agua también puede incluir el uso productivo a escala relativamente pequeña, para actividades como la horticultura y abrevado de animales.

En ese contexto, las municipalidades de Lima, Perú, en su mayoría, riegan sus áreas verdes con aguas que pertenecen al sistema de redes de canales de irrigación de la metrópoli. Este sistema, que tiene origen en la cuenca del Río Rímac¹, abarca 66 usuarios que poseen 1057 hectáreas y suministra agua para el 80% de las áreas verdes de la capital [11].



Figura 1: Mapa de la red de canales de irrigación en Lima, Perú

Sin embargo, los canales de abastecimiento de agua para riego son contaminados a consecuencia de los residuos urbanos que son vertidos de forma directa e indirecta, sobre todo si se considera que existen asentamientos humanos que no cuentan con servicios de saneamiento básico, por lo que suelen usar estos canales como desagüe [12].

El Distrito de Magdalena del Mar se abastece de este sistema de canales para regar sus áreas verdes. En este caso específico, la capacidad de captación es de 5 m³/s. Respecto del estado de conservación de estos canales de riego, [13], sostienen que se sitúan entre regular a malo, debido a la falta de mantenimiento, limpieza de malezas e inadecuada operación de su infraestructura, causando que el agua que drena por los canales presenta una turbidez muy alta, superando 1000 NTU.



Figura 2: Canal de regadío de Magdalena del Mar, Lima, Perú

Sobre ese punto, [15], señalan que los cuerpos de agua son influenciados por la naturaleza del terreno por el cual discurren, recogiendo en su trayecto elementos o materiales sueltos producidos por la naturaleza, arrastrando partículas de la corteza terrestre y minerales, las que, en exceso, alteran la calidad del agua por la presencia de material particulado suspendido o disuelto en el agua, generando turbidez.

La turbidez del agua se origina por la presencia de partículas suspendidas. Las partículas con un diámetro inferior a un micrón presentan una velocidad de sedimentación muy baja, lo que requiere de tratamientos específicos para su remoción en tiempos eficientes. En contraste, las partículas mayores a un micrón se sedimentan de manera espontánea. Estas partículas pueden ser de naturaleza inorgánica, como arcillas, fangos y óxidos minerales originados por la erosión del suelo, o de naturaleza orgánica, como bacterias, parásitos, algas, zooplancton, ácidos fúlvicos y coloides húmicos [16].

[17], sostienen que la turbidez es un indicador de la transparencia del agua y es un criterio destacable que determina la calidad del agua, especialmente si es para consumo humano. Además, este parámetro ofrece información adicional sobre la presencia de partículas suspendidas, por ello, es necesaria su evaluación, puesto que presenta una ventaja respecto de la medición convencional de parámetros como la salinidad, la sodicidad y la toxicidad iónica [18] [19].

A su vez, [20], señalan que la turbidez es un buen indicador de la calidad de agua, puesto que este parámetro presenta una correlación significativa con la presencia de coliformes fecales.

El tratamiento primario de agua tiene como objetivo la remoción de materia, ya sea flotante o sedimentable, por procesos físicos o mecánicos, por lo que tiene la capacidad de eliminar aproximadamente el 25% de la carga orgánica, el 40% de la demanda biológica de oxígeno y el 50% de los sólidos suspendidos [21].

1 El Río Rímac presenta alta turbiedad en los meses de lluvia que van desde diciembre a marzo. En este periodo, la turbidez del río fluctúa entre las 50 y 50000 unidades nefelométricas de turbidez (NTU), con un valor promedio de 300 NTU, asimismo, en los meses de abril a noviembre el Río Rímac presenta baja turbiedad que oscila entre 6 a 50 NTU, con un valor promedio de 15 NTU [14].

Las aguas tratadas representan un recurso valioso que pueden reemplazar un volumen importante de agua potable en actividades que no requieren de esta calidad. Así, el tratamiento de agua resulta fundamental en la actualidad para adaptarla a diversos usos específicos. El agua para riego de áreas verdes es un claro ejemplo. Por ello, se requieren tecnologías cada vez más confiables, eficientes y económicas para garantizar el acceso a este recurso [22].

En este contexto, los coagulantes químicos se utilizan a menudo para reducir la turbidez y eliminar la mayoría de las sustancias orgánicas y suspendidas que la causan debido a la desestabilización de los coloides que se encuentran suspendidos en ella. Sin embargo, el uso de los coagulantes químicos, como el sulfato de aluminio, tienen algunos inconvenientes en su aplicación, como el precio de adquisición, disponibilidad; y sobre todo, los efectos negativos en la salud [23].

El uso sulfato de aluminio ha generado inconvenientes en su utilización debido a que mantienen impreciso el pH del agua, generando grandes cantidades de lodos tóxicos y además, puede causar enfermedades neurodegenerativas como el alzheimer [24]. Asimismo, el residuo de aluminio en el agua potable puede ser sumamente perjudicial para la salud, lo que conlleva a consecuencias en el sistema nervioso central, ocasionando el envejecimiento prematuro en las personas [25].

La coagulación es el proceso en el cual las sustancias se agrupan formando pequeñas masas llamadas flóculos. Este proceso tiene como objetivo la remoción de partículas orgánicas e inorgánicas, eliminación de sustancias productoras de sabor y olor, exclusión de bacterias y virus y destrucción de algas y plancton en general [26].

La floculación es un proceso en el cual las partículas se desestabilizan y al estar en contacto con el coagulante logran inducir y combinarse logrando formar agregados de gran tamaño llamados flocs, de este modo se utiliza la velocidad, el tiempo de suspensión y el movimiento para su sedimentación [27].

[28] mencionan que los coagulantes de origen vegetal tienen el potencial de ser una alternativa a las sales de aluminio demostrando una eficacia igual para la remoción de la turbidez, con el fin de reducir los impactos negativos que generan el uso de los coagulantes inorgánicos.

La semilla de papaya (*Carica papaya*) contiene la proteína cisteína proteasa, soluble al agua, que se compone por 212 aminoácidos, caracterizada por una especificidad moderada que afecta tanto a proteínas como a péptidos de gran tamaño [29]. Estas semillas han demostrado eliminar diversiones

contaminantes y ser biodegradables, convirtiéndose en un coagulante en el control de aguas residuales [30][31].

Por su parte, la penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*) es un fruto de la familia cactaceae, que contiene una sustancia de consistencia gelatinosa, denominada mucílago, que debido a sus características y propiedades, al momento que tiene contacto directo con el agua, comienza a hincharse, dándole al mucílago la propiedad de precipitar partículas y iones de soluciones acuosas [32]. Este mucílago es un hidrocoloide natural, que luego de pasar por el proceso de coagulación, floculación y sedimentación permiten la reducción de la turbidez de las aguas contaminadas [33].

Por lo expuesto, el objetivo de este estudio es evaluar la eficacia de *Carica papaya* y de *Opuntia ficus indica*, como coagulantes orgánicos con la finalidad de reducir la turbidez de las aguas de riego, con la finalidad de contribuir a la gestión sostenible a nivel local.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.- Tipo de investigación

La metodología establecida es de tipo aplicada, de enfoque cuantitativo y diseño experimental puro. Esto se debe a la manipulación de una o más variables, que requiere la validez interna de la situación experimental y la medición del efecto de la variable independiente en la variable dependiente, considerando las variables de control necesarias. Sumado a esto, la investigación es de alcance explicativo, puesto que, se pretende evaluar causas que producen u originan un fenómeno determinado [34].

2.2.- Diseño de investigación

El diseño de la investigación es experimental puro debido a que se realizaron 5 tratamientos de concentración de coagulante de *Carica papaya* y *Opuntia ficus indica*, respectivamente, en los niveles de 0.1g, 0.2 g, 0.3 g, 0.4g, 0.5g en 1 litro de agua de riego por tratamiento. Por otro lado, se midieron los parámetros de pH y sólidos totales disueltos, pues son las variables de control en el experimento.

En la Tabla 1 se resumen los factores que se consideraron para lograr un alto porcentaje de extracción de los biocoagulantes y mejorar la eficacia en la eliminación de la turbidez del agua de riego.

Tabla 1: Factores empleados en el experimento puro

Etapa del proceso	Factores	Niveles
Extracción de coagulante derivado de <i>Carica papaya</i>	- Temperatura de secado - Tiempo de secado	105°C 16 horas
Extracción de coagulante derivado de <i>Opuntia ficus indica</i>	- Temperatura de secado - Tiempo de secado	105°C 24 horas
Proceso de coagulación - floculación	- Turbidez inicial - Concentración de coagulante - Velocidad de agitación - Tiempo de agitación - Tiempo de sedimentación	100 - 1000 NTU 0,1 - 0,5 g/L 200 rpm / 8 min 20 rpm / 5 min 60 min

La obtención del coagulante derivado de *Carica papaya*, comienza con la recolección de las semillas y su posterior lavado con agua destilada, seguido del secado en la estufa de horno a una temperatura de 105°C por un tiempo de 24 horas, después de que las semillas estén secas, se pasa a licuar en seco para obtener una textura de polvo, luego se tamiza con una apertura de tamiz nominal de 0,250 donde quedan algunos residuos de la semilla y finalmente es almacenado en temperatura ambiente [35].

Para la obtención del coagulante derivado de *Opuntia ficus indica*, se comienza con el lavado de la penca de tuna con agua destilada con el fin de eliminar las impurezas presentes, luego se retira la capa externa de la penca, que está compuesta por clorénquima [36]. El secado se llevó a cabo en un horno de estufa a una temperatura de 105°C por un tiempo de 16 horas. Para la despigmentación de la penca se agregó etanol como solvente industrial al 95%. Así, para disolver 20 g de *Opuntia ficus indica*, fue necesario 80 ml de etanol (una relación 1:4 del coagulante / solvente). Finalmente, la solución se agitó en un

vórtex a 1.200 rpm durante 5 minutos, para su posterior filtración [24].

Tabla 2: Materiales, insumos y equipos utilizados en cada etapa del experimento

Material de origen vegetal	<i>Carica papaya</i> <i>Opuntia ficus indica</i>
Reactivos	- Alcohol etílico de 95% - Agua destilada
Materiales de laboratorio	- Vaso precipitado Pirex de 1000 mL - Mortero de porcelana - Papel filtro - Embudo de plástico - Guantes quirúrgicos
Equipos	- Turbidity meter AQ 4500 Marca: Thermo Scientific Orion Aquafast) - Equipo electrónico para prueba de jarras Phipps & Bird PB 700TM - Balanza analítica Cimatec S.A. - Medidor de sólidos disueltos Totales, Conductividad y temperatura - Estufa WTC binder Marca: Kossodo S.A. - Licuada Oster

2.3.- Diseño experimental

La prueba de jarras es un procedimiento a escala de laboratorio que tiene como objetivo determinar las condiciones iniciales y concentraciones óptimas de coagulantes, químicos o naturales, controlando el pH, y otros parámetros, en procedimientos de tratamiento de agua tratada [24].

Por su parte, [14], señala que esta técnica simula el proceso de coagulación y floculación. Al producirse la separación de las partículas por decantación, los flóculos formados con diferentes dosis del coagulante arrojan valores de turbidez diferentes. En este estudio, la prueba de jarras se realizó siguiendo el Manual de laboratorio de la American Water Works Association, INC. (OPS/OMS, 1978).

Para el procesamiento de datos, primero se realizó la caracterización inicial del agua de riego considerando los parámetros de pH, turbidez y sólidos totales disueltos, posterior a ello se realizó el ensayo de pruebas de jarras con 5 niveles de concentración y 2 tratamiento por cada coagulante aplicado. Una vez finalizado la prueba de jarras se volvió a evaluar la

caracterización final del agua tratada considerando los mismos parámetros iniciales.

Tabla 3: Niveles de coagulantes en la prueba de jarras

Mezclado	Velocidad de agitación (rpm)	tiempo(min)	Tratamiento	Concentraciones (g/L)
Mezcla rápida	200	8	Coagulación	0,1 0,2 0,3 0,4 0,5
Mezcla lenta	20	5	Floculación	

De esta manera, la prueba de jarras se basó en un diseño complemente al azar (DCA) de un solo factor (porcentaje de remoción de la turbidez del agua de regadío). En el diseño hay igual número de réplicas por tratamiento, con una asignación aleatoria de los tratamientos experimentales descrito por el protocolo Hinkelman y Kempthorne [34].

El modelo es de regresión lineal de un solo factor en función de las concentraciones de coagulante de Carica papaya y Opuntia ficus indica considerando 60 minutos de sedimentación. La unidad experimental es gramos por litro de agua tratada aplicado en la prueba de jarras en donde se realiza la observación, medición e intervención del experimento. El orden de las corridas aleatorias por cada tratamiento se encuentra en la Tabla 4.

Tabla 4: Secuencias de prueba aleatorizada para los experimentos de un factor con 5 niveles y 2 réplicas

Secuencia de la prueba	Orden aleatorio en el caso de la semilla de papaya	Concentración de coagulante de carica papaya	Orden aleatorio en el caso de la penca de tuna	Concentración de coagulante de Opuntia ficus indica
1	6	0,3	1	0,1
2	9	0,5	2	0,1
3	7	0,4	3	0,2
4	10	0,5	7	0,4
5	1	0,1	6	0,3
6	2	0,1	8	0,4
7	4	0,2	5	0,3
8	8	0,4	9	0,5
9	3	0,2	10	0,5

10	5	0,3	4	0,2
----	---	-----	---	-----

Resultados obtenidos del software MINITAB 21.

Para determinar diferencias significativas respecto de las concentraciones óptimas, se utiliza la prueba estadística ANOVA, con un nivel de significación de 5%, potencial de prueba de 0,8, una desviación de estándar de 16.6 y con una estimación máxima de reducir la turbidez de 99%.

Finalmente, para analizar la eficacia de remoción de la turbidez de los coagulantes derivados de Opuntia ficus indica y Carica papaya, se mide de acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de jarras, procesando los datos de la turbidez inicial y turbidez final.

Ecuación 1: Medición de la eficacia en la reducción de la turbidez de las aguas de regadío

$$E_i = \{T_f - T_i\} / T_i \dots (1)$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para evaluar la eficacia de remoción de turbidez de los coagulantes orgánicos, en primer lugar, se realizó un análisis de las características físico – químicas de las aguas de regadío en Magdalena del Mar. Para ello, se utilizó el protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales [12].

El muestreo de agua de riego se realizó al azar considerando la extensión total de canales de regadío en el distrito. En el caso de la evaluación de la eficacia de la semilla de papaya, se tomaron 3 muestras de agua de regadío en 3 horarios distintos (en fecha 15/02/2024) para medir los cambios o variaciones que puedan tener durante el día, puesto que estos valores pueden verse influenciados por actividades antropogénicas, eventos extraordinarios e incluso por la estacionalidad del año en que se muestree.

Tabla 5: Características fisicoquímicas del agua de riego en Magdalena del Mar, Lima, Perú

Muestra	Hora	Turbidez (NTU)	pH	TDS (ppm)	Temperatura (°C)
1	7:00 am	126	8	386	22.2
2	12:40 pm	224	8.2	350	22.4
3	7:00 pm	250	7.8	370	22.3

Nota: El promedio de las muestras es: turbidez 200 NTU, pH 8, sólidos totales disueltos 368 ppm y la temperatura 22.3. En el caso de los resultados derivados de la penca de tuna, estos valores fueron: turbidez 158 NTU, pH 7,8, sólidos totales disueltos 368 ppm; y la temperatura 23.3 (25/02/2024).

Estos parámetros tienen influencia directa en el proceso de coagulación, por ello es necesario analizar antes los parámetros de pH, turbidez, sólidos totales disueltos y temperatura con el fin de optimizar los procesos, asimismo la interrelación entre los parámetros mencionados permite estimar las cantidades de coagulante que se deben de agregar al agua tratada [14].

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la prueba de jarras empleando 5 concentraciones de coagulante de Carica papaya (0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5) en gramos, y utilizando un litro de agua por cada tratamiento.

Tabla 6: Resultados de ambos coagulantes orgánicos

Concentración de coagulante (g/L)	Turbidez Final (NTU) usando semilla de papaya		Turbidez Final (NTU) usando la penca de la tuna	
	Primera repetición	Segunda repetición	Primera repetición	Segunda repetición
0,1	17,3	16,7	8,4	8,04
0,2	6,8	6,6	10,5	9,97
0,3	23,5	24,7	29,7	30,1
0,4	33,7	31,9	34,7	35,07
0,5	48,9	50,2	41,6	42,8

A partir de lo anterior, se presentan los resultados sobre las diferencias estadísticas en la reducción de turbidez en función de las diferentes concentraciones.

Tabla 7: Resultados de la prueba estadística de Tukey

Carica papaya			Opuntia ficus indica		
Concentración de coagulante (g/L)	Eficacia promedio	Grupo	Concentración de coagulante (g/L)	Eficacia promedio	Grupo
0,2	96,65	A	0,1	94,80	A
0,1	91,50	B	0,2	93,52	B
0,3	87,95	C	0,3	81,08	C
0,4	83,60	D	0,4	77,92	D
0,5	75,22	E	0,5	73,36	E

Nota: Los promedios de eficacia que no comparten una letra son estadísticamente diferentes. Resultados obtenidos del software MINITAB 21.

De acuerdo a los resultados presentados, [37], sostienen que los coagulantes orgánicos han demostrado ser efectivos para eliminar la turbidez y color de las aguas residuales por medio de los procesos de coagulación y floculación, baja producción de lodos y una alta capacidad biodegradable, Por lo tanto, son opciones muy efectivas para el tratamiento de aguas residuales. Asimismo [38], sostiene que estos coagulantes evitan la toxicidad y ofrecen una solución efectiva para el tratamiento del agua.

Si bien en la normativa peruana no existe un estándar de calidad de agua para riego sobre la turbidez, al comparar estos resultados con los lineamientos de la EPA para la reutilización de aguas residuales para la agricultura, la turbidez debe ser inferior a 30 UNT, se nota claramente que los coagulantes orgánicos derivados de Carica papaya y Opuntia ficus indica lograron reducir la turbidez hasta 6.6 y 8.23 NTU, respectivamente.

Respecto del coagulante derivado de Opuntia ficus indica [34], obtuvieron que su eficacia es significativa en la eliminación de turbidez (con un nivel de turbidez inicial de 150 UNT) y color, logrando más de 80 % de remoción con una dosis óptima de 50 mg/L. Por su parte [39], eliminaron el 98% de la turbidez, con a un pH inicial de 7, usando 1,5 g/L de concentración del mismo coagulante orgánico. Asimismo, [40], obtuvo un 94% de eficacia en la remoción de los sólidos suspendidos totales y turbidez en las aguas residuales de la Avícola La Chacra, en Huancayo, Perú, como resultado la dosis de coagulante de 50 mg/L.

Comparando los resultados de este estudio con los de [41], para el caso de la penca de tuna, puesto que emplearon la prueba de jarras, para demostrar la reducción de la turbidez y la actividad de floculación y la resistencia al cizallamiento de los flóculos resultantes. Estos autores aplicaron 2 velocidades de agitación, el primero, el mezclado rápido, con una velocidad de 100 rpm durante un minuto, seguido del mezclado lento con una velocidad de 20 rpm por un tiempo de 15 minutos. En ese caso, la turbidez inicial fue de 139 NTU y luego del proceso de jarras logró disminuir a 75.06 NTU. En ese caso, utilizaron una concentración de 200 mg/L (eficacia de 54%).

Si bien las velocidades aplicadas en el diseño del estudio de estos autores son diferentes al de este estudio, ambas velocidades están recomendadas en el Manual de laboratorio de

la American Water Works Association, INC. (OPS/OMS, 1978). Además, es importante enfatizar en el nivel de turbidez inicial, puesto que, si la turbidez es alta, la cantidad empleada de coagulante es menor debido a que las colisiones de las partículas son más altas [24].

También [36], muestran la eficacia de *Opuntia Ficus indica* al aplicar este cogaulante sobre aguas de estanque de relaves, con el fin de eliminar la turbidez y el carbono orgánico disuelto. Se empleó una dosis de 900 mg/L, lográndose eliminar el 98% de la turbidez y el arsénico de las aguas residuales del estanque, en comparación con los 190 mg/L del alumbre y el cloruro férrico (104 mg/L).

Finalmente, en el caso de la semilla de papaya, [42], determinó la concentración óptima del coagulante de semilla de papaya en 0,2 g/L mediante un tratamiento de prueba de jarras. De esta manera logró reducir el 80% de la turbidez del agua. En la misma línea, [43], hallaron la dosis óptima de este mismo coagulante en 0,5 g/L reduciendo la turbidez de 170 NTU a 0 NTU, es decir, obteniendo un 100% de eficacia.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados de la eficacia de los coagulantes orgánicos evaluados sobre la remoción de la turbidez del agua de riego sugieren que los gobiernos locales de áreas urbanas pueden mejorar la gestión de este recurso escaso. Esto cobra más relevancia si se considera que Lima, capital del Perú, se emplazada en un desierto costero ya con evidencia de problemas concretos respecto de la gestión del agua.

De acuerdo a ello, el aporte de esta investigación subyace en el potencial beneficio ambiental y de salud derivado de mejorar la calidad del agua de riego, con alternativas sostenibles, sobre todo en un entorno de uso urbano.

No obstante, aunque se ha contribuido a evidenciar estos beneficios por el usos potencial de los coagulantes orgánicos, se recomienda ampliar la investigación sobre la viabilidad económica de este tipo de productos para evaluar su sustitución por parte de los gobiernos locales y usuarios potenciales en entornos urbanos.

REFERENCIAS

- [1] Intriago Guzmán, C. E. (2024). Generación de un filtro basado en nanopartículas de óxido de hierro (magnetita) para la remoción de mercurio en aguas contaminadas.
- [2] Chavez Alberto, A. M., & Avila Galindo, K. S. (2024). Calidad de agua del río Cunas generados por vertimientos de aguas residuales urbanas en el distrito de Chupaca-2022.
- [3] Arcila, H. R., & Peralta, J. J. (2015). Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua. Revista Facultad de Ciencias Básicas, 11(2), 136-153.
- [4] Jiménez, D., Orrego, S., Vásquez, F., & Ponce, R. (2017). Estimación de la demanda de agua para uso residencial urbano usando un modelo discreto-continuo y datos desagregados a nivel de hogar: el caso de la ciudad de Manizales, Colombia. Lecturas de Economía, (86), 153- 178.
- [5] McDonald, R. I., Weber, K., Padowski, J., Flörke, M., Schneider, C., Green, P. A., ... & Montgomery, M. (2014). Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure. Global environmental change, 27, 96-105.
- [6] Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (2020). Informe técnico: “Perú: Formas de Acceso al Agua y Saneamiento Básico”.
- [7] Gastañaga, M. D. C. (2018). Agua, saneamiento y salud. Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica, 35, 181-182.
- [8] Burstein-Roda T. (2018). Reflexiones sobre la gestión de los recursos hídricos y la salud pública en el Perú. Rev Peru Med Exp Salud Publica. 35(2):297-303.
- [9] CEPLAN (2023). Análisis geoespacial del estrés hídrico y el manejo de cuencas a nivel nacional
- [10] Markantonis, V., Dondeynaz, C., Latinopoulos, D., Bithas, K., Trichakis, I., M'Po, Y. N. T., & Carmona Moreno, C. (2018). Values and Preferences for Domestic Water Use: A Study from the Transboundary River Basin of Mékrou (West Africa). Water, 10(9), 1232.
- [11] Bermúdez, Y. D. C. G., López, A., & Potella, G. (2020). Eficiencia de opuntia ficus indica (cruda y desecada) como coagulante para la clarificación de aguas. Revista de Ingeniería Invención, 2(2), 11-22.
- [12] Autoridad Nacional del Agua (ANA) (2016). Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales
- [13] Ministerio de Agricultura y Riego (MINAG) (2014). Mantenimiento de infraestructura de Sistemas de Riego.
- [14] Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua: coagulación y floculación. Documento técnico. Planta de Tratamiento de Agua Sedapal, Lima, 2021.
- [15] Benjumea-Hoyos, C. A. (2019). Evaluación de la eficiencia de extractos naturales en el proceso de coagulación floculación de aguas crudas, con fines de potabilización.
- [16] Cohaila, M. A. C. (2023). Revisión sobre clarificación del agua y el uso de semillas de moringa, Moringa oleífera Lam. Revista de la Sociedad Científica del Paraguay, 28(1), 169-189.
- [17] Escalona – Domenech, R. Y., Villarreal-Fuentes, J. M., Mata, D. M. I., & de Jesús Barrios-Calderón, R. (2025). Calidad del agua para uso agrícola y consumo humano en el río Huixtla, Chiapas, México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 41, 105-122.
- [18] Christian Xavier Meregildo Collave, Robert Jefferson Lázaro Bacilio, Adolfo Enrique Guerrero Escobedo, Ronald Fernando Rodríguez Espinoza, Yrwin Francisco Azabache Liza, Juan Manuel Ipanaque Roña (2024). Turbidity and color removal from irrigation water, with coagulants and activated carbon, controlled by an Arduino system, Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, Volume 10, 100978.
- [19] Mita E. Sengupta, Bernard Keraita, Annette Olsen, Osei K. Boateng, Stig M. Thamsborg, Guðný R. Pálsdóttir, Anders Dalsgaard (2012). Use of Moringa oleífera seed extracts to reduce helminth egg numbers and turbidity in irrigation water, Water Research, Volume 46, Issue 11, pages 3646-3656.
- [20] Amado – Alvarez, J., Pérez – Cutillas, P., Alatorre – Cejudo, L. C., Ramírez – Valle, O., Segovia Ortega, E. F., & Alarcón – Cabañero, J. J. (2019). Análisis multiespectral para la estimación de la turbidez como indicador de la calidad del agua en embalses del estado de Chihuahua, México. Revista geográfica de América central, (62), 33-61.
- [21] Rojas, R. (2002). Gestión integral de tratamiento de aguas residuales. Sistemas de tratamiento de aguas residuales, 9- 16.
- [22] Herrera-López, D., Mejía-González, G., Cuevas- González, R., Arévalo-Velázquez, M. A., & Guillén- Navarro, G. K. (2021). Sistema acoplado reactor anaerobio con deflectores-humedal artificial como alternativa para reúso de agua residual en riego de áreas verdes. Revista internacional de contaminación ambiental, 37.
- [23] Galarza Tituana, J. M., & Suárez Moncada, M. A. (2023). Evaluación de la eficiencia de los coagulantes orgánicos con respecto a los coagulantes inorgánicos utilizados en el tratamiento primario de un agua residual. ESPOL. FCNM.
- [24] Murillo, S., Galvis, G., & Pacheco, S. (2020). Manual técnico para la elaboración de Coagulantes/Floculantes a partir de productos naturales. SENA Sistema de Bibliotecas, 48-51.
- [25] Casas, S., & Ninoska, M. (2017). Extracción del mucílago de la penca de

- tuna y su aplicación en el proceso de coagulación-floculación de aguas turbias.
- [26] Lorenzo-Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 40(2), 10-17.
- [27] Lisintuña, W. F., Cerda, E. F., & García, M. A. (2020). Tratamiento de aguas residuales de una industria láctea con mucilago de nopal (*Opuntia ficus-indica* [L.] Mill.): Wastewater treatment of a milk industry with nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica* [L.] Mill.). *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 30(2), 52-57.
- [28] Dollah, Z., Masbol, N. H., Musir, A. A., Karim, N. A., Hasan, D., & Tammy, N. J. (2021, November). Utilization of citrus microcarpa peels and papaya seeds as a natural coagulant for turbidity removal. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 920, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.
- [29] Unnisa, S. A., & Bi, S. Z. (2018). Carica papaya seeds effectiveness as coagulant and solar disinfection in removal of turbidity and coliforms. *Applied Water Science*, 8, 1-8.
- [30] Meza, C. L., Sun Kou, R., & Castro Arroyo, T. (2020). Biosorción del colorante azul de metileno usando los cladodios de la tuna (*Opuntia ficus indica*). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 86(3), 231-245.
- [31] Amran, A. H., Zaidi, N. S., Syafiuddin, A., Zhan, L. Z., Bahrodin, M. B., Mehmood, M. A., & Boopathy, R. (2021). Potential of Carica papaya seed-derived bio-coagulant to remove turbidity from polluted water assessed through experimental and modeling-based study. *Applied Sciences*, 11(12), 5715.
- [32] Pascoe-Ortiz, S., Rodríguez-Macías, R., Robledo-Ortiz, J. R., Salcedo-Pérez, E., Zamora-Natera, J. F., Rabelero- Velasco, M., & Vargas-Radillo, J. J. (2019). Identificación de propiedades presentes en jugo de *Opuntia megacantha* Salm-Dyck importantes para la producción de biopolímeros. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 22.
- [33] Mnif, W., & Ben Rebah, F. (2023). Biofloculants as alternative to synthetic polymers to Enhance wastewater sludge dewaterability: a review. *Energies*, 16(8), 3392.
- [34] Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2020). Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta.
- [35] Manrique Quispe, J. A., & Llanto Pachas, D. A. (2020). Semillas de Carica papaya L. como coagulante para el tratamiento de lixiviados orgánicos, planta de valorización de residuos sólidos orgánicos, Oyón 2020.
- [36] Wan, J., Chakraborty, T., Xu, C. C., & Ray, M. B. (2019). Treatment train for tailings pond water using *Opuntia ficus-indica* as coagulant. *Separation and Purification Technology*, 211, 448-455.
- [37] Caldera, Y., Laguna, K., Millán, E., González, Y., & Gutiérrez, E. (2019). *Opuntia ficus indica*: un coagulante alternativo para el tratamiento de aguas con alta turbidez y pH ácido. *Impacto Científico*, 14(1), 127-137.
- [38] Mrad Gacía, I. (2019). Evaluación de la actividad coagulante de la semilla Carica papaya en muestras de agua colectadas en la cuenca alta del río Bogotá.
- [39] Choudhary, M., Ray, M. B., & 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*, 209, 714-724.
- [40] Gabino, R. (2018). *Opuntia ficus-indica* como coagulante para remoción de sólidos suspendidos totales del efluente de beneficio en avícola La Chacra.
- [41] Eichhorn, C., Weckmüller, S., & Urban, W. (2022). Natural Flocculant from a Combination of Moringa Oleifera Seeds and Cactus Cladodes (*Opuntia Ficus-Indica*) to Optimize Flocculation Properties. *Water*, 14(21), 3570.
- [42] Diaz Aliaga, J. K. (2019). Aplicación de la Enzima Papaina Obtenida a Partir de las Semillas CARICA Papaya como Coagulante Natural para la Remoción de Turbidez en la PTAR-VES.
- [43] Gómez, J., & Medina, B. (2021). Determinación De La Capacidad Coagulante De Las Semillas De Papaya (Carica Papaya) Para La Remoción De Turbidez En El Tratamiento De Aguas Superficiales [Universidad de Guayaquil].