

Artículo Original

## *Aloe Vera* (L.) como floculante para remoción de turbidez de aguas superficiales

### *Aloe Vera* (L.) as a flocculant to remove turbidity from surface water

<https://doi.org/10.52808/bmsa.7e6.623.019>

Elvira Luvieska Ruiz Ortega <sup>1,\*</sup>

<https://orcid.org/0000-0002-0986-5866>

Luis Eduardo Oré Cierzo <sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0003-2836-2436>

Miluska Rosario Vega-Guevara <sup>2</sup>

<https://orcid.org/0000-0002-0268-3250>

Adolfo Angulo-Romero <sup>3</sup>

<https://orcid.org/0000-0003-2128-843X>

Carmen Milagros Ruiz-Huaman <sup>4</sup>

<https://orcid.org/0000-0003-4844-2281>

Gianmarco Garcia Curo <sup>5</sup>

<https://orcid.org/0000-0001-6685-3207>

Jorge Rafael Diaz Dumont <sup>6</sup>

<https://orcid.org/0000-0003-0921-338X>

Recibido: 12/03/2022

Aceptado: 08/06/2022

### RESUMEN

El acceso al agua potable por red pública es un problema de la población rural en el departamento de Huánuco, por ende, se suele realizar el consumo de este recurso sin previo tratamiento, produciéndose así enfermedades estomacales. El uso de agentes naturales como el *Aloe vera* (L.) (Sábila) viene a ser una alternativa como floculante para el tratamiento convencional del agua, por tal motivo, en esta investigación se visualizaron experimentalmente las características y reacciones del gel de *A. vera* como floculante en la remoción de la turbidez. La turbidez del agua se simuló con el caolín, y se determinó la concentración óptima de alúmina y sábila (1%) a valores diferentes de pH y turbidez iniciales, con los datos resultantes se optimizó las dosis mediante el modelo matemático de superficie de respuesta, para después realizar su respectiva validación mediante métodos gráficos e índices matemáticos; los resultados reflejaron que la turbidez inicial, pH inicial y la dosis del coagulante influyen significativamente en la remoción de la turbidez de agua, de forma individual, concluyendo según el modelo de superficie de respuesta que el volumen óptimo de sábila al 1% alcanza su mayor eficiencia a 0,1 mL y 0,4 mL por cada 500 mL, dosis que varía de acuerdo a su pH y turbidez inicial, este modelo matemático se ajusta para aguas superficiales de la ciudad de Tingo María.

**Palabras claves:** *Aloe vera* (L.), sulfato de aluminio, pH, caolín.

### ABSTRACT

Access to drinking water through the public network is a problem for the rural population in the department of Huánuco, therefore, this resource is usually consumed without prior treatment, thus producing stomach illnesses. The use of natural agents such as *Aloe vera* (L.) becomes an alternative as a flocculant for conventional water treatment, for this reason, in this investigation the characteristics and reactions of the *A. vera* gel were visualized experimentally as a flocculant in the removal of turbidity. The turbidity of the water was simulated with kaolin, and the optimum concentration of alumina and aloe vera (1%) was determined at different values of initial pH and turbidity. With the resulting data, the doses were optimized using the mathematical model of the response surface. to later carry out their respective validation through graphic methods and mathematical indices; The results showed that the initial turbidity, initial pH and the dose of the coagulant significantly influence the removal of the turbidity of the water, individually, concluding according to the response surface model that the optimal volume of aloe at 1% reaches its highest level. efficiency at 0.1 mL and 0.4 mL per 500 mL, a dose that varies according to its pH and initial turbidity, this mathematical model is adjusted for surface waters of the city of Tingo María.

**Keywords:** *Aloe vera* (L.), aluminum sulfate, pH, kaolin.

<sup>1</sup> Universidad Nacional Agraria de la Selva

<sup>2</sup> Universidad Marcelino Champagnat

<sup>3</sup> Universidad Nacional Intercultural de la Amazonia

<sup>4</sup> Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur

<sup>5</sup> Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo

<sup>6</sup> Universidad César Vallejo

\*Autor de Correspondencia: [jorge.diazdu@ciplima.org.pe](mailto:jorge.diazdu@ciplima.org.pe)

### Introducción

En el Perú, el 24,7% de la población en la zona rural no cuenta con acceso a agua por red pública, abasteciéndose en su mayoría de fuentes como el río, acequia, manantial u otros. Uno de los departamentos con menor cobertura de agua proveniente de red pública es Huánuco, con un 76,1%, además presenta la menor cobertura de agua potable por red

pública, por debajo del 30% (INEI, 2019). La población sin acceso al agua potable muchas veces realiza el consumo de este recurso sin previo tratamiento, produciendo así en ellos enfermedades como: disentería amébrica, la shigelosis, el cólera, las diarreas del tipo *E. coli*, virales, o de etiología no específica, el virus A de la hepatitis y la fiebre tifoidea (Eugene, 1988; Rodríguez *et al.*, 2016). Marcó *et al.*, (2004) afirman que la turbidez es un indicador cualitativo indirecto de riesgo de contaminación microbiológica en aguas superficiales, ya que la turbidez refleja la cantidad de coliformes totales existente en ellas.

El uso de floculantes naturales viene siendo investigado en estos últimos años debido a su capacidad de remover la turbidez, no alterar el pH del agua, y sobre todo su inocuidad en la salud de las personas, adicional a ello se tiene como conocimiento que el tratamiento convencional del aguas superficiales incluye a la coagulación/floculación y sedimentación, el cual puede ser reemplazado por agentes naturales tal y como lo investigó Hurtado, (2019) donde hizo uso del poder floculante del *Aloe vera* (L.).

En la actualidad se carece de un modelo matemático para estimar la dosis adecuada del *A. vera* en la remoción de turbidez del agua. Según Apostol *et al.*, (2011) un método muy usado viene a ser el método de superficie de respuesta, el cual permite determinar condiciones óptimas para remover sólidos suspendidos, parámetro que está directamente relacionado con la turbidez. A partir de un modelo matemático se podrá conocer las dosis óptimas del *A. vera* para la remoción de la turbidez del agua, disminuyendo así en riesgo en la salud, no solo por lo el tratamiento usado, sino también porque se reducirá la cantidad del uso de químicos como la alúmina, resultado que será provechoso para poblaciones de zonas rurales que carecen de agua potable, y suelen abastecerse de aguas superficiales sin previo tratamiento.

Diestra & Ramos, (2019) determinaron el efecto de la concentración del gel de *A. vera* y el tiempo de floculación en la remoción de sólidos suspendidos (SST) y materia biodegradable (DBO<sub>5</sub>) de un agua residual, mediante el test de jarras a una velocidad de agitación rápida de 200 rpm y lenta de 30 rpm. Para la extracción del gel de *A. vera*, primero el investigador separó el gel de la corteza, para posteriormente secarlo, molerlo y tamizarlo, los cuales fueron preparadas a concentración de 1000ppm y 2000ppm, en donde se concluyó que la mayor remoción de turbidez fue a 3000ppm con un tiempo de floculación de 25 minutos, logrando remover hasta 88,49%, adicional a ello la remoción de la DBO<sub>5</sub> efectiva fue a la concentración ya mencionada con una remoción de 73,46%. Otro de los autores que consideraron el ensayo de jarras a distintas velocidades fueron Fúquene & Yate, (2018) en su ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales, en donde se menciona que lo primero que se realiza es la revisión del rango óptimo de pH de acuerdo al coagulante con el que se trabajará, estos investigadores consideraron dos velocidades: una mezcla rápida ( $\pm 100$  rpm) y una mezcla lenta a ( $\pm 60$  rpm), ambos a diferentes tiempos, la mezcla rápida a corta duración de un minuto aproximadamente, mientras que la mezcla lenta a 15 min aproximadamente.

Razuri (2017) en una de sus investigaciones determinó si los tratamientos de (*A. vera* (L.), *Opuntia ficus-indica* y *A. Vera* (L.)+ *O. ficus-indica*) disminuyen el contenido de DBO<sub>5</sub> y la DQO en las aguas de un canal de regadío ubicado San Martín de Porres; el investigador realizó la simulación mediante el test de jarras donde se mantuvo el pH de 6 a 7, temperatura ambiente y con velocidad de agitación rápida (100 rpm por 1 min) y lenta (30 rpm a 20 min), en el cual manipuló las plantas ya mencionadas, para así determinar la disminución del DBO<sub>5</sub> y DQO. La metodología consistió en obtener las plantas ya en polvo, primero removiendo la cutícula de estas para que fueran pasadas por una etapa de liofilización (proceso de deshidratación) y seguidamente fueron conservadas en un desecador. Las dosis del *A. vera* L. y *O. ficus-indica* fueron de 600, 700 y 800mg/L en donde se obtuvo que a mayor dosis mayor remoción de DBO<sub>5</sub>, DQO y de turbiedad siendo el más eficiente el tratamiento de *A. Vera* (L.) + *O. ficus-indica*.

Por lo que la investigación tiene por objetivo modelar a partir de superficie de respuesta en la optimización de la remoción de turbidez del agua a nivel de laboratorio de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

## Materiales y métodos

### Bases metodológicas

**Ubicación política y geográfica:** El presente trabajo de investigación se realizó en la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), específicamente en las instalaciones de la Facultad de Recursos Naturales Renovables, que se encuentra ubicado en las coordenadas UTM: 390256 Este y 8970849 Norte a una altitud de 662 m.s.n.m en la ciudad de Tingo María.

**Equipos, materiales e insumos:** Los equipos a utilizados fueron: GPS, balanza analítica, test de jarras, turbidímetro, pH-metro, una cámara fotográfica y una computadora. Para las actividades de laboratorio se utilizó los siguientes materiales: recipiente de plástico, envase de vidrio para depositar el mucílago de la sábila, pipetas, vasos precipitados, varillas de vidrio, tamiz microhamer de 250 "µm" para tamizar el caolín y la arcilla, dos probetas de 1000 mL, balón de fondo plano, una piceta y un cronómetro. *Aloe vera* (L.) Brum.f. (Sábila), sulfato de aluminio, hidróxido de sodio, ácido sulfúrico, caolín (arcilla comercial), arcilla roja, agua tratada, muestras de aguas superficiales.

**Nivel de investigación:** La presente investigación tiene un nivel explicativo, ya que se utilizó la recolección de datos de las variables en estudio, para probar una hipótesis con base en la medición numérica (Hernández *et al.*, 2014).

**Tipo de investigación:** El tipo de investigación es aplicativo, Hernández *et al.*, (2014) afirma que en este tipo de estudio busca la aplicación de los conocimientos adquiridos a la vez que se adquieren otros.

**Diseño de investigación:** Considerando la manipulación de las variables independientes, el diseño es experimental (Hernández *et al.*, 2014), en donde se empleó 225 tratamientos con 3 repeticiones cada uno, se usó 3 turbideces iniciales, 3 pH iniciales, 5 dosis de sulfato de aluminio y 5 dosis de *A. vera*.

### Desarrollo de la investigación

**Acondicionamiento de un agua caolínica para simular la turbidez, con diferentes valores iniciales de pH:** Se realizó la preparación de un agua caolínica simulando una turbidez natural del agua, tal y como lo realizaron Soto-Conde, (2016) y Kumar *et al.*, (2015). Para simular un agua turbia a base de caolín, se tomó en cuenta valores de turbidez de aguas superficiales revisados en estudios anteriores, los cuales suelen variar de 4.77 NTU a 550 NTU (Custodio, 2016; Moreno, 2016), por lo que en la presente investigación se trabajó con tres valores iniciales de turbidez que fueron: 10, 50 y 200 NTU, tomando en cuenta que 201 NTU es el máximo valor de medición del turbidímetro usado.

**Determinación de la dosis de caolín para valores diferentes de turbidez:** Para determinar la concentración adecuada de caolín para los valores de turbidez mencionados anteriormente, se realizó una curva patrón que nos reflejó la relación entre la concentración de caolín y la turbidez, en primera instancia se preparó una solución madre de 2g en 1000 mL, los rangos de dosis fueron de 0 a 20ppm y de 100 a 200 ppm, para realizarlo se usó la fórmula de la disolución (Formula 1), como el usado por Chiliquina (2017), para medir la turbidez se hizo uso del turbidímetro.

$$C_1 V_1 = C_2 V_2 \quad (1)$$

Donde, C1 es la concentración inicial de solución, V1 el volumen inicial de la solución, C2 la concentración final de solución y V2 el volumen final de la solución.

**Ajuste del pH inicial:** Con respecto al pH inicial, se trabajó con valores de: 6, 7,5 y 9 con una inclinación hacia valores básicos, debido a que mayormente las aguas superficiales tienden a reflejar dichos valores; la modificación se realizó con la adición del hidróxido de sodio y ácido sulfúrico. Cada valor de turbidez inicial obtuvo los valores de pH mencionados.

**Determinación de la concentración de alúmina, mediante el test de jarras:** Para determinar las concentraciones de alúmina a utilizar, se tomó en cuenta las dosis reportadas por Herrera, (2015) y lo establecido por el estándar de calidad ambiental del Perú (250 ppm de sulfatos para aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable), siendo las dosis utilizadas de: 20, 30, 40, 50 y 60 ppm.

**Solución madre:** Primero se preparó la solución madre de 2000 mg/L, y haciendo uso de la fórmula de disolución (Fórmula 1) se llegó a las concentraciones propuestas.

**Test de jarras:** El test de jarras se realizó a las mismas velocidades que la investigación realizada por Fúquene & Yate, (2018): a 100 rpm (velocidad rápida) por un tiempo aproximado de 1 minuto y a 60 rpm (velocidad lenta) por aproximadamente 15 minutos, realizándose este procedimiento para cada valor de pH y turbidez propuestos anteriormente.

**Determinación de la concentración óptima del *A. vera* (L.) Brum. f. para disminuir la turbidez del agua, mediante el test de jarras:** En primera instancia se realizó el proceso de extracción del mucílago de la sábila (floculante), siguiendo el procedimiento empleado por Mandar & Mitesh, (2009). Las plantas de *A. vera* pasaron por un proceso de selección donde, las hojas en mal estado o infectadas fueron descartadas, al igual que las hojas inmaduras o con poca cantidad de gel mucilaginoso.

**Proceso de desinfección:** El proceso de desinfección se realizó una vez desespinado las hojas del *A. vera*, se desinfectó con agua y 0,5% de cloro, tal y como lo realizó (Muñoz *et al.*, 2015), por un tiempo de 3 minutos, para que posteriormente sea macerada en agua por 48 horas (Tucanes, 2019).

**Extracción del gel del *A. vera*:** Se realizó la extracción de forma manual, removiendo la corteza de la sábila, con cortes en el haz y envés de la hoja, para obtener así el mucílago. La pulpa fue macerada con agua por 24 horas, para seguidamente filtrarlo como lo realizó Tucanes, (2019).

**Aplicación del *A. vera*:** El *A. vera* se diluyó al 1% para después realizarse la aplicación directa del mucílago en las diferentes concentraciones de turbidez con valores de pH y dosis de alúmina iniciales, las cantidades de gel agregadas fueron: 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 y 0,5mL.

**Elaboración de un modelo matemático de superficie de respuesta para determinar la dosis óptima de *Aloe vera* (L.) Brum. f. como floculante, en la remoción de la turbidez del agua:** Se optimizó la respuesta del proceso de floculación del gel de *A. vera* lo cual estuvo influenciada por la cantidad del mucílago aplicada en un agua turbia y la

concentración de sulfato de aluminio, se utilizó un modelo de segundo orden debido a que nos encontrábamos cerca al óptimo local. El diseño experimental aplicado se representa en la tabla 1.

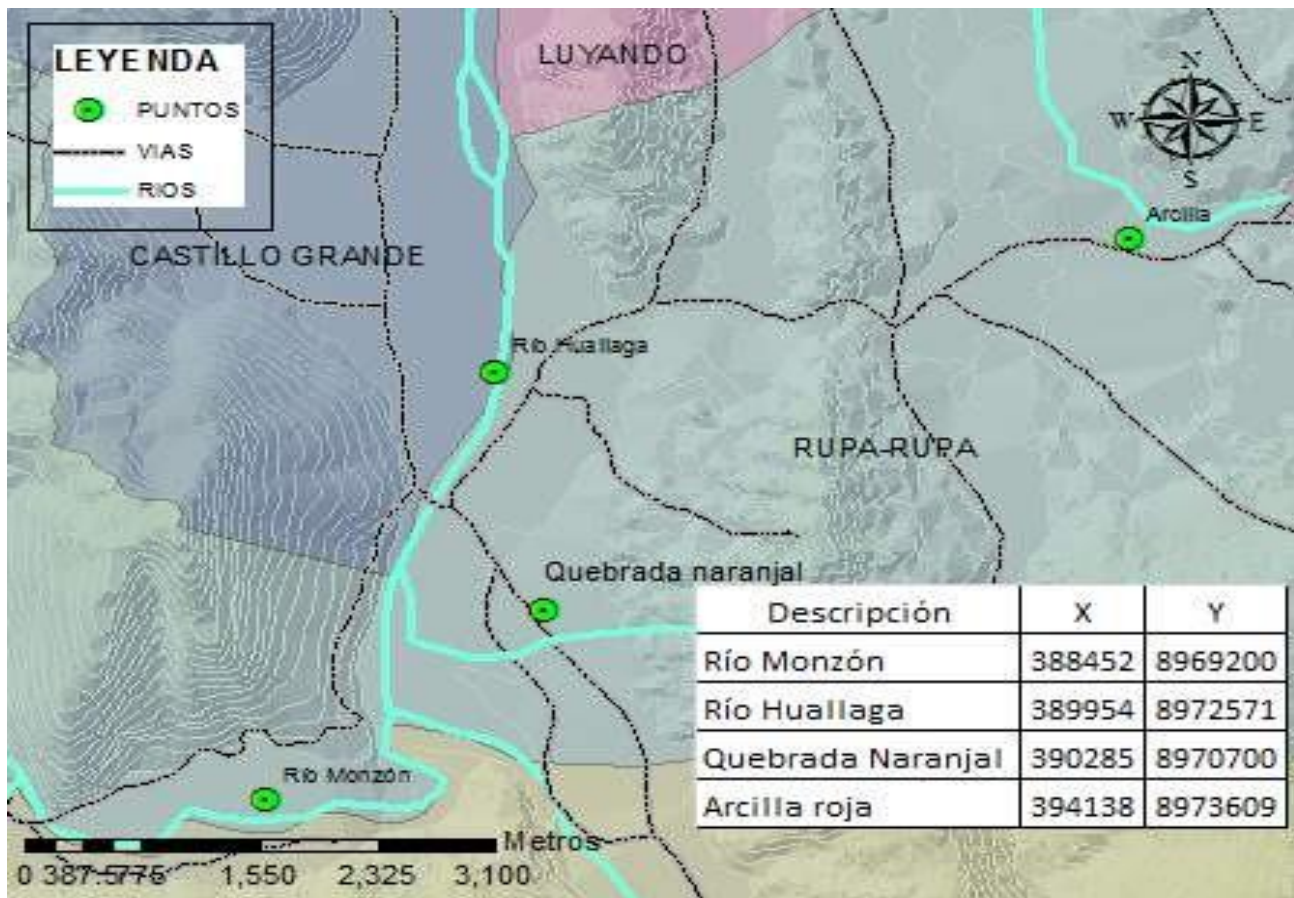
**Tabla 1. Esquema del diseño experimental para la elaboración del modelo matemático de superficie de respuesta**

Turbidez inicial (NTU)	pH	Sulfato de aluminio (ppm)	<i>Aloe vera</i> (L.)	
10, 50 y 200	6	20	0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5mL	
		30	0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5mL	
		40	0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5mL	
		50	0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5mL	
		60	0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5mL	
		7,5	20	0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5mL
		30	0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5mL	
		40	0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5mL	
		50	0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5mL	
		60	0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5mL	
		9	20	0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5mL
			30	0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5mL
		40	0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5mL	
		50	0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5mL	
		60	0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5mL	

### Validación del modelo matemático de superficie de respuesta

Después de visualizar experimentalmente las características y reacciones de la sábila como floculante en la remoción de la turbidez, y haberlo modelado matemáticamente mediante la superficie de respuesta, se procedió a la validación para comprobar que el modelo estimado es correcto, lo que permitirá su aplicación práctica.

Se realizó una validación interna y externa, primero se usó las dosis óptimas según el método de superficie de respuesta, a diferente turbidez y pH inicial, realizándose esta validación mediante un representación gráfica y mediante índices de sesgo y exactitud, después se usó datos que no se han usado para la elaboración del modelo, tomando muestras de fuentes superficiales de la zona (Figura 1), asimismo se realizó la validación haciendo uso de un agua con arcilla roja de la zona, esta validación se realizó mediante índices matemáticos tal y como lo realizó Rodríguez, (2003).



**Figura 1. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo para la validación del modelo matemático**

## Representación gráfica

Se realizó una representación gráfica de los valores observados experimentalmente y los estimados por el modelo, los cuales fueron representados en transformaciones de raíz cuadrada.

## Representación estadística

**Prueba de rangos con signos de Wilcoxon:** Se realizó la prueba de Wilcoxon para datos relacionados generalmente usados para muestras de datos menores a 30, verificando si las variables son significativas ( $p < 0,05$ ) o no son significativas ( $p \geq 0,05$ ), lo cual indica la concordancia entre los valores experimentales y los previstos en el modelo, considerando que el valor crítico de Z se encuentra entre -1,96 y 1,96 a una significancia del 5%, valores que se encuentran fuera de este rango son consideradas como significativas, tal y como lo afirma Álvarez, (1994).

**Raíz del error cuadrático medio:** Se determinó la remoción de la turbidez con diferentes concentraciones del floculante, empleándose la raíz del error cuadrático (RMSE) para evaluar la bondad de ajuste del modelo de superficie de respuesta, donde valores menores a 0,05 indicarán un buen ajuste del modelo, cuanto menor sea el valor mayor cercanía a los datos reales, tal y como lo indica Serrano, (2013). Para realizar la comparación matemática se enfrentaron los valores observados, con las estimaciones por el modelo de superficie de respuesta.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (U_{predictiva} - U_{observada})^2}{\text{Número de datos}}} \quad (2)$$

**Índices de sesgo y exactitud:** Se hizo uso de los índices de sesgo y exactitud, el índice de Bias o factor sesgo indica la idoneidad de un modelo matemático, siendo los valores cercanos a la unidad los que representan una fiabilidad del modelo matemático (Ecuación 3).

$$Bf = 10 \frac{(\sum \log(\frac{\mu_{predictivo}}{\mu_{observado}})) / n}{\mu_{observado}} \quad (3)$$

Mientras tanto el índice de exactitud representa el promedio de la distancia entre cada punto y la línea de equivalencia, como una medida de la proximidad del promedio entre las predicciones y las observaciones (Rodríguez, 2003) (Ecuación 4).

$$Af = 10 \frac{\sum |\log(\frac{\mu_{predictivo}}{\mu_{observado}})| / n}{\mu_{observado}} \quad (4)$$

## Análisis estadístico

**Prueba de Kolmogorov-Smirnov:** Se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov para determinar la normalidad de los datos obtenidos, donde valores superiores o iguales a 0,05 hacen referencia a datos con una distribución normal.

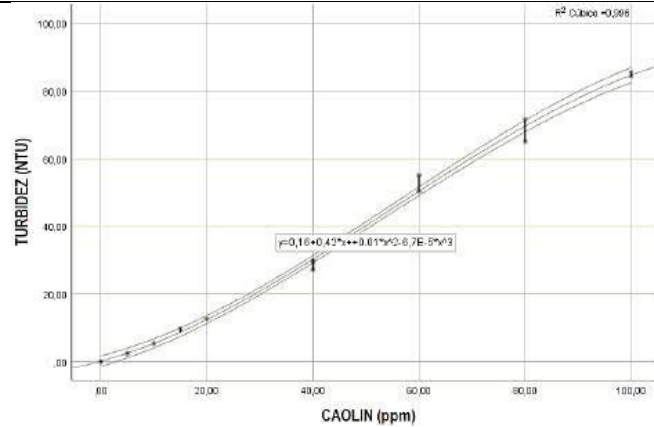
**Prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis:** Se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis el cual es una alternativa no paramétrica para el análisis de varianza, reflejándose en ellos si las variables de turbidez inicial, pH inicial, dosis de sulfato de aluminio y dosis de *A. vera* son significativas ( $p \geq 0,05$ ) o no significativas ( $p < 0,05$ ), con respecto a la eficiencia en la remoción de la turbidez, asimismo se utilizó el método matemático de superficie de respuesta, para conocer los valores óptimo del *A. vera* en la remoción de la turbidez.

**Prueba no paramétrica de Wilcoxon:** Para la validación del modelo matemático se utilizó la prueba de la prueba de rangos con signos de Wilcoxon, el cual es una prueba no paramétrica que reemplaza al t-student para datos relacionados.

## Resultados y discusión

### Acondicionamiento de un agua caolínica para simular la turbidez, con diferentes valores iniciales de pH

**Determinación de la dosis de caolín para valores diferentes de turbidez:** La relación existente entre la dosis de caolín en el agua y su turbidez se refleja mediante una ecuación cuyo ajuste cúbico tiene un R2 de 0,996, valor que se encuentra cerca de la unidad, por lo cual se puede afirmar que el ajuste cúbico y la ecuación generada son aceptables debido a que un ajuste cercano a la unidad es lo ideal, por otra parte se puede observar que a mayor concentración de caolín mayor es la turbidez en el agua, generándose de esa manera un comportamiento similar a la investigación realizada por Soto-Conde, (2016) en donde uso el caolín en sus diferentes presentaciones (arcilla caolín roja, beige, gris y blanca) para simular la turbidez del agua.



**Figura 2. Curva patrón de las dosis de caolín para determinar una turbidez deseada**

Mediante la ecuación generada entre la relación de la concentración de caolín y la turbidez del agua, se evidenció que los valores deseados para una turbidez inicial de 10, 50 y 200 NTU fueron: 10,2 NTU, 50 NTU y 190 NTU respectivamente, cuyas desviaciones estándar de turbidez con respecto a su media no superan los 0,4 NTU, en donde se refleja que la menor variabilidad de datos es para valores de 50 NTU.

**Tabla 2. Datos estadísticos de las turbideces generadas mediante la adición del caolín en diferentes concentraciones**

Descripción	10 NTU	50 NTU	200 NTU
Media	10,200	50,000	190,000
Error estándar de la media	0,067	0,061	0,116
Mediana	10,200	49,950	190,150
Desviación estándar	0,211	0,194	0,368
Varianza	0,044	0,038	0,136
Mínimo	9,800	49,800	189,100
Máximo	10,500	50,300	190,300

### Ajuste del pH inicial

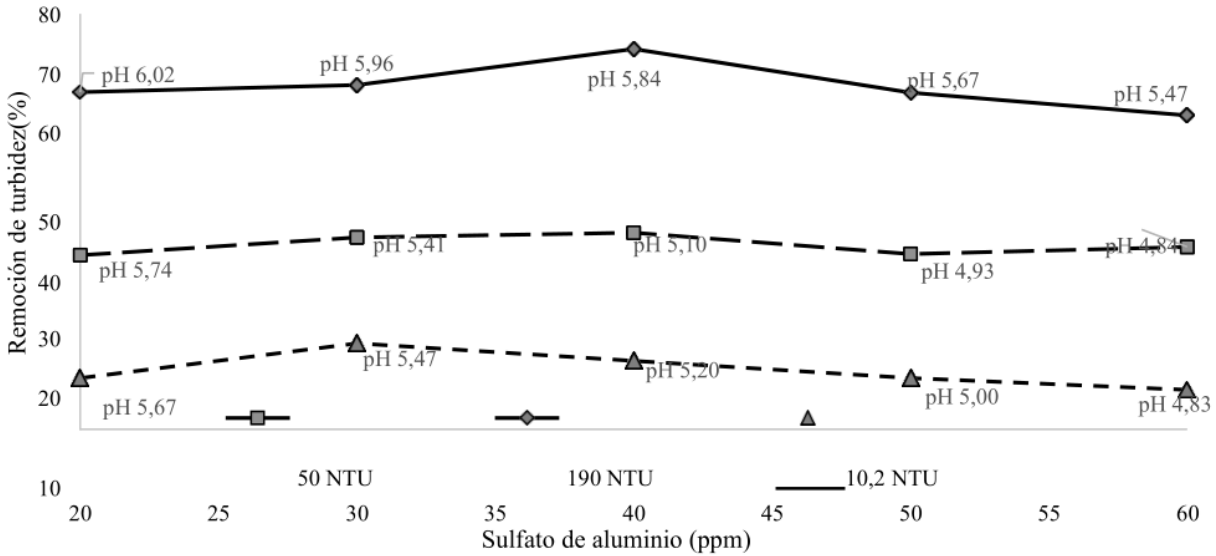
Los valores de pH inicial que se obtuvo en el laboratorio se asemejan al resultado deseado, con una desviación estándar máxima de 0,081 para un pH de 6, para ajustar el pH a valores que tienden a la basicidad se hizo uso del hidróxido de sodio a diferencia de Vielman (2019) que hizo uso del óxido de calcio para el ajuste de parámetro.

**Tabla 3. Datos estadísticos de los pH generados para el acondicionamiento del pH inicial del agua**

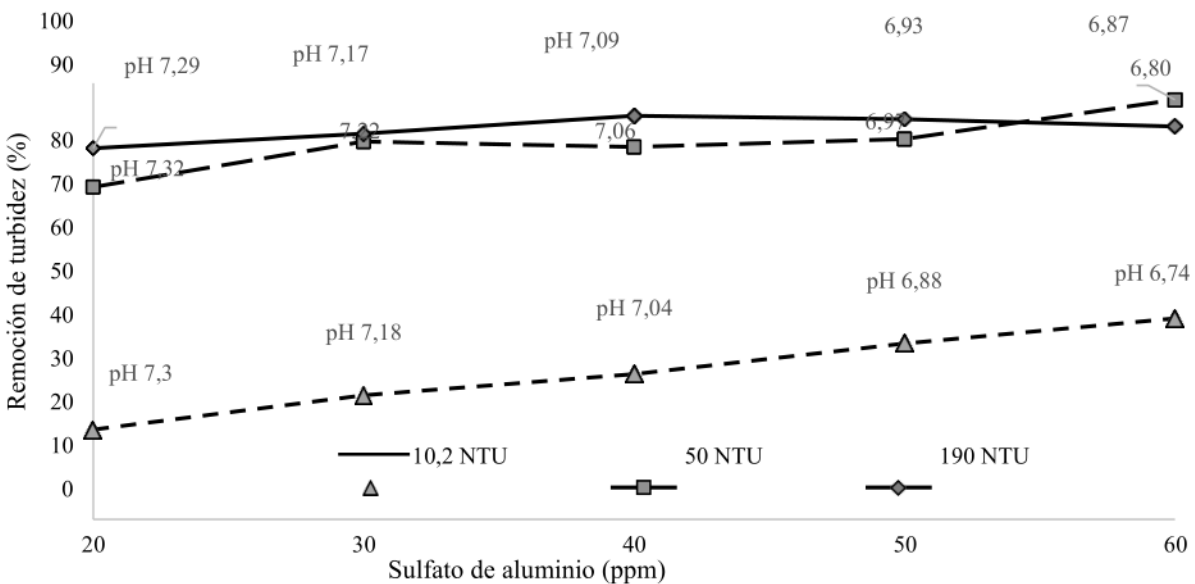
Descripción	pH 6,0	pH 7,5	pH 9,0
Media	6,050	7,560	9,070
Error estándar de la media	0,026	0,006	0,009
Mediana	6,055	7,570	9,075
Moda	5,950	7,570	9,090
Desviación estándar	0,081	0,021	0,027
Varianza	0,007	0,000	0,001
Mínimo	5,950	7,520	9,020
Máximo	6,150	7,580	9,100

### Concentración óptima de la alúmina

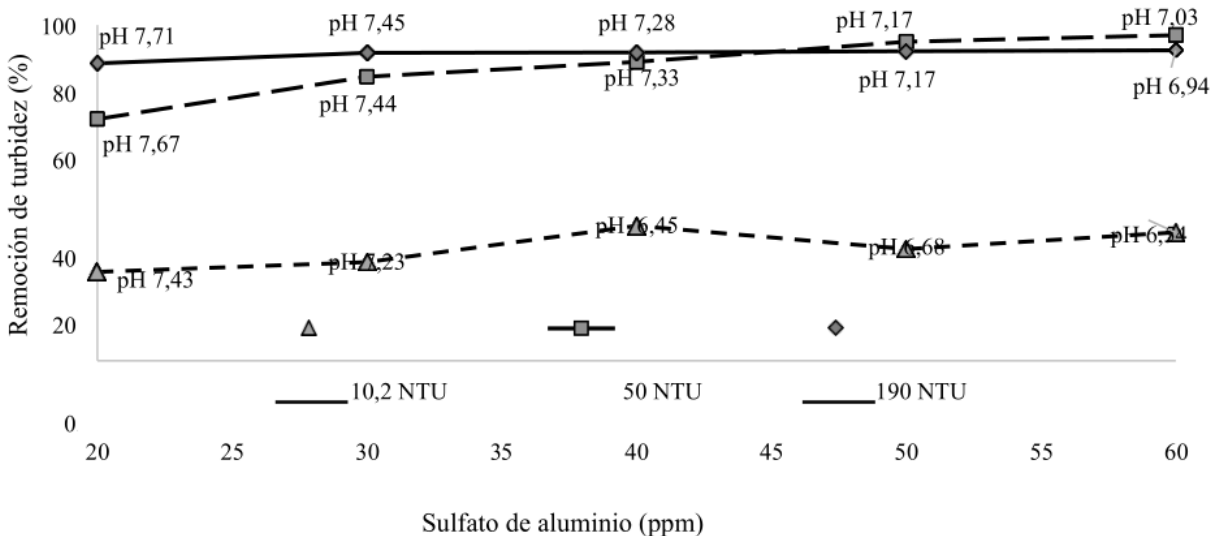
Las figuras 3, 4 y 5 muestran la relación de la dosis del sulfato de aluminio con la remoción de la turbidez del agua y la variación de su pH resultante. El pH final depende de la cantidad de coagulante agregado, observándose que a mayor cantidad de sulfato de aluminio menor es el pH resultante, así mismo existe una clara relación entre la eficiencia de remoción de turbidez y el pH final del agua, independientemente del valor de turbidez inicial, observándose mayor eficiencia en un rango de 5,2 a 7,09 de pH, un resultado similar obtiene el investigador Vielman, (2019) quien obtuvo un resultado con mayor remoción de turbidez a valores de pH que se encuentran dentro de un rango de 6,5 a 8,0, resultado que difiere en cierto grado del presente estudio debido a que el investigador en mención hizo uso de un agua con condiciones distintas al de la presente investigación (agua residual de una industria de alimentos de harina de trigo) ya que el sulfato de aluminio interactúa con el componente químico del agua, otros investigadores que realizaron pruebas para determinar el rango óptimo de pH con respecto al sulfato de aluminio como coagulante son Barajas & León, (2015) quienes afirman que este rango se encuentra entre 5,5 y 8; quien a diferencia de Vielman, (2019) trabajó con turbideces y dosis de coagulante semejantes a la presente investigación.



**Figura 3. Efecto de sulfato de aluminio, en la remoción de turbidez del agua a un pH inicial de 6,05**



**Figura 4. Efecto de sulfato de aluminio, sobre la remoción de turbidez del agua a un pH inicial de 7,56**



**Figura 5. Efecto de sulfato de aluminio, sobre la remoción de turbidez del agua a un pH inicial de 9,07**

Para una muestra de agua con un pH inicial de 6,05 se puede observar que el mayor porcentaje de remoción de turbidez es reflejada en un rango de 30 a 40 ppm de dosis de  $Al_2(SO_4)_3$  independientemente de su valor de turbidez inicial, mientras que para un pH inicial de 7,56 el porcentaje de remoción de turbidez asciende a medida que se aumenta dicha dosis, a excepción de una muestra de agua con NTU inicial de 190 el cual refleja un comportamiento con mayor efectividad a 40ppm de  $Al_2(SO_4)_3$ , un comportamiento similar se observa en muestras de agua con un pH inicial de 9,07 donde la remoción de la turbidez aumenta dependiendo de la cantidad de  $Al_2(SO_4)_3$ , todo lo mencionado hace referencia a la relación que tiene el coagulante en el pH y este en la eficiencia de remoción de la turbidez, Claros (2015) concuerda con nuestra afirmación ya que confirmó mediante una investigación la influencia de la dosis de coagulante y el pH sobre la turbidez final del agua.

### Dosis óptima del *Aloe vera* (L.) Brum.f. para disminuir la turbidez del agua

Se usó el *A. vera* en gel al 1% al igual que Tejaswinee, (2016) y Gaikwad & Munavalli, (2019) como floculante natural después de hacer uso del coagulante (Sulfato de Aluminio). Para un pH inicial de 6,05 y una turbidez de 10,2 y 190 NTU, la dosis óptima del *A. vera* se encontró sobre 0,4 mL, mientras que para una turbidez inicial de 50 NTU la mayor eficiencia se reflejó entre 0,15 y 0,5 mL del floculante natural (Figura 6, 7 y 8). Para un pH inicial de 7,56, tanto para una turbidez de 10,2 y 190 NTU se reflejó que la dosis de floculante con mayor eficiencia se encuentra sobre 0,3 mL, mientras que para una turbidez de 50NTU este se encuentra entre 0,1 y 0,35 mL (Figura 17, 18 y 19). Con respecto a un pH básico (pH de 9,07), tanto para una turbidez inicial de 10 y de 50 el valor optimo del *A. vera* se encuentra entre 0,05 y 0,45 mL, mientras que para un NTU 190, la dosis optima se encuentra sobre 5 mL (Figura 20, 21 y 22), observándose mediante este comportamiento que la dosis del *A. vera* depende de la dosis de coagulante agregado, ya que ambos interactúan de manera conjunta para obtener una mayor eficiencia de remoción, esta resultado se respalda según lo afirmado por Tejaswinee, (2016) quien hizo uso solo del *A. vera* como coagulante primario donde solo obtuvo una remoción máxima de 39,41%, mientras que al realizar una combinación del alumbre con el *A. vera* al 1% el porcentaje de remoción aumentó hasta llegar a valores superiores al 80%.

Los resultados de la remoción de turbidez del agua haciendo uso del *A. vera* como floculante natural en combinación con el coagulante, nos reflejan resultados más eficientes en todas las pruebas realizadas que solo haciendo uso del sulfato de aluminio, un claro ejemplo de ello es la investigación realizada por Daza y Epalza, (2016) quien uso como coagulante- floculante al *A. vera* en la remoción de la turbidez centrándose en los biopolímeros que estos contienen, donde obtuvo un 92,74% como máxima remoción de turbidez, mientras que en nuestra investigación en condiciones similares se obtuvo valores superiores. Las máximas eficiencias de remoción de turbidez obtenidas haciendo uso del floculante *A. vera* conjuntamente con el sulfato de aluminio fueron los siguiente: para una turbidez inicial de 10,2 NTU fueron de 52,94%, 83,33% y 100,00%, para una turbidez inicial de 50 NTU fueron 73,00%, 99,40% y 99,2%, mientras que para una NTU inicial de 190 fueron de 87,63%, 95, 60% y 98,12% para valores iniciales de pH de 6,02, 7,56 y 9,07 respectivamente; por otro lado Nougode *et al.*, (2016) reportaron una eficiencia de remoción de 72% para una muestra de agua de 186,8 NTU y un pH de 7,37 haciendo uso solo del *A. vera*, frente a estos datos se puede afirmar lo mismo que Gaikwad & Munavalli, (2019) que mencionan que el *A. vera* actúa como coagulante auxiliar con los coagulantes y aumenta la eliminación de la turbidez, lo mismo afirma Hurtado, (2019) quién demostró el poder floculante del gel de *A. Vera*, resaltando que el uso de este gel de forma individual no es muy enérgico, existe un mejor resultado de la remoción de la turbidez al hacer uso de este como coadyuvante de la floculación en mezcla con alúmina. El *A. vera* fue usado como floculante por su estado mucilaginoso, Nougode *et al.*, (2016) mencionan que esta planta contiene grupos fitoquímicos que le dan la propiedad de floculante tales como taninos, saponinas, mucílagos, flavonoides, derivados del antraceno, derivados de quinonas y proteínas.

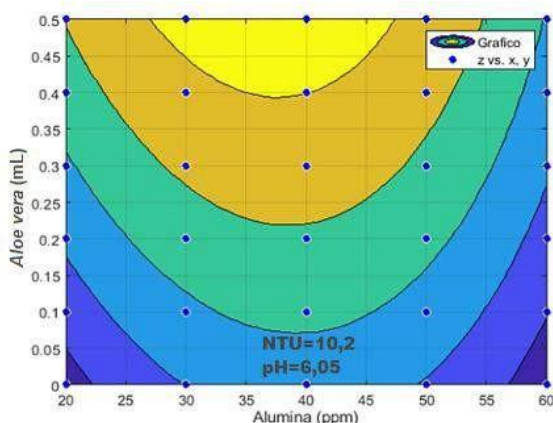


Figura 6. Efecto de sulfato de aluminio, sobre la remoción de turbidez del agua a un pH inicial de 6,05 a una turbidez inicial de 10,2 NTU

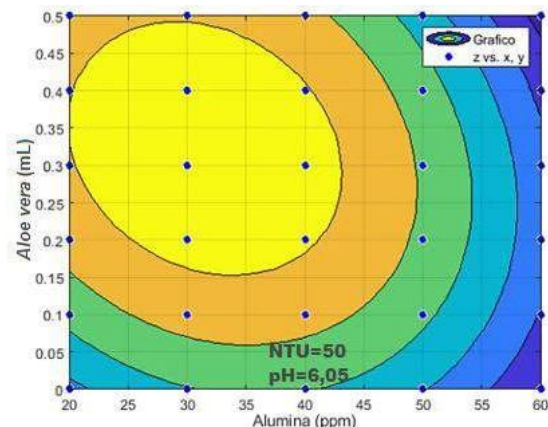


Figura 7. Efecto de sulfato de aluminio, sobre la remoción de turbidez del agua a un pH inicial de 6,05 a una turbidez inicial de 50 NTU



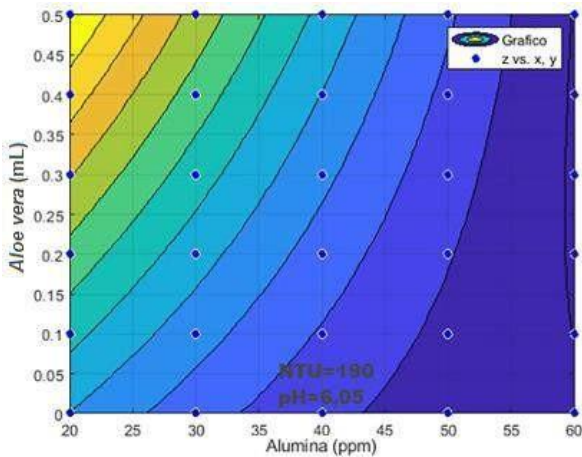


Figura 8. Efecto de sulfato de aluminio, sobre la remoción de turbidez del agua a un pH inicial de 6,05 a una turbidez inicial de 190 NTU

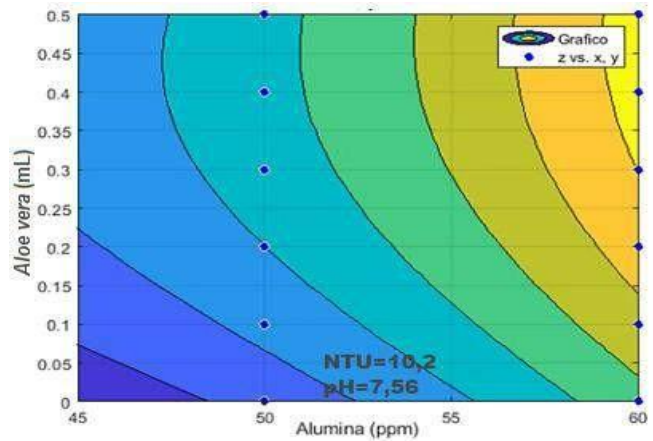


Figura 9. Efecto de sulfato de aluminio, sobre la remoción de turbidez del agua a un pH inicial de 7,56 a una turbidez inicial de 10,2 NTU

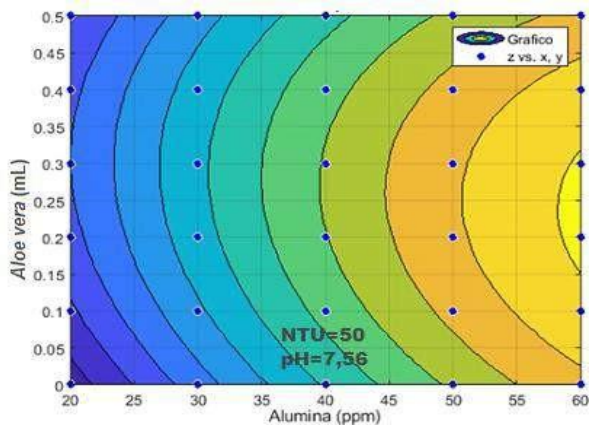


Figura 10. Efecto de sulfato de aluminio, sobre la remoción de turbidez del agua a un pH inicial de 7,56 a una turbidez inicial de 50 NTU

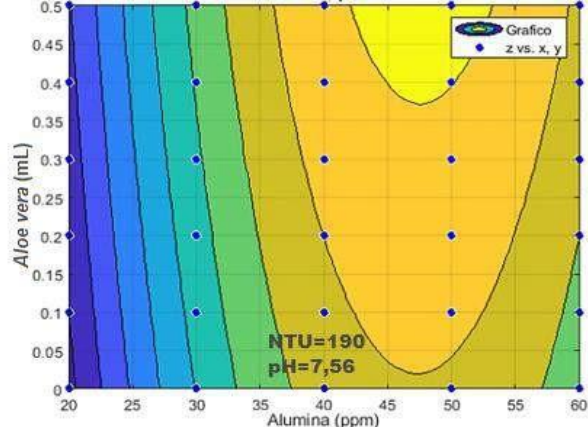


Figura 11. Efecto de sulfato de aluminio, sobre la remoción de turbidez del agua a un pH inicial de 7,56 a una turbidez inicial de 190 NTU

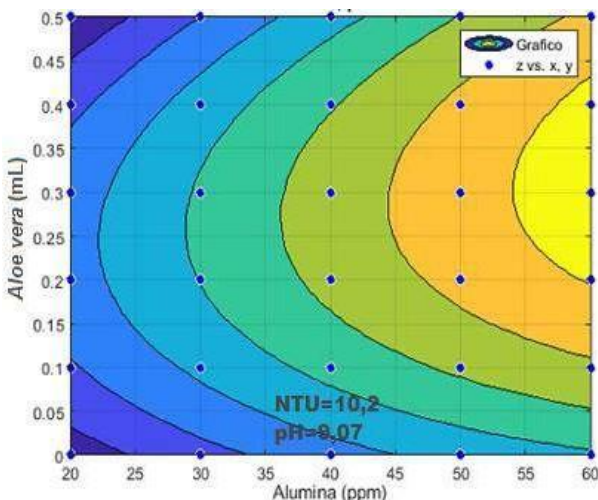


Figura 12. Efecto de sulfato de aluminio, sobre la remoción de turbidez del agua a un pH inicial de 9,07 a una turbidez inicial de 10,2 NTU

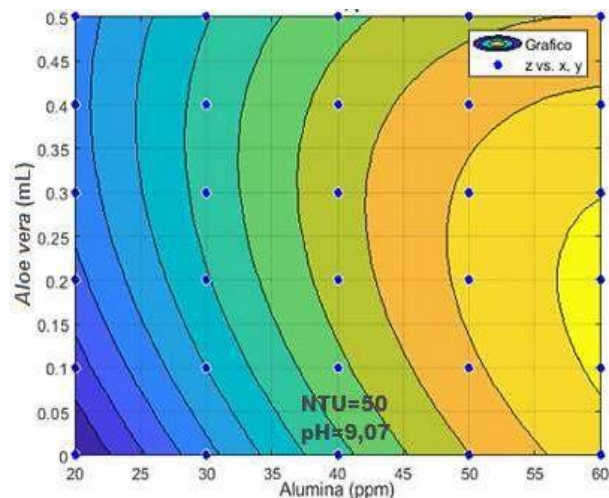
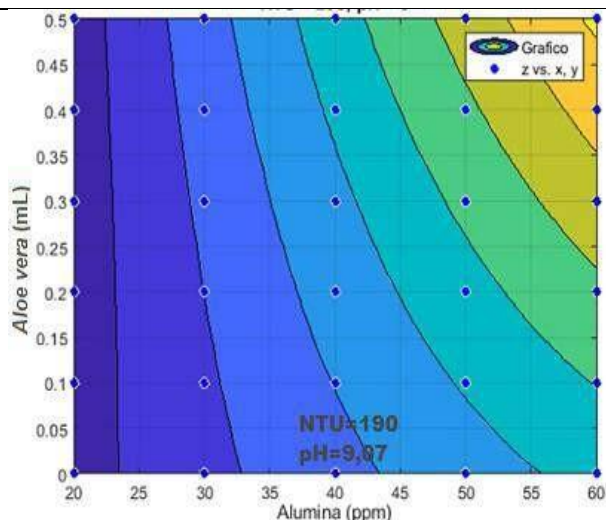
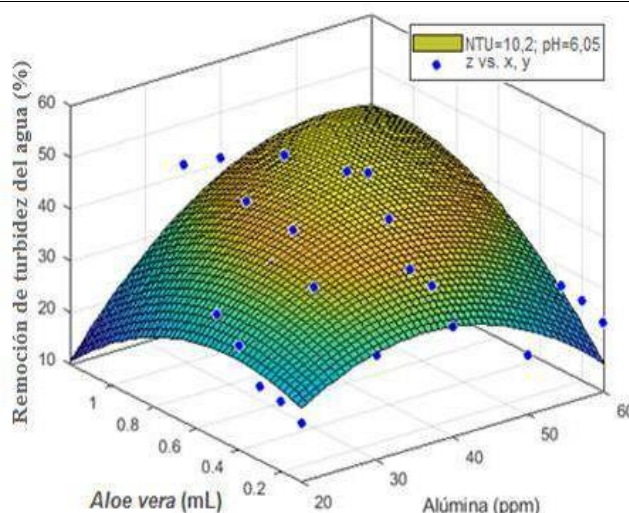


Figura 13. Efecto de sulfato de aluminio, sobre la remoción de turbidez del agua a un pH inicial de 9,07 a una turbidez inicial de 50 NTU



**Figura 14. Efecto de sulfato de aluminio, sobre la remoción de turbidez del agua a un pH inicial de 9,07 a una turbidez inicial de 190 NTU**



**Figura 15. Superficie de respuesta de la dosis óptima de floculante a una turbidez de 10,2 NTU y un pH de 6,05**

Gaikwad & Munavalli (2019) realizaron su investigación con dos agentes naturales para la coagulación-floculación siendo estos el *A. vera* conjuntamente con la *Moringa oleifera*, llegando estos a eliminar hasta el 40% de turbidez de un agua de turbidez baja (<12) con un pH de 7,0 a 7,6, este resultado es mucho menor al registrado por la presente investigación en donde se llegó hasta un 83,33% de remoción de turbidez a una turbidez inicial de 10,2 NTU y un pH de 7,56, esto debido a que se trabajó con el sulfato de aluminio que tiene un alto poder coagulante.

**Tabla 4. Prueba de Kruskal-Wallis de la turbidez inicial del agua con respecto a la remoción del mismo**

Variable	Turbidez (NTU)	N	Medias	Desv. Estándar	Mediana	Promedio rangos	H	P
Remoción de turbidez (%)	10,2	225	46,21	22,26	38,33	171,17	250,71	0,0001
	50	225	78,33	19,27	87	403,79		
	190	225	85,11	10,24	89,53	439,04		

**Tabla 5. Prueba de Kruskal-Wallis del pH inicial del agua con respecto a la remoción de la turbidez**

Variable	pH	N	Medias	Desv. Estándar	Mediana	Promedio rangos	H	P
Remoción de turbidez (%)	6,05	225	52,44	18,59	55,6	191,59	215,41	0,0001
	7,56	225	73,55	25,56	87,76	365,1		
	9,07	225	83,66	18,2	91,95	457,31		

**Tabla 6. Prueba de Kruskal-Wallis de la dosis del sulfato de aluminio con respecto a la remoción de la turbidez del agua**

Variable	Sulfato de aluminio (ppm)	N	Medias	Desv. Estándar	Mediana	Promedio rangos	H	P
Remoción de turbidez (%)	20	135	62,89	25,46	79	253,03	48	0,0001
	30	135	68,26	23,59	75,32	307,3		
	40	135	72,89	21,73	86,6	354,78		
	50	135	71,78	25,18	75,49	377,73		
	60	135	73,58	26,18	91,42	397,15		

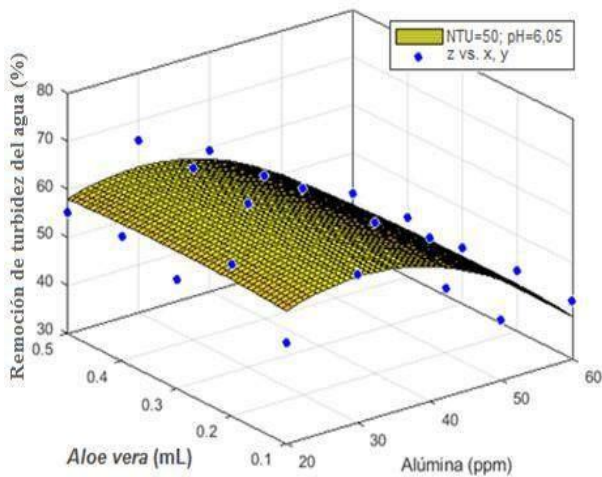
**Tabla 7. Prueba de Kruskal-Wallis de la dosis de *A. vera* con respecto a la remoción de turbidez del agua**

Variable	Aloe vera (mL)	N	Medias	Desv. Estándar	Mediana	Promedio rangos	H	P
Remoción de turbidez (%)	0,1	135	69,24	26	78,2	333,72	1,63	0,8042
	0,2	135	70,34	25,09	82,54	341,48		
	0,3	135	68,31	24,98	75,32	326,62		
	0,4	135	71,84	24,41	83,79	354,67		
	0,5	135	69,68	23,28	76,89	333,51		

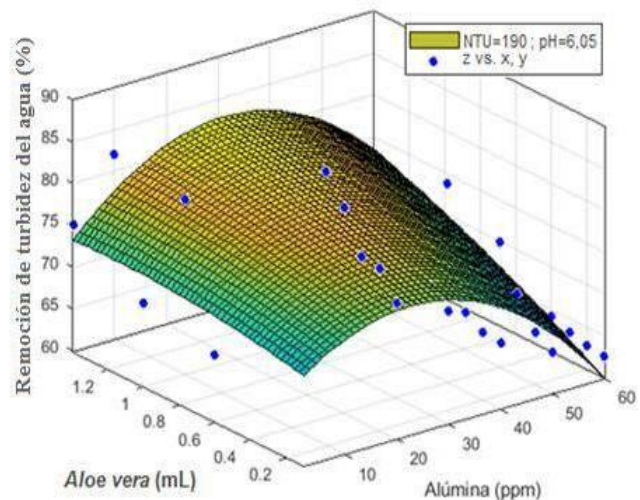
Según la prueba de Kruskal-Wallis, existen diferencias altamente significativas para la eficiencia de remoción de la turbidez por efecto de los diferentes niveles de turbidez inicial, pH inicial y dosis de sulfato de aluminio, los cuales tienen un p valor menor al 0,05 (Tablas 4, 5 y 6); este resultado concuerda con autores como Vielman, (2019) quien al realizar su análisis de varianza de las dosis de sulfato de aluminio con respecto a la turbidez del agua, obtuvo un p valor menor al 0,05 ( $p = 0,000$ ) concluyendo que el sulfato de aluminio tiene un efecto significativo en la turbidez final del agua, y Claros, (2015) quien afirma en una de sus investigaciones que el pH influye significativamente en la turbidez final del agua, ya que se obtuvo un p valor de 0,000. Por otra parte, se evidencia estadísticamente que las dosis del *A. vera* no tienen diferencias significativas en la remoción de la turbidez del agua ya que el  $p = 0,8042$  es mayor al 0,05 (Tabla 7), lo mismo evidencia Terrones, (2019) quien en sus resultados obtuvo un  $p = 0,991$  afirmando que no existe diferencias significativas entre las dosis del Aloe vera en la turbidez final del agua, cabe resaltar que este autor usó dosis de 0,5 mL, 1,0 mL, 2,0 mL y 3,0 mL al 10%, este autor en su misma investigación halló diferencias significativas entre las dosis de floculante de *Citrus reticulata* en la remoción de la turbidez del agua.

**Modelo matemático de superficie de respuesta para determinar la dosis óptima de *Aloe vera* (L.) Brum. f. como floculante, en la remoción de la turbidez del agua**

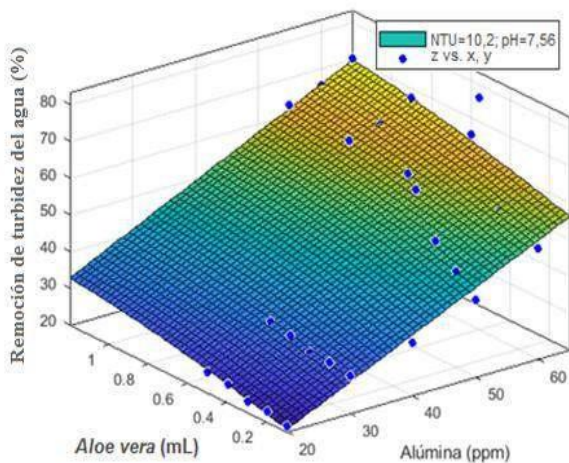
Las figuras 15, 16 y 17 muestran las superficies de respuesta del *A. vera* como floculante de una muestra de agua con pH inicial de 6,05, reflejando que el floculante depende de la concentración de coagulante usado, mostrando mayor eficiencia en dosis superiores a 0,7 mL (Figura 15 y 16), a excepción de la muestra de agua con una turbidez inicial de 50 NTU que refleja una eficiencia de remoción similar en todas las dosis agregadas en un rango de concentración de  $Al_2(S_4)_3$  de 20 a 40 ppm. A un pH inicial de 6,05 se observa que las eficiencias de remoción de turbidez predictivo según el método de superficie de respuesta son: 45,50%, 61,06%, 82,66% para turbideces de 10,2 NTU, 50 NTU, 190 NTU respectivamente, mientras que Alvarez, (2019) para una muestra de agua con un pH ácido reportó valores de eficiencia que variaron de 26,86% a 98,86% haciendo uso de la moringa como coagulante-floculante.



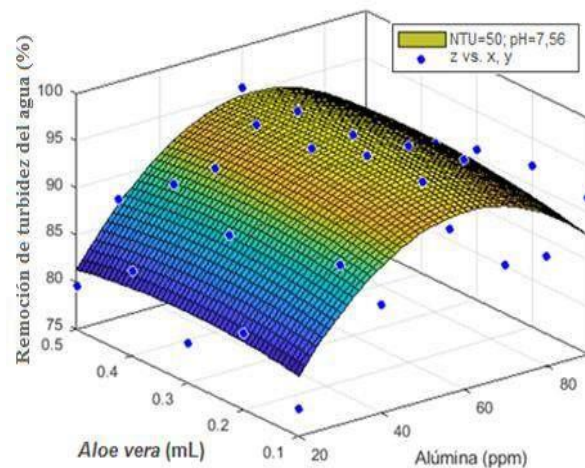
**Figura 16. Superficie de respuesta de la dosis óptima de floculante a una turbidez de 50 NTU y de 6,05**



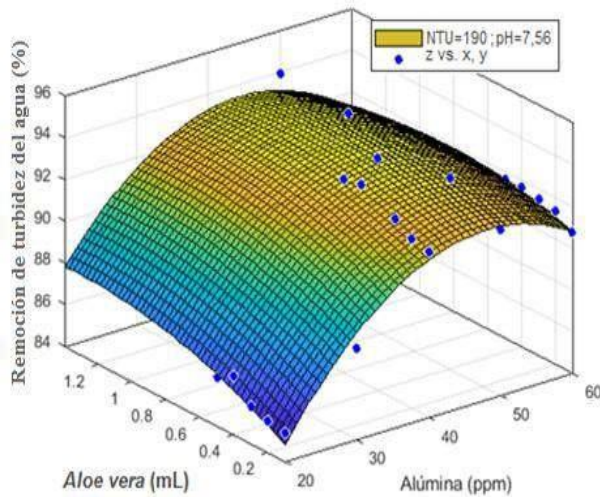
**Figura 17. Superficie de respuesta de la dosis óptima de floculante a una turbidez de 190 NTU y pH de 6,05**



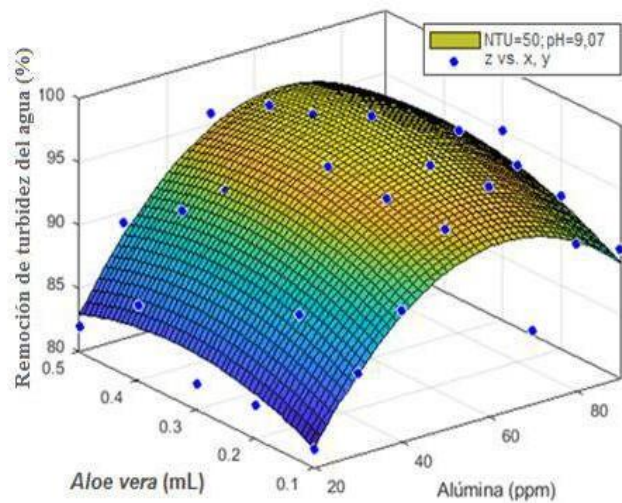
**Figura 18. Superficie de respuesta de la dosis óptima de floculante a una turbidez de 10,2 NTU y pH de 7,56**



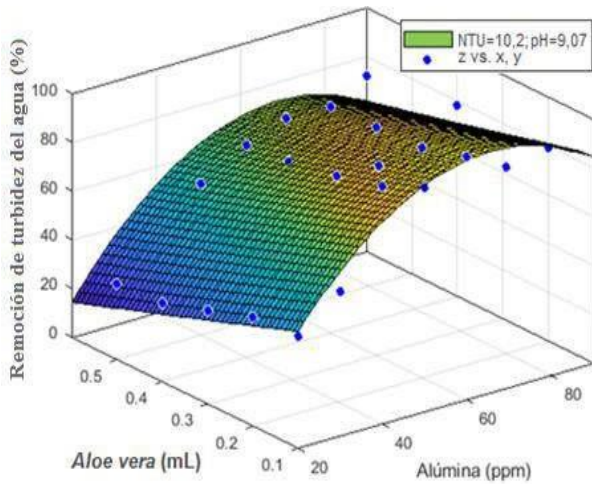
**Figura 19. Superficie de respuesta de la dosis óptima de floculante a una turbidez de 50 NTU y pH de 7,56**



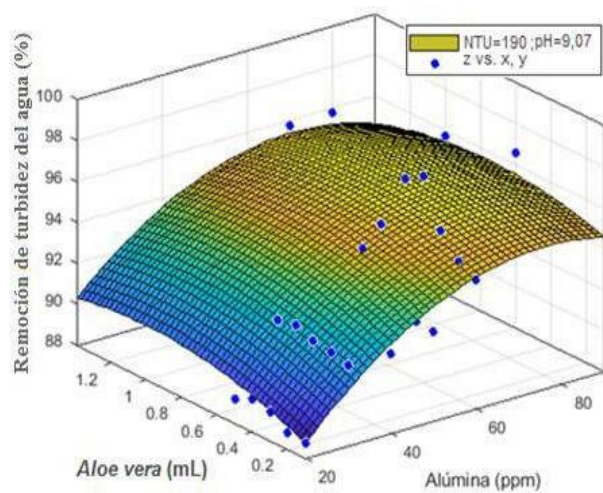
**Figura 20.** Superficie de respuesta de la dosis óptima de floculante a una turbidez de 190 NTU y pH de 7,56



**Figura 21.** Superficie de respuesta de la dosis óptima de floculante a una turbidez de 10,2 NTU y pH de 9,07



**Figura 22.** Superficie de respuesta de la dosis óptima de floculante a una turbidez de 50 NTU y pH de 9,07



**Figura 23.** Superficie de respuesta de la dosis óptima de floculante a una turbidez de 190 NTU y un pH de 9,07

En las figuras 18, 19 y 20 se evidencian las superficies de respuestas del *A. vera* como floculante de una muestra de agua con pH inicial de 7,56, en donde se aprecia que tanto para una turbidez de 50 y 190 NTU la dosis óptima de floculante común es de 0,4 mL, mientras que para una turbidez de 10,2 NTU, el porcentaje de eficiencia de remoción de turbidez aumenta a medida que se agrega mayor cantidad de *A. vera*, las eficiencias variaron de 70% a 95,5%, resaltando que para una turbidez inicial de 50 NTU a un pH de 7,56 se obtuvo la mayor eficiencia, mientras que Daza & Epalza, (2016) en su investigación “Evaluación de la eficiencia de biopolímeros derivados de plantas desérticas como agentes de floculación” reportó un máximo de 92,74% de remoción de turbidez de agua usando como coagulante-floculante al *A. vera*, para una muestra de agua de 44,5 NTU y un pH inicial de 7,0, por otra parte Diestra & Ramos, (2019) determinaron el efecto de la concentración del gel de *A. Vera* en la remoción de sólidos suspendidos (SST) y materia biodegradable ( $DBO_5$ ) de un agua residual, logrando remover hasta 88,49%, adicional a ello la remoción de la  $DBO_5$  efectiva luego hasta un 73,46%.

En las figuras 19 y 20, se aprecia un rango de dosis óptima, según el método de superficie de respuesta, el punto óptimo para una turbidez de 50 NTU y pH inicial de 7,56 se encuentra entre un rango de dosis de 50 a 70 ppm de sulfato de aluminio y 0,1 a 0,5 mL del *A. vera*, mientras que para una turbidez de 190 NTU el rango de dosis óptima se encuentra entre 40 y 50 ppm del coagulante y a entre 0,4 mL a más del floculante.

Las dosis óptimas del *A. vera*, dependen de la cantidad de  $Al_2(SO_4)_3$  agregado, reflejando una mayor remoción de turbidez entre valores que oscilan entre 50 a 80 ppm del coagulante para valores de turbidez inicial de 10,2, 50 y 190 NTU (Figura 21, 22 y 23), mientras que las dosis del floculante para valores de turbidez inicial de 50 y 190 NTU, se encuentran entre 0,2 a 0,5 mL y 0,6 a 1,0 mL, respectivamente, para una turbidez inicial de 10,2 NTU se refleja un comportamiento distinto, ya que la mayor eficiencia de remoción se refleja en dosis menores a 0,3 mL del floculante

NTU. Según el modelo de superficie de respuesta, la mayor eficiencia de remoción de turbidez se encuentra a un pH inicial de 9,07; además, se aprecia que el pH está directamente relacionado con la concentración de coagulante agregado, con respecto a la dosis óptima del floculante natural *A. vera*, no se aprecia un comportamiento específico ya que depende de la dosis de  $Al_2(SO_4)_3$  agregado, esta información se contrasta con Moreno, (2016) y Hurtado, (2019). Moreno, (2016) en una de sus investigaciones, determinó la eficiencia de remoción de la turbidez del *A. vera*, donde obtuvo una remoción de la turbidez de 42,48%, solo haciendo uso de este agente natural, mientras que en nuestros resultados la remoción de turbidez del agua según el método de superficie de respuesta fue de 99,33%, haciendo uso del *A. vera* en combinación con el sulfato de aluminio, asimismo Hurtado (2019), demostró el poder floculante del gel de *A. vera*, pero mencionó que el uso de este gel de forma individual no es muy enérgico y que existe un mejor resultado de la remoción de la turbidez al hacer uso de este como coadyuvante de la floculación en mezcla con alúmina, permitiendo una buena floculación de hasta 67% para muestras de agua con las siguientes características: turbidez mayores a 30 NTU, temperatura a 18° C, con tiempo de sedimentación de 20 a 40 minutos.

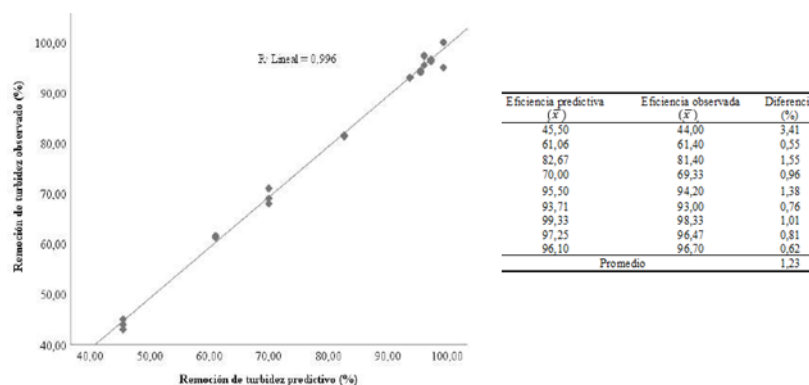
Mayores dosis de coagulante y floculante no reflejan mayor remoción de la turbidez del agua ya que estos dependen de su pH inicial (Tabla 8), esto se puede contrastar con lo reportado por Alvarez, (2019) quién mediante el método de superficie de respuesta reportó un conjunto de resultados donde se evidencia que a mayor dosis no necesariamente es mayor la eficiencia de remoción. Las eficiencias de remoción de turbidez haciendo del agua haciendo uso del *A. vera* en conjunto con el sulfato de aluminio según el método de superficie de respuesta alcanzaron valores que variaron desde 45,50% hasta 99,33%, mientras tanto Cerna, (2018) obtuvo un rango de eficiencia de 79,32% hasta 96,4% haciendo uso de la alúmina en conjunto con la *Malachra alceifolia* Jacq. (Malva); por otra parte Alvarez, (2019) haciendo uso del extracto de moringa en la remoción de turbidez, obtuvo eficiencias de 92,25 a 94,16 %, mientras que Villabona Ortiz *et al.*, (2013) hizo de *Opuntia ficus-indica* en polvo para que cumpla la función de un coagulante, cuyo resultado reflejó un 72% de remoción de la turbidez a un 90 mg/L del coagulante para una turbidez inicial de 171 NTU, y Herrera, (2015) alcanzó una eficiencia del 94% haciendo uso solo del almidón de la papa.

**Tabla 8. Dosis óptima del *A. vera* como floculante, en la remoción de la turbidez del agua según el modelo matemático de Superficie de Respuesta**

Turbidez inicial	pH inicial	R2	Dosis óptima de $Al_2(SO_4)_3$ (ppm)	Dosis óptima de Aloe vera (mL)	Remoción de turbidez (%)
10,2 NTU	6,05	0,553	49,09	0,9	45,501
	7,56	0,821	65	1,2	70,001
	9,07	0,789	65,76	0,1	99,33
50 NTU	6,05	0,683	29,95	0,3	61,063
	7,56	0,631	61,87	0,4	95,502
	9,07	0,757	65,45	0,4	97,246
190 NTU	6,05	0,667	31,11	1,4	82,668
	7,56	0,931	45,51	1	93,706
	9,07	0,808	73,33	0,8	96,1

Los R2 obtenidos mediante el modelo de superficie de respuesta varían desde 0,55 hasta 0,93, mientras que Alvarez, (2019) obtuvo un R2 de 0,776 y Asunción, (2017) un R2 que varió de 0,75 a 0,98; según Soto, (2019) el R2 no está relacionado con la exactitud de un modelo predictivo, y por ende, no necesariamente refleja si los datos simulados representan a los observados.

#### Validación del modelo matemático de superficie de respuesta



**Figura 24. Comparación entre valores predictivos del modelo de superficie de respuesta y los valores reales observados**

Se realizó la representación gráfica de los valores predictivos y observados para la eficiencia de remoción de turbidez del agua usando al *A. vera* como floculante. La diferencia entre el valor predictivo del modelo de superficie de respuesta y el observado es de 1,23%, lo que indica que dicho modelo es representativo en aplicaciones reales, el porcentaje de error está asociado a los variables no controladas al momento de la experimentación, asimismo Chavez *et al.*, (2011) realizó la validación del modelo de superficie de respuesta mediante diferencias en porcentajes donde obtuvo una diferencia de 3% del modelo predictivo y el real observado, indicando que el procedimiento que realizó en su investigación es representativo en condiciones reales. La relación gráfica existente entre la eficiencia observada versus la predictiva, muestra una distribución homogénea y cercana a la línea de equivalencia con un R2 de 0,996.

### Comparación estadística

La comparación de medias del modelo matemático con muestras de agua en mismas condiciones que las usadas para el modelo en mención, pero con dosis óptimas de coagulante y loculante, no encontró diferencias estadísticas significativas en los promedios de las eficiencias predictivas con las eficiencias observadas ( $p > 0,05$ ), esto quiere decir que presentan medias iguales (Tabla 9); por otra parte, las muestras de aguas superficiales y las simuladas con la arcilla roja tienes medias diferentes ( $p < 0,05$ ), contrarrestando con el “p” valor, el Wilcoxon calculado (valor de Z) en la muestra de agua simulada con el caolín se encuentra dentro de rango de -1,96 y 1,96, a diferencia de las muestras de aguas superficiales y las simuladas con la arcilla, con respecto a los índices de sesgo y exactitud para la primera muestra mencionada fueron: el factor de sesgo fue de 1,009  $> 1,00$  lo que indica un modelo seguro, debido a que los valores observados son menores a los estimados por el modelo de superficie de respuesta, mientras que el valor alcanzado por el factor de exactitud es de 1,014 lo cual indica que las predicciones, en promedio difieren un 1,4% de las observaciones (Tabla 10), ambos índices reflejan un ajuste adecuado del modelo matemático predictivo, asimismo Rodriguez, (2003) al realizar la validación del modelo de superficie de respuesta obtuvo índices de sesgo y exactitud que indicaban un buen ajuste del modelo en mención. En la validación con muestras de aguas superficiales se obtuvo un RMSE alto (15,524), pero índices de sesgo y exactitud muy cercanos a la unidad, lo cual indica que el modelo matemático se ajusta a muestras de aguas superficiales de la zona de Tingo María, mientras que el agua simulada con arcilla roja obtuvo tanto RMSE e índices de sesgo y exactitud muy alejados de la unidad, indicando que el modelo no es aplicable para esas aguas.

**Tabla 9. Eficiencia esperada vs eficiencia obtenida, prueba de rango de Wilcoxon con 95% de confianza**

Descripción	Wilcoxon calculado (Z)	gl	P valor
Simulación con caolín	-1,91	27	0,056
Agua superficial	-2,67	9	0,008
Simulación con arcilla roja	-2,667	9	0,008

**Tabla 10. Comparaciones matemáticas mediante índices de sesgo y exactitud**

Descripción	RMSE	Índice de sesgo y exactitud	
		Factor de sesgo (Bf)	Factor de exactitud (Af)
Simulación con caolín	1,383	1,009	1,014
Agua superficial	15,524	0,855	1,169
Simulación con arcilla roja	43,6	2,011	2,011

Con respecto a la validación del modelo matemático, la RMSE fueron: 1,383, 15,524 y 43,600 para muestras de aguas simuladas con caolín, agua superficial y agua simulada con arcilla, respectivamente, don el RMSE con menor valor (1,383) fue la simulada con el caolín por ende su R2 fue alto (0,996), valores que indican que el método de superficie de respuesta estima los observado con buena precisión, mientras tanto los valores de RMSE para las aguas superficiales y la simulada con la arcilla roja fueron elevados, lo que indica una alta dispersión de los datos, Soto-Conde (2016) afirma que individualmente el RMSE no refleja la confiabilidad de un modelo matemático, por lo cual no lo considera un valor útil para evaluar un modelo matemático, pero si para estimar cuanto se alejan los datos observados de los estimados por el modelo de regresión, fue así que Soto-Conde, (2016) analizó mediante métodos estadísticos el desempeño de los modelos estadísticos, donde obtuvo valores de RMSE bajos (1,98) y un R2 alto (0,96) indicando que estos valores representan un buen ajuste con respecto a la regresión entre los valores predictivos y los estimados

### Consideraciones finales

El acceso al agua potable por red pública es un problema de la población rural en el departamento de Huánuco, por ende, se suele realizar el consumo de este recurso sin previo tratamiento, produciéndose así enfermedades estomacales. En este contexto, se ha planteado la turbidez como un indicador cualitativo indirecto de riesgo de contaminación microbiológica en aguas superficiales, ya que la turbidez refleja la cantidad de coliformes totales existente

en ellas. El uso de agentes naturales como el *Aloe vera* (L.) viene a ser una alternativa como floculante para el tratamiento convencional del agua.

En esta investigación se visualizaron experimentalmente las características y reacciones del gel de *A. vera* como floculante en la remoción de la turbidez en distintas concentraciones, lo cual permitió realizar un modelo matemático a partir de superficie de respuesta. La concentración óptima del sulfato de aluminio para 10,2 NTU, 50 NTU y 190 NTU con un pH inicial de 6,05 fueron de 40 ppm, 30 ppm y 20 ppm respectivamente, para un pH inicial de 7,56 fue de 60 ppm para turbideces de 10,2 NTU y 50 NTU y de 40 ppm para un NTU de 190, mientras que para un pH inicial de 9,07 fue de 60 ppm independientemente de la turbidez inicial.

La dosis óptima del *A. vera* al 1% es de 0,4 mL por cada 500 mL de muestra, reportándose a estas dosis los mayores porcentajes de remoción de la turbidez del agua.

Mediante el modelo matemático de superficie de respuesta se determinó los valores óptimos del *A. vera*, los cuales alcanzan su mayor eficiencia a 0,1 mL y 0,4 mL, los cuales varían de acuerdo a su pH, turbidez inicial y concentración de coagulante. La validación interna y externa demostró que el modelo matemático de superficie de respuesta es aplicable para aguas del río Huallaga, río Monzón y quebrada Naranjal, obteniendo un índice de sesgo de 0,855 y un índice de exactitud de 1,169.

El acceso al agua potable por red pública es un problema de la población rural en el departamento de Huánuco, por ende, se suele realizar el consumo de este recurso sin previo tratamiento, produciéndose así enfermedades estomacales. El uso de agentes naturales como el *Aloe vera* (L.) (*Sábila*) viene a ser una alternativa como floculante para el tratamiento convencional del agua, por tal motivo, en esta investigación se visualizaron experimentalmente las características y reacciones del gel de *A. vera* como floculante en la remoción de la turbidez. La turbidez del agua se simuló con el caolín, y se determinó la concentración óptima de alúmina y sábila (1%) a valores diferentes de pH y turbidez iniciales, con los datos resultantes se optimizó las dosis mediante el modelo matemático de superficie de respuesta para después realizar su respectiva validación mediante métodos gráficos e índices matemáticos; los resultados reflejaron que la turbidez inicial, pH inicial y la dosis del coagulante influyen significativamente en la remoción de la turbidez de agua, de forma individual, concluyendo según el modelo de superficie de respuesta que el volumen óptimo de sábila al 1% alcanza su mayor eficiencia a 0,1 mL y 0,4 mL por cada 500 mL, dosis que varía de acuerdo a su pH y turbidez inicial, este modelo matemático se ajusta para aguas superficiales de la ciudad de Tingo María.

## Conflicto de intereses

No se reporta conflicto de intereses.

## Agradecimientos

A todo el equipo de investigación.

## Referencias

- Aguilar, M., Sáez, J., Lloréns, M., Soler, A., & Ortuño, J. (2002). Tratamiento físico-químico de aguas residuales, coagulación- floculación. Editum, España.
- Álvarez, H. (2019). Extracto de moringa (*Moringa oleifera*) para la remoción de turbidez de efluentes de la producción de néctar de maracuyá. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Disponible en: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3923> (Acceso septiembre 2021).
- Álvarez, R. (1994). Estadística multivariante y no paramétrica con SPSS: aplicación a las ciencias de la salud. Ediciones Díaz de Santos.
- Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua: coagulación y floculación. Documento técnico. Planta de Tratamiento de Agua Sedapal, Lima.
- Apostol, G., Kouachi, R., & Constantinescu, I. (2011). Optimization of coagulation-flocculation process with aluminum sulfate based on response surface methodology. UPB Buletin Stiintific, Series B: Chemistry and Materials Science, 73(2), 77-84. Disponible en: [https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/full66817.pdf](https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full66817.pdf) (Acceso septiembre 2021).
- Arce, R., Molina, J., Morán, F., & Moreno, J. (2007). Efecto protector del *Aloe vera* (sábila) en lesiones gástricas inducidas con etanol en ratas. CIMEL Ciencia e Investigación Médica Estudiantil Latinoamericana, Lima. 12 (2), 71-75. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=71712207> (Acceso septiembre 2021).

- Asunción, R. (2017). Optimización por el método de superficie de respuesta del efecto de la proporción Stevia (*Stevia rebaudiana Bertoni*) / Cedrón (*Aloysia triphylla*) y tiempo de infusión en el sabor, olor y aceptabilidad general en la obtención de té filtrante a partir de Stevia y cedrón. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio Latinoamericano. Disponible en: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1430980> (Acceso noviembre 2021).
- Barajas, C., & León, A. (2015). Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 18h<sub>2</sub>O) en el proceso de coagulación- floculación para el tratamiento de agua potable por medio del uso de una red neuronal artificial. Investigación para optar el título de Ingeniero Ambiental. Universidad Santo Tomás, Bogotá. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/2916> (Acceso noviembre 2021).
- Cerna, A. (2018). Evaluación de la eficiencia de remoción de turbidez de un floculante de Malachra alceifolia Jacq (Malva) a escala de laboratorio. [Tesis, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/Chemplen/floculante-de-malva> (Acceso septiembre 2021).
- Cerna, A. (2020). Optimización de las dosis de alúmina en diferentes valores de pH y turbidez iniciales para la remoción de turbidez en el agua de consumo humano en la UNAS. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio de la Universidad Nacional Agraria de la selva. Disponible en: <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1732> (Acceso septiembre 2021).
- Chacón, I., & Ramos, C. (2019). Optimización de parámetros para remoción de turbidez, DBO<sub>5</sub> Y DQO mediante procesos de coagulación/floculación de aguas residuales domésticas empleando organoarcilla. [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana Unión]. Repositorio de tesis Universidad Peruana Unión. Disponible en: <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/2144?show=full> (Acceso octubre 2021).
- Chavez, L., Hernandez, C., & Manzana, R. (2011). Modelación del envejecimiento de los pavimentos asfálticos con la metodología de la superficie de respuesta. Ingeniería investigación y tecnología. 12, 373-382. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-77432011000400002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432011000400002) (Acceso septiembre 2021).
- Chiliquinga, C. (2017). Volumetría I: Neutralización ácido-base, disoluciones. Laboratorio de química analítica. Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Ecuador. 14 p.
- Claros, J. (2015). Efectos del polihidroxiclورو de aluminio, velocidad de agitación y pH en la turbidez del agua del río shullcas - huancayo, 2013. [Tesis para optar el grado académico de Doctor, Escuela politécnica de Chimborazo]. Disponible en: <https://docplayer.es/182217095-Escuela-superior-politecnica-de-chimborazo.html> (Acceso octubre 2021).
- Custodio, M., & Chanamé, F. (2016). Análisis de la biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos del río Cunas mediante indicadores ambientales, Junín-Perú. Scientia Agropecuaria, Trujillo. 7(1), 33-44. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.01.04>
- Daza, R., & Epalza, J. (2016). Evaluation of the efficiency of biopolymers derived from desert plants as flocculation agents. Universidad de Santander Programa UDES de Ingeniería Ambiental, Grupo de Investigación Ambiental Aplicada - GAIA, Bucaramanga, Colombia, 49, 361-366. Disponible en: <https://www.aidic.it/cet/16/49/061.pdf> (Acceso septiembre 2021).
- Diamadopoulos, E., Anastasakis, K., & Kalderis, D. (2009). Flocculation behavior of mallow and okra mucilage in treating wastewater, Desalination, 249(1): 786 - 791. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916409008935> (Acceso noviembre 2021).
- Ebeling, J., Rishel, K., & Sibrell, P. (2005). Screening and evaluation of polymers as flocculation aids for the treatment of aquacultural effluents. Revista de Ingeniería Acuicola. 33(4), 235-49. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144860905000221> (Acceso septiembre 2021).
- Eugene, F. (1988). Agua y salud humana. Organización Panamericana de la Salud. Editorial Limusa S.A. Traducido por Edward Cruz Quevedo. México
- Feria, J., Bermúdez, S., & Estrada, M. (2014). Eficiencia de la semilla Moringa Oleífera como coagulante natural para la remoción de la turbidez del río Sinú. Revista Producción + Limpia. 9(1), 9-22. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5001920> (Acceso octubre 2021).
- Fúquene, D., & Yate, A. (2018). Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. Working Papers, ECAPMA. 2(1), 1-7. <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.2771>
- Gaikwad, V., & Munavalli, G., (2019). Eliminación de la turbidez mediante coagulación convencional y lastrada con coagulantes naturales. Revista de la ciencia aplicada del agua, 130, 2-9.



- Gómez, N. (2005). Remoción de materia orgánica por coagulación/floculación. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Universidad Nacional de Colombia. Disponible en: <http://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2841> (Acceso septiembre 2021).
- Gutiérrez, H., & Vara, R. (2012). Análisis y diseño de experimentos. Tercera edición, McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V. México. 506 p.
- Herrera, M. E. (2015). Evaluación del almidón de papa como floculante para el tratamiento de aguas residuales domésticas. @ Limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria, 13(2), 123-135. <https://doi.org/10.24054/16927125.v2.n2.2015.1877>
- Hurtado, A. (2019). Polisacáridos del gel de Aloe vera I. como floculante en tratamiento de aguas. UNSAAC. Disponible en: <http://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/UNSAAC/5093> (Acceso septiembre 2021).
- INEI. (2019). Perú: formas de acceso al agua y saneamiento básico. Disponible en: [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/boletin\\_a\\_gua\\_nov2019.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/boletin_a_gua_nov2019.pdf) (Acceso septiembre 2021).
- Jhorvys, V. (2018). Eficacia de un coagulante a base de aloe vera para el tratamiento primario de aguas residuales domésticas. Moyobamba, 2018. [Tesis de título, Universidad César Vallejo]. Repositorio de la Universidad César Vallejo. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/31614> (Acceso septiembre 2021).
- Juram, J., & Gryna, F. (1983). Manual de control de calidad. Editorial Reverté, España. 159 p.
- Kumar, M. S., Krishna, G. G., & Sivasankar, V. (2015). Coagulation performance evaluation of natural and synthetic coagulants in waste water treatment. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 10(6), 2714-2717. Disponible en: [http://www.arnjournals.com/jeas/research\\_papers/rp\\_2015/jeas\\_04\\_15\\_1820.pdf](http://www.arnjournals.com/jeas/research_papers/rp_2015/jeas_04_15_1820.pdf) (Acceso noviembre 2021).
- Mandar, M., Mitesh, P. (2009). Extracción, purificación e identificación de gel de aloe de Aloe vera (*Aloe barbadensis Molinero*). Trade Science Inc. 5(3), 111-115. Disponible en: <https://www.tsijournals.com/abstract/extraction-purification-and-identification-of-aloe-gel-from-aloe-vera-aloe-barbadensis-miller-4596.html> (Acceso septiembre 2021).
- Marcó, L., Azario, R., Metzler, C., Garcia, M. (2004). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina). Revista de Higiene y Sanidad Ambiental. 4(1), 72-82. Disponible en: [https://saludpublica.ugr.es/sites/dpto/spublica/public/inline-files/bc510156890491c\\_Hig.Sanid\\_Ambient.4.72-82\(2004\).pdf](https://saludpublica.ugr.es/sites/dpto/spublica/public/inline-files/bc510156890491c_Hig.Sanid_Ambient.4.72-82(2004).pdf) (Acceso noviembre 2021).
- Moreno, S. (2016). Disminución de la turbidez del agua del río Crisnejas en la comunidad de Chuquibamba-Cajabamba utilizando Opuntia ficus indica, Aloe vera y Caesalpinia spinosa. [Tesis para título, Universidad de César Vallejo]. Repositorio de la Universidad de César Vallejo. Disponible en: [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/6854/moreno\\_ps.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/6854/moreno_ps.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (Acceso octubre 2021).
- Muñoz, O., Leal, X., Quitral, V., & Cardemil, L. (2015). Extracción, caracterización y propiedades del gel de aloe vera (*Aloe barbadensis Miller*) Cultivado en Chile. 4(3), 1-7.
- Nougbo, E., Sessou, P., Alassane, A., YOussao, A., Agbangnan, P., Mama, D., & Sohounhlo, C. (2016). Evaluación de Aloe vera gel de hoja como floculante natural: cribado fitoquímico y eliminación de turbidez Ensayos de agua por coagulación y floculación. Revista de investigación de ciencias actuales. 1, 9-15.
- Orellana, J. (2014). Tratamiento de las aguas, unidad temática número seis. Ingeniería sanitaria. Chile.
- Ramírez, H., & Jaramillo, J. (2015). Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua. Universidad Militar Nueva Granada, Colombia, Revista Facultad de Ciencias Básicas, 11(2), 136-153. Disponible en: <http://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/view/1303>
- Razuri, K. (2017). Disminución del contenido de la DBO5 y la DQO mediante coagulantes naturales (Aloe Vera L. y Opuntia ficus indica) en las aguas del canal de regadío E-8 Chuquitanta – San Martín de Porres. [Tesis para título, Universidad César Vallejo]. Repositorio de la Universidad César Vallejo. Disponible en: [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/3588/Razuri\\_MKE.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/3588/Razuri_MKE.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (Acceso septiembre 2021).
- Rodríguez, J., García, C., & García, J. (2016). Enfermedades transmitidas por el agua y saneamiento básico en Colombia. Revista de salud pública, 18(5), 738-745. <https://doi.org/10.15446/rsap.v18n5.54869>

- Rodriguez, M R. (2003). Desarrollo y Validación de modelos matemáticos para la predicción de vida comercial de productos cárnicos. [Tesis, Universidad de Córdoba – Colombia]. Repositorio de la Universidad de Córdoba. Disponible en: <https://helvia.uco.es/handle/10396/218> (Acceso noviembre 2021).
- Rojas, S., & Sastoque, Y. (2007). Desarrollo de un prototipo de un instrumento nefelométrico para medir turbidez. Universidad de San Buenaventura, Bogotá.
- Salett, M., & Hein, N. (2004). Modelación matemática y los desafíos para enseñar matemática. Educación matemática, 16(2), 105-125. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/405/40516206.pdf> (Acceso septiembre 2021).
- Schweizer, M. (1994). Aloe Vera, La planta que cura. Traducido por Ascolies Anna, París, Francia. Copyright by APB.
- Serrano, J. C. (2013). Comparación de métodos para determinar los parámetros de Weibull para la generación de energía eólica. Scientia et technica, 18(2), 315-320. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/849/84929153004.pdf> (Acceso octubre 2021).
- Soto-Conde, J. N. (2016). Estimación objetiva de la dispersividad en suelos arcillosos en el ensayo de pinhole basada en una carta de colores y valores cuantitativos de turbidez. Universidad Católica de Colombia. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/14157> (Acceso septiembre 2021).
- Suárez, A. (2017). Método de superficies de respuesta (MSR) para procesos de optimización aplicado a la filtración de lodos provenientes del sedimentador primario de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). [Tesis, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio de tesis digitales. Disponible en: <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/6161> (Acceso octubre 2021).
- Tejaswinee, A. (2016). Tratamiento de jugo de aloe vera en agua por el proceso de coagulación -floculación. Revista Internacional de Tecnologías Emergentes en Investigación de Ingeniería (IJETER), 4, 70-73.
- Terrones, L. (2019). Determinación de la eficiencia de floculación en la mezcla de (Aloe vera y citrus reticulata) para la disminución de la turbidez en las aguas del río chico, del distrito de San Silvestre de Cochán, provincia de San Miguel, región Cajamarca – 2018. [Tesis, Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo]. Repositorio de la Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo. Disponible en: <http://repositorio.upagu.edu.pe/bitstream/handle/UPAGU/1007/DETERMINACI%c3%93N%20DE%20LA%20EFICIENCIA%20DE%20FLOCULACI%c3%93N%20EN%20LA%20MEZCLA%20DE%20%28ALOE%20V%20Y%20CITRUS%20RETICULATA%29%20PARA%20LA%20D.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Acceso noviembre 2021).
- Tucanes, M. (2019). Uso de gel de sábila (Aloe Vera) y nopal (Opuntia ficus-indica) como floculantes naturales para la clarificación de jugo de caña en la elaboración de panela. [Tesis, Universidad Politécnica Estatal del Carchi]. Repositorio de la Universidad Politécnica Estatal del Carchi. Disponible en: <http://repositorio.upec.edu.ec/bitstream/123456789/878/1/010%20Uso%20de%20gel%20de%20s%20C3%A1bila%20y%20nopal%20como%20floculantes%20naturales%20para%20la%20clarificaci%20C3%B3n%20de%20jugo%20de%20ca%20C3%B1a.pdf> (Acceso octubre 2021).
- Vega, A., Ampuero, N., Díaz, L., & Lemus, R. (2005). El Aloe vera (*Aloe barbadensis miller*) como componente de alimentos funcionales. Revista Chilena de nutrición. 32(3), 208-214. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182005000300005>
- Vielman, R. E. (2019). Determinación del pH óptimo de coagulación, mediante los coagulantes sulfato de aluminio y sulfato ferroso de las aguas residuales de una industria de alimentos. [Tesis, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/326018378.pdf> (Acceso septiembre 2021).
- Villabona Ortiz, Á., Paz Astudillo, I. C., & Martínez García, J. (2013). Caracterización de la Opuntia ficus-indica para su uso como coagulante natural. Revista Colombiana de Biotecnología, 15(1), 137-144. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-34752013000100014](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752013000100014) (Acceso octubre 2021).