

**“UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL
PERÚ”**

**ESCUELA DE POSGRADO
UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA QUÍMICA**



TESIS

**EVALUACIÓN DE RESIDUOS TEXTILES COMO
COAGULANTES BINARIOS PARA LA REMOCIÓN DE LA
TURBIDEZ EN AGUA RESIDUAL SINTÉTICA**

**PRESENTADA POR:
JIMI RAÚL REYES LÓPEZ**

**PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA QUÍMICA AMBIENTAL**

Huancayo – Perú

2022



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

BACHILLER: JIMI RAUL REYES LOPEZ.

Siendo las quince horas con treinta minutos, del día viernes catorce del mes de enero del año dos mil veintidós, en la sala virtual de la plataforma Microsoft Teams de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Centro del Perú; con la presencia del jurado examinador, conformado por los catedráticos:

PRESIDENTE : Dr. Andrés C. ROJAS QUINTO.
SECRETARIO : Dr. Wilder E. EUFRACIO ARIAS.
ASESOR : Dr. Pascual V. GUEVARA YANQUI.
VOCAL (01) : Dr. Pascual V. GUEVARA YANQUI.
VOCAL (02) : Dr. Iván L. OSORIO LOPEZ.
VOCAL (03) : Dr. César A. LOAYZA MORALES.

Se reunieron para la sustentación virtual, oral y pública de la Tesis para optar el grado Académico de MAESTRO en INGENIERÍA QUÍMICA AMBIENTAL, del Bachiller **JIMI RAUL REYES LOPEZ.**

Después de darse lectura al Expediente N° 116602, en el que consta el cumplimiento de todas las disposiciones reglamentarias, los señores miembros del jurado, recepcionaron la Tesis titulada:

"EVALUACIÓN DE RESIDUOS TEXTILES COMO COAGULANTES BINARIOS PARA LA REMOCIÓN DE LA TURBIDEZ EN AGUA RESIDUAL SINTÉTICA"

Y formuladas las preguntas, estas fueron defendidas y absueltas por el graduando.

Acto seguido el jurado procedió a la votación, el que dio como resultado el siguiente calificativo:

Vocal (01) :.. **16 (Bueno)**.....
Vocal (02) :.. **16 (Bueno)**.....
Vocal (03) :.. **16 (Bueno)**.....
PROMEDIO:..... 16 (Bueno).....

Siendo las... **16:40**...horas, se dio por concluido el acto de sustentación, firmando al pie los presentes.



Dr. Andrés C. ROJAS QUINTO
Presidente



Dr. Wilder E. EUFRACIO ARIAS
Secretario



Dr. Pascual V. GUEVARA YANQUI
(Vocal 1)



Dr. Iván L. OSORIO LOPEZ
(Vocal 2)



Dr. César A. LOAYZA MORALES
(Vocal 3)

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO

UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS

**EVALUACIÓN DE RESIDUOS TEXTILES COMO
COAGULANTES BINARIOS PARA LA REMOCIÓN DE
LA TURBIDEZ EN AGUA RESIDUAL SINTÉTICA**

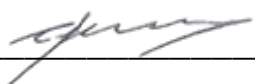
PRESENTADA POR:

JIMI RAÚL REYES LÓPEZ

**PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA QUÍMICA AMBIENTAL**

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

PRESIDENTE:



Dr. Andrés Corcino Rojas Quinto

SECRETARIO:



Dr. Wilder Efraín. Eufrazio Arias

PRIMER MIEMBRO:



Dr. Pascual Víctor Guevara Yanqui

SEGUNDO MIEMBRO:



Dr. Iván Luis Osorio López

TERCER MIEMBRO:



Dr. César Augusto Loayza Morales

ASESOR DE TESIS:



Dr. Pascual Víctor Guevara Yanqui

Huancayo, 14 de Enero de 2022

ASESOR:

Dr. PASCUAL VICTOR GUEVARA YANQUI

DEDICATORIA

A los ingenieros y docentes
que cada día le dedican su
tiempo y esfuerzo para
mejorar nuestra sociedad.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Escuela de Post Grado de la Facultad de Ingeniería
Química de la Universidad Nacional del Centro del Perú.

INDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	5
AGRADECIMIENTO	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	11
ÍNDICE DE FIGURAS	12
RESUMEN.....	14
ABSTRACT.....	15
INTRODUCCIÓN.....	12
CAPITULO I.....	14
MARCO TEÓRICO.....	14
1.1. <i>Antecedentes de la investigación</i>.....	14
1.2. <i>Bases teóricas y conceptuales</i>.....	20
1.2.1. <i>El agua: un recurso vital</i>	20
1.2.2. <i>Características físico-químicas del agua</i>.....	21
1.2.3. <i>Aguas residuales</i>.....	24
1.2.4. <i>Efectos de polución por las aguas residuales</i>	24
1.2.5. <i>Tipos de aguas residuales</i>.....	25
1.2.6. <i>Proceso de tratamiento de las aguas residuales</i>.....	27
1.2.7. <i>Coagulación - Flocculación</i>	29
1.2.8. <i>Características de las aguas residuales coloidales</i>	31
1.2.9. <i>Características de los contaminantes minerales</i>.....	32

1.2.10.	Características de los coagulantes.....	33
1.2.11.	Características físico-químicas del sulfato de aluminio y de hierro	34
1.2.12.	Utilización de coagulantes y floculantes en el tratamiento de aguas residuales	36
1.2.13.	Aguas residuales sintéticas.....	36
1.2.14.	Problemas y perspectivas de la reutilización de residuos textiles.....	37
1.2.15.	Tipos de aditivos utilizados en diferentes áreas de la industria.....	39
1.2.16.	Tipos y propiedades de las fibras de origen natural	40
1.2.17.	Fibras de origen sintético - Nylon 6.....	41
1.2.18.	Método de Superficie de Respuesta (MSR)	42
1.2.19.	Método de análisis factorial.....	45
1.3.	Definición de términos básicos.....	46
1.4.	Hipótesis de investigación.....	47
1.4.1.	General	47
1.4.2.	Específicas.....	48
1.5.	Operacionalización de variables	48
CAPÍTULO II DISEÑO METODOLÓGICO.....		50
2.1.	Nivel de Investigación	50
2.2.	Tipo de Investigación:	50
2.3.	Método y diseño de la Investigación:.....	50
2.4.	Población y Muestra	51
2.5.	Técnicas e instrumentos de recopilación de datos.....	52
2.5.1.	Procedimiento para la preparación del agua residual sintética.....	52

2.5.5.	Técnica de procesamiento de datos	55
CAPÍTULO III		56
3.1.	Resultados	56
3.1.1.	Datos de operación a considerar en los experimentos	56
3.1.1.1.	Implementación del diseño factorial 2k para la disminución de la concentración del coagulante sulfato de aluminio con la utilización de fibra textil natural	65
3.1.1.2.	Análisis de los efectos principales para la eficiencia de remoción de turbidez 71	
3.1.1.3.	Gráfica de cubos con las medias ajustadas sobre la Eficiencia de remoción de turbidez del agua residual sintética	72
3.1.1.4.	Análisis de las gráficas de superficie de respuesta	72
3.1.1.5.	Implementación del diseño factorial 2k para la disminución de la concentración del sulfato de aluminio con la utilización de fibra textil sintética	75
3.1.1.6.	Análisis de los efectos principales para la eficiencia de remoción de turbidez 79	
3.1.1.7.	Análisis de las interacciones de las variables independientes sobre la eficiencia de remoción de la turbidez	80
3.1.1.8.	Gráfica de cubos con las medias ajustadas sobre la Eficiencia de remoción de turbidez del agua residual sintética	81
3.1.1.9.	Análisis de las gráficas de superficie de respuesta	83
3.2.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	88
CONCLUSIONES		90

RECOMENDACIONES	92
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
ANEXO 1	97
ANEXO 2	98
ANEXO 3	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Impacto ambiental de los contaminantes	25
Tabla 2: Composición típica de las aguas residuales domésticas	26
Tabla 3: Densidad y dispersión de partículas contaminantes de las aguas residuales	32
Tabla 4: Solubilidad de sulfatos de aluminio y de hierro en el agua	35
Tabla 5: Densidad de las soluciones acuosas de sulfato de aluminio y de hierro en el agua	35
Tabla 6: Valores de pH de las soluciones acuosas del sulfato de aluminio y de hierro	35
Tabla 7: DOE superficie de respuesta	51
Tabla 8: DOE factorial 2*3.....	51
Tabla 9: Valores de dosificación de la arcilla para la preparación de un litro de agua residual sintética.....	53
Tabla 10: Tabla de orden experimental con valores de las variables independientes	58
Tabla 11: Tabla de factores con el dominio experimental	66
Tabla 12: Matriz de diseño y plan de experimentación	67
Tabla 13: Factores y dominio experimental.....	76
Tabla 14: Matriz de diseño	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Enlace de los coágulos por acción de las fibras textiles	14
Figura 2: Ecuación de superficie de respuesta.....	43
Figura 3: Superficie de respuesta	43
Figura 4: Factores y niveles de la Metodología Superficie de Respuesta	57
Figura 5: Diagrama de Pareto del pH con el sulfato de aluminio.....	59
Figura 6: Análisis de varianza para la validación del modelo de regresión	60
Figura 7: Ecuación de regresión de la eficiencia de remoción de la turbidez en función del pH y concentración del sulfato de aluminio.	60
Figura 8: Efectos principales para la eficiencia de remoción de turbidez	61
Figura 9: Interacción de las variables pH y concentración de sulfato de aluminio sobre la eficiencia de remoción de la turbidez.....	61
Figura 10: Gráfica de contornos.....	62
Figura 11: Gráfica de superficie de respuesta tridimensional en la que se observa la eficiencia de remoción esperada de turbidez en función de las cantidades de sulfato de aluminio y pH.....	63
Figura 12: Gráfica de optimización a pH 5.....	64
Figura 13: Gráfica de optimización a pH 7.....	64
Figura 14: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados	68
Figura 15: Análisis de varianza	69
Figura 16: Análisis de varianza después del ajuste de variables.....	69
Figura 17: Resumen del modelo de regresión.....	70
Figura 18: Ecuación de regresión	71
Figura 19: Gráfica de efectos principales para la eficiencia de remoción de turbidez	71
Figura 20: Gráfica de cubos de la eficiencia de remoción de turbidez	72
Figura 21: Gráfica de superficie de respuesta para la eficiencia de remoción de la turbidez	73
Figura 22: Gráfica de optimización de la eficiencia de remoción de la turbidez.....	73
Figura 23: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.....	77
Figura 24: Análisis de varianza	78
Figura 25: Resumen del modelo de regresión.....	79

Figura 26: Ecuación de regresión	79
Figura 27: Gráfica de efectos principales para la eficiencia de remoción de turbidez	80
Figura 28: Interacciones de las variables independientes	81
Figura 29: Gráfica de cubos de la eficiencia de remoción de turbidez	82
Figura 30: Gráfica de superficie de respuesta para la eficiencia de remoción de la turbidez	84
Figura 31: Gráfica de optimización de la eficiencia de remoción de la turbidez	84

RESUMEN

El propósito de la investigación es evaluar los efectos de la utilización de un coagulante binario en la remoción de la turbidez de muestras de agua residual sintética a nivel de laboratorio, con el control del pH y de las RPM de la mezcla, utilizando como agente auxiliar para la mejora del proceso de coagulación-floculación las fibras de residuos textiles, teniendo como resultado la disminución de la concentración del coagulante manteniendo la eficiencia de remoción de la turbidez. La investigación tiene un diseño experimental del tipo aplicada. En una primera fase se implementó la metodología de superficie de respuesta para encontrar los valores de pH y concentración del coagulante necesarios para la remoción de la turbidez del agua residual sintética con valores de 200 NTU, obteniéndose como resultado valores de remoción que superan el 96% de eficiencia, luego, con estos valores se construyó un modelo factorial 2^3 , con las variables de pH, concentración del sulfato de aluminio y con la longitud de fibra de residuos textiles obteniendo como resultado la remoción de la turbidez del agua residual sintética manteniendo los valores de eficiencia cercanos a los valores de la primera experimentación que sirvieron de datos base con una disminución de la concentración del coagulante en 30%.

Se logró demostrar que la utilización de fibras de los residuos textiles tiene efecto en el proceso de coagulación-floculación mejorando la adhesión de las partículas coaguladas durante el proceso de formación de los flóculos y de tal forma disminuyendo la concentración del sulfato de aluminio.

Palabras clave: *coagulación, floculación, reutilización, residuos textiles, eficiencia de remoción, agua residual sintética, turbidez.*

ABSTRACT

The purpose of the research is to evaluate the effects of the use of a binary coagulant in the removal of turbidity from synthetic waste water samples at the laboratory level, with pH control and using as an auxiliary agent for the improvement of the coagulation-flocculation process the textile waste fibers, resulting in the decrease of the coagulant doses while maintaining the efficiency of turbidity removal. The research has an experimental design of the applied type. In a first phase, the response surface methodology was implemented to find the pH values and coagulant concentration necessary for the removal of the turbidity of the synthetic wastewater with values of 200 NTU, obtaining as a result removal values that exceed 95% of efficiency, then, with these values, a 2 * 3 factorial model was constructed, with the pH variables, concentration of aluminium sulfate and fiber length of textile waste resulting in the removal of turbidity of synthetic wastewater maintaining efficiency values close to the values of the first experiment that served as base data and decreasing the concentration of coagulant in 30 and 50%.

It was demonstrated that the use of textile waste fibers has an effect on the coagulation-flocculation process by improving the adhesion of coagulated particles during the floc formation process and thus decreasing the concentration of aluminium sulfate.

Keywords: *coagulation, flocculation, reuse, textile waste, removal efficiency, synthetic wastewater, turbidity.*

INTRODUCCIÓN

En el mundo actual, el crecimiento de la población y de las ciudades generan un intensivo consumo de los recursos, también las industrias, el uso de fármacos, productos de limpieza, así como las prácticas agrícolas y el calentamiento global, generan un agotamiento progresivo del recurso hídrico originando una insostenibilidad mundial.

La turbidez es uno de los parámetros que tiene gran significancia en el control de la calidad de los cuerpos hídricos. Los sólidos disueltos y en suspensión, en el agua turbia actúan como portadores de la contaminación, que pueden ser del tipo microbiológico, químico con la adhesión de metales pesados y orgánico como los pesticidas.

La coagulación química es un proceso básico y muy utilizado en el tratamiento del agua superficial y de aguas residuales domésticas e industriales, este proceso actualmente se considera convencional y se implementa para desestabilizar suspensiones coloidales; para precipitar la materia orgánica y especies inorgánicas y luego eliminarlas mediante la sedimentación o filtración. Este proceso se lleva a cabo generalmente con la adición de sales inorgánicas gracias al poder de cada especie a disminuir el potencial eléctrico (zeta) de las partículas coloidales.

El aluminio es el elemento metálico más abundante y constituye alrededor del 8% de la corteza terrestre. Es frecuente la utilización de sales de aluminio en el tratamiento de aguas como coagulantes para reducir el color, la turbidez, el contenido de la materia orgánica y de microorganismos. Este uso puede incrementar la concentración de aluminio en los cuerpos receptores, pudiendo llegar hasta el consumo humano. Una de las enfermedades que ha sido asociada a la ingesta de aluminio es el Alzheimer y se corre el riesgo de desarrollar otros padecimientos.

(Castellares, 2015)

También en la actualidad se tiene el problema de la generación de diferentes residuos industriales, como es el caso de la industria textil, la cual genera residuos de distintos tipos como naturales y artificiales que hasta la fecha no se ha encontrado un uso y por ello se desechan en los rellenos sanitarios, ocupando un gran espacio y reduciendo su vida útil.

En vista de esto, resulta importante realizar un estudio para poder dar un reuso a los desechos textiles y a la vez, disminuir la concentración del sulfato de aluminio para remover la contaminación, siendo el parámetro de estudio en esta investigación la turbidez de muestras de agua residual sintética, con la finalidad de dar una opción de reutilización de los residuos textiles y disminuir la cantidad del coagulante suscitando un menor impacto sobre el medio ambiente generando menores gastos en la adquisición de las sales de aluminio para el tratamiento de las aguas residuales.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes de la investigación

Cornejo (2014), en su trabajo de investigación: “Propiedades de la composición en base a cauchos sintéticos con aditivos anisotrópicos”, tiene como objetivo determinar las características de la coagulación utilizando fibras de residuos textiles para la mejora del proceso de coagulación en el proceso de síntesis del caucho sintético. En el proceso se utilizaron tres coagulantes en base al amonio cuaternario para la coagulación del caucho presente en el látex, se añadieron fibras de residuos textiles naturales como sintéticos a longitudes de 5 y 10 milímetros para estudiar los enlaces que se generan durante el proceso de coagulación de las partículas suspendidas en el látex, se trabajó con valores de pH cercanos a 3 que es parte del proceso productivo del caucho, utilizando el sulfuro de hidrogeno para llegar al pH deseado. Se determino durante el proceso de coagulación que el pH con valores ácidos ayuda a la hidrolización del residuo textil, mejorando las propiedades coagulantes de las sales de amonio. Se menciona en la tesis que la adición de fibras textiles mejora las propiedades del coagulo originando mayores tamaños y haciendo más rápida la decantación de los flóculos, también la dosificación del coagulante disminuyó hasta un 50% sin afectar las propiedades del caucho y por el contrario, dándole mejores características de resistencia y elasticidad. En la figura 1 se muestra cómo enlazan las fibras los coágulos formando flóculos de mayor tamaño.



Figura 1: Enlace de los coágulos por acción de las fibras textiles

Fuente: (Cornejo, 2014)

Castellares (2015), en su trabajo de investigación: “Efectos del polihidroxicloruro de aluminio, velocidad de agitación y pH en la turbidez del agua del río Shullcas-Huancayo, 2013” en el trabajo se determina los efectos del polihidroxicloruro de aluminio, la velocidad de agitación y pH en la turbidez del agua del río Shullcas para su aplicación en el tratamiento de agua potable para mejorar la turbidez. Se aplicó un diseño factorial de 2×3 con la dosificación de agente coagulante de 10 a 50 ml., con una velocidad de agitación de 50 a 100 rpm y un valor de pH de 6 y 7, encontrando como resultado que estas tres variables independientes tienen efectos significativos sobre la remoción de la turbidez, logrando resultados de remoción del 86,67%. También se menciona en el trabajo que los coagulantes metálicos como el alumbre y las sales de fierro han sido los más empleados en la clarificación del agua. Estos productos actúan como coagulantes y floculantes a la vez. Añadidos al agua forman especies cargadas positivamente en el intervalo de pH típico para la clarificación que va entre 6 y 7. Los coagulantes metálicos son muy sensibles al pH y a la alcalinidad. Si el pH no está dentro del rango adecuado, la clarificación es pobre y pueden solubilizarse, disminuyendo los resultados de remoción de contaminantes. El presente trabajo de investigación aporta con información de las velocidades de agitación durante el proceso de coagulación y también con la aplicación de un modelo factorial para experimentos de tratamiento de aguas con tres variables independientes.

Pérez (2017), en su trabajo de investigación: “Evaluación de la sustitución del agente coagulante – sulfato de aluminio – en el proceso actual de coagulación-floculación de agua potable en la empresa EAF SAS ESP” tiene como objetivo evaluar la sustitución de un agente coagulante en el proceso de coagulación – floculación en la potabilización de agua en la empresa EAF SAS ESP. Se eligen tres tipos de coagulantes para la sustitución del sulfato de aluminio, teniendo en cuenta las características como el tipo de agua cruda, el rango de pH, formación de flóculos.

Se realizaron pruebas de jarras para seleccionar los coagulantes con las mejores dosis que permitan obtener la mejor remoción de la turbiedad y color. Como resultado se obtuvo que el sulfato férrico y el cloruro férrico ofrecen mayores remociones en el agua cruda respecto a las sales de aluminio. El presente trabajo aporta con información de los tiempos de retención hidráulica de la mezcla, los rpm en el momento de la experimentación, preparación de las soluciones madres al 1 y 10% de los reactivos químicos.

Portilla (2017), en su trabajo de investigación: "Determinación de las curvas características de la sedimentación tipo II con diferentes coagulantes comerciales a nivel de laboratorio" tiene como objetivo realizar el montaje experimental en laboratorio, con la preparación del agua problema y la torre de sedimentación. Los coagulantes utilizados en el trabajo son el cloruro férrico, sulfato de aluminio, la experimentación se realizó llenando la torre, con una altura de 175 cm, completando con la dosis de coagulante, se realizaba la mezcla en un tiempo de 1 minuto y 25 minutos, una vez terminadas las mezclas se tomaban los datos arrojados de turbiedad, para diferentes rangos de tiempo comprendidos entre 0 y 120 minutos, los resultados se pasaron a porcentaje de remoción. El trabajo contribuyó con la comparación de los agentes coagulante a utilizar, los tiempos de mezcla, las eficiencias de remoción y con datos para la elaboración del agua residual sintética a nivel de laboratorio.

Medina (2021), en su trabajo de investigación: "Evaluación de los coagulantes sulfato de aluminio y policloruro de aluminio para reducir la turbiedad del agua de procesos para una planta piloto de flotación" tiene como objetivo evaluar y comparar el comportamiento de los reactivos coagulantes sulfato de aluminio tipo A y policloruro de aluminio, en el tratamiento de agua, para disminuir su nivel de turbidez a menos de 25 NTU. Se trabajo en el proyecto con 144 litros de agua residual, se

implementaron 6 pruebas de jarras para el sulfato de aluminio tipo A y 6 pruebas de jarras para el policloruro de aluminio con capacidad de 2 litros para cada jarra, la concentración inicial de turbiedad fue de 142.5 NTU, se aplicaron dosis de los coagulantes hasta encontrar la óptima. Se obtuvo como resultado las dosificaciones del sulfato de aluminio 60 ppm y para el policloruro de aluminio 50 ppm. La presente investigación contribuyo con información sobre las dosificaciones del coagulante sulfato de aluminio del tipo A que ayudaron a remover la turbidez del agua.

Tafur (2017), en su trabajo de investigación: "Evaluación del cloruro férrico y sulfato de aluminio, como coagulantes en el proceso de potabilización, en términos de turbidez y potencial de hidrógeno, de las aguas de la quebrada Rumiayacu, distrito de Moyobamba" tiene como objetivo comparar el sulfato de aluminio y cloruro férrico para la remoción de turbidez; evaluando como varia el potencial de hidrogeno, con el propósito de determinar cuál de estos dos coagulantes tiene mejores características en el tratamiento. En los ensayos se realizaron pruebas a distintos rpm y tiempos de mezcla para los dos coagulantes. Se obtuvieron como resultados las dosis óptimas para el sulfato de aluminio al 1% es de 1 ml para 500 ml de agua de la quebrada, y para el cloruro férrico al 1% es de 6ml para 500 ml de agua. Se determinó que el sulfato de aluminio es un excelente coagulante variando ligeramente el pH de las muestras de agua y llegando a resultados de casi el 100% de remoción de la turbidez, también se determinó que el sulfato de aluminio no altera el color del agua tratada en comparación del cloruro férrico.

La presente investigación contribuyó con datos para la elección del tipo de coagulante a utilizar, determinándose utilizar el sulfato de aluminio como mejor opción para realizar las pruebas de remoción de turbidez para luego aplicar el coagulante binario en el agua residual sintética.

Hu et al. (2022), en su artículo de investigación: “COD removal of wastewater from hydrothermal carbonization of food waste: Using coagulation combined activated carbon adsorption”, estudió la coagulación combinada con carbón activado en la etapa final de tratamiento para reducir la DQO en las aguas residuales hidrotermales. Los resultados experimentales indicaron que las sales de fierro y aluminio como también la poliacrilamida son coagulantes óptimos, con dosis de 6 mg/L, 10 mg/L y 30 ml/L respectivamente. Se obtuvieron como resultados la eliminación del DQO hasta un 68.41%, la carbamida, calcio, magnesio y otros compuestos inorgánicos se pudieron remover con una eficiencia del 89%. Se concluyó que el tratamiento de adsorción combinado con la coagulación se puede considerar como un método prometedor en el tratamiento de las aguas residuales industriales. El presente trabajo aportó en la investigación con datos de la disminución de la DQO y remoción de otros contaminantes presentes en las aguas residuales con la utilización del sulfato de aluminio, lo que refuerza la elección de este coagulante para la experimentación.

Tunc (2020), en su artículo de investigación: “Co-pretreatment of Municipal Wastewater and Landfill Leachate by Chemical Coagulation Using Ferric Chloride and Aluminum Sulfate” se investigó el co-pretratamiento de aguas residuales municipales y lixiviados de vertederos mediante coagulación con cloruro férrico y sulfato de aluminio. Se examinaron los efectos de las condiciones operativas sobre el rendimiento del proceso, que incluyeron el pH, el tipo de coagulante y la dosis del mismo. Para ambos coagulantes se obtuvo la mejor eficiencia de tratamiento con el pH de 5, a este valor las eficiencias de remoción del DQO, STS y turbidez fueron de 82%, 99% y 99% respectivamente. El presente trabajo de investigación contribuyó con datos operativos para el proceso de coagulación con el sulfato de aluminio.

Yahia et al. (2021), en su artículo de investigación: "Modeling and optimizing of coagulation–flocculation process by response surface methodology for rehabilitation of tannery wastewater treatment plant", buscaron optimizar los parámetros operativos de coagulación-floculación utilizando quitosano como coagulante para alcanzar una tasa de reducción satisfactoria de la DQO, cloruro y materiales en suspensión a un pH alcalino. Este proceso se sugiere como pretratamiento antes del tratamiento biológico y se realiza un estudio adicional de comparación con el sulfato de aluminio. En la primera parte se aplicó un diseño de nueve factores para determinar el más significativo, luego se aplicó la metodología de superficie de respuesta para optimizar las respuestas, obteniendo las reducciones más significativas para el DQO de 95%, se determinó que el quitosano es un coagulante ecológico eficiente, que permite reducir los costos de tratamiento. El presente trabajo contribuyó con información de la implementación de la metodología de superficie de respuesta para optimización de variables en el tratamiento de aguas.

Vuppala et al. (2021), en su artículo de investigación: "Multi-Response Optimization of Coagulation and Flocculation of Olive Mill Wastewater: Statistical Approach", en este trabajo de investigación el objetivo es introducir la técnica de optimización de respuestas al proceso de coagulación y floculación para seleccionar la dosis óptima de coagulante. El proceso de coagulación y floculación se realizó mediante la adición de sulfato de aluminio en diferentes dosis desde los 100 a 2000 ppm, para encontrar la dosificación óptima en la remoción de DQO, fenoles y turbidez en el agua residual. Se obtuvieron como resultados óptimos la dosificación del coagulante 600 ppm con eficiencias de remoción de la turbidez, DQO, carbono total y fenoles de 96.31%, 64.63%, 23.77% y 66.15% respectivamente. Se concluyó que el método de superficie de respuesta es una herramienta útil para optimizar las condiciones de operación, como las dosis del coagulante, los tiempos de mezcla y la velocidad de agitación, que son procesos afectados por respuestas multiparamétricas. El

presente estudio apporto con información del manejo de la metodología de superficie de respuesta optimizando los parámetros de operación que también se utilizara en la presente tesis.

1.2. Bases teóricas y conceptuales

1.2.1. El agua: un recurso vital

El agua es un recurso vital para mantener y preservar todo tipo de vida en el planeta, como plantas, animales y seres humanos. Los científicos durante muchos siglos continúan realizando investigaciones, encontrando nuevos hechos interesantes. El agua participa en la formación del clima, para muchos organismos vivos es su habidad y no se puede subestimar su importancia. No es casualidad que a nuestro planeta se le llame azul, porque es agua que cubre el 71% de la superficie terrestre. Una molécula de agua consta de un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrogeno, que están unidos por un enlace covalente. Ningún otro elemento de la tabla periódica cuando se combina forma líquido. De todas las sustancias que existen en la tierra, solo el agua puede tener tres estados de agregación diferentes: liquido, gaseoso y sólido. Gracias a los tres estados de agregación se produce el ciclo del agua en la naturaleza y la vida en la tierra. A temperaturas cercanas al punto de congelación, las moléculas de agua líquida se juntan en pequeños grupos, al igual que en los cristales. A temperaturas cercanas al punto de ebullición, se ubican más libremente. Hay propiedades inusuales, por ejemplo, el agua sólida es más liviana que la liquida y el hielo no se hunde en el agua. En estado sólido, las partículas de agua están dispuestas en orden, hay mucho espacio libre entre ellas. Cuando el hielo se derrite, la actividad de las partículas aumenta, el espacio libre se llena. La forma líquida se vuelve más pesada que la sólida. Esta habilidad única hace posible que cualquier cuerpo de agua no se congele en toda su profundidad. Incluso en las heladas más severas, la temperatura del agua de los cuerpos superficiales en la

parte inferior no cae por debajo de los 4 grados, gracias a esto, los seres vivos como peces y otros pueden sobrevivir con seguridad durante el invierno más severo bajo el hielo. La capacidad calorífica y algunas otras propiedades físicas del agua también dependen de la temperatura de manera diferente. Otros tipos de líquidos no tienen tales características como las del agua, por lo que cualquier parámetro cambia de manera diferente a diferentes umbrales de temperatura. (Ramalho, 2021)

El agua forma la hidrósfera, se divide en océanos, aguas superficiales continentales, glaciares y masas de agua subterránea. Las transiciones del agua de una parte de la hidrósfera a otra conforman el complejo ciclo del agua en la tierra.

Todo ser vivo necesita agua. El agua está involucrada en absolutamente todos los procesos metabólicos y para que procedan normalmente, se debe de tener un suministro constante de agua de buena calidad, por ello, dado que el agua es esencial para la vida, la población tiene que tener un suministro de agua de alta calidad de acuerdo a los estándares establecidos propuestos de acuerdo a la realidad y normas de cada país. (García & Méndez, 2017)

1.2.2. Características físico-químicas del agua

Potencial de Hidrógeno pH. El pH es un parámetro que mide la concentración de los iones de hidronio presentes en el agua. El potenciómetro consta de un electrodo que genera una corriente eléctrica proporcional a la concentración de protones en solución y se mide con un galvanómetro. La corriente se puede convertir fácilmente a unidades de pH o MV usando diferentes procedimientos de calibración. (Tafur Bardales, 2018)

Turbiedad. La turbidez del agua es un indicador organoléptico visual de su seguridad y calidad. Las pruebas de laboratorio de muestras de diversas fuentes muestran el nivel de contaminación química y biológica solo después de un riguroso control analítico. La apariencia antiestética de un líquido turbio es inmediatamente

visible, por lo que naturalmente provoca el rechazo entre los usuarios domésticos y también de las industrias. La razón de la turbidez del agua en un grado u otro es la presencia en ella de partículas finas en suspensión que no tienen la capacidad de disolverse por completo. El tamaño de partículas finas está dentro del rango de 0.004 – 1 mm.

Existe una estrecha relación entre los conceptos de turbidez y transparencia, cuanto mayor es el primer indicador, menor es el segundo. Como regla general, las fuentes naturales incluyen arena, arcilla, limo, algas y microorganismos. Los elementos químicos inorgánicos están representados por compuestos de aluminio, sales de carbonato, óxidos de hierro y manganeso en forma coloidal. Materia orgánica: varios compuestos de carbono que forman manchas en la superficie del agua. El zooplancton, los microorganismos vegetales y las bacterias juegan un papel importante en el proceso de turbidez del agua. Para determinar el grado de turbidez del agua se necesita utilizar métodos que puedan pasar un rayo de luz a través del líquido. En una muestra totalmente transparente, permanece sin cambios, solo se dispersa ligeramente y tiene una ligera desviación del ángulo. Si hay partículas en suspensión en el agua, obstruirán el paso del rayo de luz de diferentes formas. Este hecho será registrado por un dispositivo reflectante. Hoy en día la turbidez del agua potable se puede determinar Fotométricamente, donde: turbidimetría, captura los rayos atenuados, y nefelometría, da como resultado el reflejo de la luz dispersa. (Tafur Bardales, 2018)

Temperatura. La temperatura del agua es uno de los factores más importantes para la supervivencia de los animales acuáticos. La mayoría de los organismos acuáticos se convierten en indicadores de temperatura del agua que los rodea. Sus procesos metabólicos están controlados por la temperatura del agua. Esta actividad metabólica es más eficaz en un rango de temperatura limitado. Si la temperatura es demasiada alta o demasiada baja, la productividad puede disminuir o la función

metabólica puede cesar. Estos extremos o límites que determinan la muerte varían de una especie a otra y determinan su tolerancia. La temperatura es muy importante para mantener una alta calidad del agua. Muchas propiedades físicas, químicas y biológicas del agua dependen de ella. La temperatura determina: La cantidad de oxígeno que se puede disolver en el agua; la actividad fotosintética de algas y plantas macrófitas; la tasa de procesos metabólicos en organismos acuáticos; la sensibilidad de los organismos a los desechos tóxicos, los parásitos y las enfermedades. (Ramalho, 2021)

Dado que el agua de un arroyo entra en contacto con el aire a través del impacto en la superficie, la temperatura del aire afecta el agua. Esta mezcla también puede aumentar la tasa de evaporación, cuanto mayor sea la superficie de contacto, más expuesta está a la radiación solar y al aire, debido al aumento de su superficie un arroyo ancho y poco profundo se calentará más rápido que un arroyo profundo y estrecho. (Bogotá et al., s. f.)

El color y la composición del suelo en un canal también afectan la velocidad a la que aumenta la temperatura del arroyo. Un canal rocoso oscuro admite más radiación solar en la corriente que un canal más claro. Además, la roca absorbe más calor que la grava también el flujo del agua en un arroyo afecta la temperatura. Cuanto más grande es la masa de agua, más lenta se calienta. En los ríos y arroyos grandes, la temperatura es más estable que en los arroyos poco profundos.

Las sustancias en suspensión en el agua pueden absorber, bloquear o reflejar algo de energía solar, dependiendo de su color y posición en el agua. Las partículas claras sobre o cerca de la superficie pueden tener un efecto positivo a través de la reflexión, pero las partículas de colores oscuros absorben más energía solar y calientan más el agua. Las aguas de los cuerpos receptores también se calientan por la escorrentía de las lluvias de las calles, estacionamientos y aceras. Además, la temperatura del agua de los ríos aumenta cuando se talan árboles a lo largo de

su cauce y se les priva de sombra.(Avellaneda Andrade, 2021)

Sólidos disueltos totales. Los sólidos disueltos totales, son sustancias que quedan después de filtrar y vaporizar la muestra en condiciones específicas. Los sólidos totales disueltos se determinan con el aumento de peso de la capsula tarada después de la evaporación de la muestra, luego se seca a peso constante a una temperatura de 180 grados centígrados. Los sólidos disueltos se pueden estimar a partir de la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos suspendidos totales. (Tafur Bardales, 2018)

1.2.3. Aguas residuales

Según (Tafur Bardales, 2018) las aguas residuales son aguas vertidas, que contienen residuos líquidos procedentes de la industria, asentamientos o actividades agrícolas. Las principales fuentes de aguas residuales son:

- Aguas domésticas/urbanas, entre el 65 y el 85%.
- Aguas residuales de la industria, las cuales dependen del tipo de industria, gestión de consumo de agua y grado de depuración que reciben antes del vertido.
- Aguas agrícolas que resultan del manejo de suelos y utilización de fertilizantes.
- El agua de lluvia, contiene concentraciones significativas de bacterias, elementos traza, petróleo y productos químicos orgánicos.

La composición de las aguas residuales se analiza con diversos métodos físicos, químicos y mediciones biológicas. Las medidas más comunes incluyen determinar el contenido de sólidos, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno.

1.2.4. Efectos de polución por las aguas residuales

Todas las aguas residuales tienen algún efecto sobre la calidad del agua de la fuente

o del cuerpo receptor de agua, la Tabla 1 muestra el impacto de los contaminantes importantes de las aguas residuales de acuerdo con (Bogotá et al., s. f.)

Tabla 1: Impacto ambiental de los contaminantes

Contaminantes	Parámetro típico de medida	Impacto ambiental
Materia orgánica biodegradable	DBO ₅ ,DQO	Desoxigenación del agua, generación de olores indeseables.
Materia suspendida	SST,SSV	Causa turbiedad en el agua, deposita lodos.
Patógenos	CF	Hace el agua insegura para consumo y recreación.
Amonio	+NH ₄ -N	Desoxigena el agua, es tóxico para organismos acuáticos y puede estimular el crecimiento de algas.
Fósforo	Orto fosfatos	Puede estimular el crecimiento de algas.
Materiales tóxicos	Como cada material tóxico específico	Peligroso para la vida vegetal y animal.
Sales inorgánicas	SDT	Limita los usos agrícolas e industriales del agua.
Energía térmica	Temperatura	Reduce la concentración de saturación de oxígeno en el agua, acelera el crecimiento de organismos acuáticos.
Iones hidrógeno	pH	Riesgo potencial para organismos acuáticos.

Fuente: (Bogotá et al., s. f.)

1.2.5. Tipos de aguas residuales

A. **Aguas Residuales Urbanas:** (Ramalho, 2021) Generado del uso doméstico. Las características y composición de estas aguas residuales varían dependiendo de varios factores como la cultura y el uso de los recursos. Se forman de:

- Del excremento humano: que contiene desechos sólidos y líquidos; agua de cocina, de los servicios higiénicos y de la limpieza.
- Redes de arrastre de lluvia tales como el hollín, polvo de ladrillo y cemento, esporas y polvo orgánico e inorgánico, material particulado, restos de hidrocarburos de la vía pública, residuos de vegetales y otros.
- Residuos industriales
- Limpieza pública y enjuague.

La composición de las aguas residuales urbanas está determinada por:

Sólidos: disoluciones orgánicas, inorgánicas, precipitables, disueltas y coloidales.

Gases: ácido sulfúrico, dióxido de carbono, metano y otros.

Líquidos: gasolina, alcoholes, etc.

La composición biológica puede ser animal como moho, bacterias, algas, virus según (Bogotá et al., s. f.)

Tabla 2: Composición típica de las aguas residuales domésticas

Parámetro	Unidades	Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales	mg/L	350	720	1200
Sólidos disueltos	mg/L	250	500	850
Sólidos disueltos volátiles	mg/L	105	200	325
Sólidos suspendidos	mg/L	100	220	350
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	80	165	275
Sólidos sedimentables	mg/L	5	10	20
DBO ₅	mg/L	110	220	440
COT	mg/L	80	160	290
DQO	mg/L	250	500	1000
Nitrógeno total	mg/L	20	40	85
Nitrógeno orgánico	mg/L	8	15	35
Nitrógeno amoniacal	mg/L	12	25	50
Nitritos	mg/L	0	0	0
Nitratos	mg/L	0	0	0
Fosforo total	mg/L	4	8	15
Fosforo orgánico	mg/L	1	3	5
Fosforo inorgánico	mg/L	3	5	10
Cloruros	mg/L	30	50	100
Alcalinidad	mg/L	50	100	200
Grasas	mg/L	50	100	150
Coliformes totales	NMP/100ml	10^6 - 10^7	10^7 - 10^8	10^8 - 10^9

Fuente: Romero Rojas Jairo Alberto, 2008, "Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y principios de diseño"

Fuente: (Bogotá et al., s. f.)

B. Aguas Residuales Industriales

Consisten en derrames de líquidos que suponen una amenaza inminente para el medio ambiente por la carga contaminante que transportan (Ramalho, 2021).

Haciendo una clasificación muy general de estas aguas tenemos:

- Efluentes con residuos minerales: contienen principalmente metales, compuestos halogenados y una serie de sustancias inorgánicas de alto nivel de toxicidad y peligrosidad. Se pueden encontrar en metalurgia, minería, industrias petroquímicas, etc. (... & 2012, s. f.)
- Efluentes con residuos orgánicos: como celulosa, taninos, compuestos azufrados

y clorados, etc., que son muy difíciles de biodegradar, y requieren un estricto control para su manipulación. Existen las industrias farmacéuticas y alimentaria. (Dyna & 2011, s. f.)

- Efluentes con residuos minerales y orgánicos: estos son el resultado de los dos anteriores, y además de tóxicos y peligrosos, necesitan un sistema de tratamiento mixto. (Dyna & 2011, s. f.)
- Efluentes con residuos de naturaleza radiactiva: son muy especiales y localizados en determinadas actividades industriales. Estos efluentes se producen utilizando materiales radiactivos como reactores nucleares, laboratorios médicos, etc. (Dyna & 2011, s. f.)
- Efluentes industriales que generan contaminación térmica: aquellos que, al ser insertados en el receptor, provocan un cambio de temperatura; es un peligro para la fauna y la flora acuáticas de acuerdo con (Bogotá et al., s. f.)

1.2.6. Proceso de tratamiento de las aguas residuales

Según (Bogotá et al., s. f.) El tratamiento de aguas residuales es un conjunto de medidas para eliminar los contaminantes contenidos en las aguas residuales domésticas e industriales antes de verterlas en los cuerpos de agua. El tratamiento de las aguas residuales se lleva a cabo en instalaciones de tratamiento especiales (PTARs).

En una primera etapa se realiza un tratamiento preliminar de las aguas residuales que ingresan a la planta de tratamiento con el fin de prepararlas para las siguientes etapas de tratamiento. En esta etapa se produce la retención de impurezas gruesas dispersas. Para la retención de grandes contaminantes de origen orgánico y mineral, se utilizan rejillas y para una separación más completa de impurezas gruesas – tamices (Ramalho, 2021). Luego el efluente pasa por trampas de arena, donde se depositan (arena, escoria, vidrios rotos, etc.) las partículas finas bajo la acción de la

gravedad y trampas de grasa, en las que se eliminan sustancias hidrofóbicas de la superficie del agua por flotación. Las arenas de las trampas de arena se suelen almacenar o utilizar en obras civiles. Los tanques de sedimentación primaria, donde el agua ingresa como siguiente etapa, están diseñados para sedimentar la materia orgánica en suspensión (Bogotá et al., s. f.). Se trata de depósitos con profundidades de tres a cinco metros, de forma radial o rectangular. Como resultado se eliminan hasta un 60 – 70% de los contaminantes minerales y la DBO se reduce en un 30% (Residuales Monica Alejandra Bravo Gallardo et al., 2015). El tratamiento biológico es la etapa principal en el tratamiento de aguas residuales municipales. Consiste en la depuración de la parte disuelta de la contaminación de las aguas residuales mediante una biocenosis especial que se denomina lodo activado o biopelícula. Se pueden utilizar bacterias tanto aeróbicas como anaeróbicas, dependiendo de la presencia o ausencia de oxígeno del aire en la mezcla de lodos. Desde un punto de vista técnico, existen varias opciones de tratamiento biológico, pero las principales son el lodo activado, biofiltros y tanques de digestión anaeróbica, estos últimos se utilizan para obtener gas natural a partir de los sedimentos, llamado biogás. También en el tratamiento biológico posterior al tanque de aireación, existen tanques de sedimentación secundaria. Las bombas de lodos están ubicadas en los tanques de sedimentación secundarios. Están diseñados para eliminar los lodos del fondo de los tanques de sedimentación secundarios y regresarlos al tanque de aireación, eliminando el exceso de lodo se elimina del sistema conduciéndolos a disposición final. Dentro del tratamiento terciario, se tienen diversas opciones de tratamiento, dependiendo de los componentes remanentes del agua que se desea tratar, siendo el más utilizado la desinfección, donde se emplea en la mayoría de los casos el cloro, pero también actualmente se están implementando sistemas de ozonización y rayos ultravioleta para eliminar los microorganismos que pasan con el agua tratada del tratamiento biológico, para luego descargar estas aguas en un cuerpo receptor o si es el caso, reutilizar el agua

tratada (Trujillo et al., s. f.).

1.2.7. Coagulación - Floculación

La coagulación y floculación son métodos de tratamiento del agua basados en los efectos de la sedimentación y la filtración. Ambos métodos se utilizan, por regla general, para aumentar la eficiencia del proceso de tratamiento del agua y eliminar las partículas suspendidas. La coagulación se considera un proceso de neutralización de cargas y la formación de una masa que se podría mencionar como gelatinosa que ayuda a atrapar partículas. Gracias a esta técnica, es posible formar una masa suficiente para la sedimentación o filtración. La floculación es un proceso de mezcla suave diseñada para estimular la aglomeración de partículas suficientes para precipitarlas.

Las aguas naturales, por regla general, contienen partículas disueltas y suspendidas en ciertas cantidades. La contaminación es principalmente el resultado de la erosión de la tierra, la disolución de minerales y la descomposición química de la materia vegetal. Los residuos domésticos e industriales contribuyen de manera significativa a la contaminación del agua natural. (Tafur, 2017)

La estructura del agua natural puede incluir materia orgánica/inorgánica disuelta en suspensión, así como organismos biológicos como bacterias, algas marinas, virus, etc. Todo este contenido debe eliminarse ya que conduce a una disminución de la calidad de agua cuando se forma turbidez, el color del líquido cambia, los organismos patógenos se multiplican y se forman compuestos tóxicos.

Para separar las partículas disueltas y suspendidas del agua, se utilizan procesos de coagulación y floculación. Ambos métodos, coagulación y floculación, parecen ser métodos relativamente simples y económicos de purificación del agua. Sin embargo, la eficiencia se logra dependiendo de la disponibilidad de productos químicos especiales y una dosis adaptada de estas sustancias de la composición

del agua.

Independientemente de la naturaleza del agua tratada y del esquema de purificación general utilizado, la coagulación y floculación suelen incluirse como pretratamiento o como etapa de tratamiento después de la sedimentación.

Una proporción significativa de sólidos en suspensión presentes en la estructura del agua tienen carga negativa, en consecuencia, estas partículas tienen la propiedad de repelerse entre sí. El efecto repulsivo evita la aglomeración de los sólidos en suspensión. (Medina, 2021)

La secuencia de la coagulación y floculación se considera un proceso comúnmente practicado para el tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas, para la eliminación de partículas en suspensión y otros contaminantes.

La base fundamental de la coagulación es la desestabilización de las cargas de las partículas en suspensión. Tradicionalmente se utilizan coagulantes que están cargados de manera opuesta a las cargas que tienen las partículas sólidas en suspensión. Se agregan coagulantes al agua, neutralizando así las cargas negativas, como resultado de la neutralización, las partículas finas tienen la tendencia de aglomerarse entre sí. Las aglomeraciones resultantes de este proceso se denominan microflóculos. Se requiere una mezcla rápida para lograr una coagulación de buena calidad. Este enfoque asegura la correcta dispersión del coagulante y facilita la colisión de las partículas, sin embargo, los microflóculos siguen siendo demasiado pequeños en términos de visibilidad a simple vista. Después de la coagulación, se realiza la floculación, en una etapa de mezcla suave con el objetivo de aumentar el volumen de partículas suspendidas desde el tamaño de un microflóculo submicroscópico hasta el tamaño de sus formaciones visibles.

Los microflóculos entran en contacto entre sí durante la agitación lenta. Las colisiones de partículas de microflóculos forman un enlace que conduce a su vez, a

la formación de flóculos visibles.

El tamaño de los flóculos aumenta con cada nueva colisión, donde se pueden añadir reactivos químicos para acelerar el proceso de floculación.

Así se forman los macrobloques, una vez que los flóculos han alcanzado su tamaño y resistencia óptimos, el agua está lista para el proceso de separación (sedimentación, flotación o filtración); (Tafur Bardales, 2018).

1.2.8. Características de las aguas residuales coloidales

Las aguas residuales se caracterizan por una gran variedad de contaminantes, sustancias en suspensión o disueltas. Debido a que los elementos minerales o emulsionados insolubles son los contaminantes más comunes, las aguas residuales pueden considerarse un sistema disperso en el agua. Las principales características de cualquier sistema de dispersión es el tamaño de partícula, la concentración, la agregación y estabilidad cinética. (Residuales Monica Alejandra Bravo Gallardo et al., 2015)

En cuanto a la dispersión de la contaminación, la mayoría de los tipos de aguas residuales son sistemas polidispersos y microheterogénicos que contienen partículas con un tamaño superior a 0.1 micrómetros, a diferencia de las sales que son sistemas coloidales ultramicroheterogénicas con tamaño de partícula de 0.1 micrómetros a 1 nanómetro. Por el tamaño de partícula, las suspensiones se clasifican en gruesas (diámetro de partícula superior a 100 micrómetros), finas (100-0.5 micras) y ultrafinas (0.5-0.1 micras), Las emulsiones, a diferencia de las suspensiones, contienen pequeñas partículas y son sistemas microheterogéneos con un tamaño de 0.1 – 10 micras. Las aguas residuales, al igual que los sistemas coloidales, son sistemas centrados y de dispersión libre, ya que estas partículas contaminantes pueden moverse libremente por todo el volumen. En la tabla 3 se presenta algunas partículas contaminantes presentes en las aguas residuales.

(Dyna & 2011, s. f.)

Tabla 3: Densidad y dispersión de partículas contaminantes de las aguas residuales

Tipo de contaminación	Densidad de partículas, G / cm ³	Rango de Tamaño partículas, micras
Aceite mineral	0,8–1,1	0,01–0,1 0,1–300
Caolín	2,4	0,1–0,3
Bentonita	2,4–2,6	0,5–5,0
Cuarzo	2,65–2,75	3–100 100–1000
Látex de poliestireno, poliacrilato, polibutadienstiroil	1,02–1,1	0,1–5,0

Fuente: (... & 2012, s. f.)

Las partículas contaminantes de las aguas residuales presentan en la mayoría de los casos carga negativa, donde el potencial electroquinético fluctúa en el rango de 10 a 50 mV y el promedio es de 18 a 30 mV.

1.2.9. Características de los contaminantes minerales

La eficiencia de tratamiento de aguas residuales con coagulantes y floculantes está determinada no solo por la estabilidad agregativa y cinética de las partículas, sino que también depende de las características químicas de la fase dispersa y de los contaminantes disueltos tanto orgánicos como inorgánicos. Por ello, es necesario estudiar las características químicas de las partículas insolubles y solubles más comunes que pueden tener un impacto en la elección y eficacia del uso de coagulantes y floculantes. (Trujillo et al., s. f.)

De las impurezas insolubles minerales que se eliminan con la aplicación de coagulante y floculantes, en las aguas residuales pueden estar presentes partículas minerales como los aluminosilicatos, óxidos, carbonatos, silicatos alcalinos, alcalinotérreos y metales pesados. De los aluminosilicatos en aguas residuales

están presentes minerales arcillosos como bentonita y arcilla de caolín, granito y otros.

El caolín es un aluminosilicato natural de fórmula $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, tiene una estructura densa y no se hincha en el agua.

La bentonita-aluminosilicato, tiene una estructura en capas, contiene los cationes intercambiables con Mg, Ca, Na y se hinchan en el agua.

El granito es un mineral natural que se compone de cristales de cuarzo, puede incluir en su composición elementos como Ca, Mg, Fe, Na, Al y otros.

Las características de la contaminación mineral de las aguas residuales se dan por la presencia en la superficie de iones de calcio, magnesio, sodio, potasio, aluminio, hierro, etc., así como grupos de hidroxilos, y de diferentes aniones que en gran medida definen el mecanismo y eficiencia de aplicación de reactivos. (Ramalho, 2021)

1.2.10. Características de los coagulantes

Los coagulantes se encuentran disponibles en forma líquida y sólida. Coagulantes sólidos pueden estar disponibles en forma de polvo, granular y en forma de briquetas. Los coagulantes generalmente se producen como hidratos de cristal, por tanto, en las concentraciones de las marcas comerciales de coagulantes generalmente se estima el contenido de sal anhidra u óxido de aluminio o hierro y puede servir como uno de los criterios para la evaluación comparativa de las diferentes especies coagulantes y determinar el gasto y los costos de estos productos. (Bogotá et al., s. f.)

Las soluciones acuosas de sulfatos y cloruros de aluminio y hierro tienen un medio ácido y mayor actividad corrosiva, que las sales básicas. Para el tratamiento de las aguas residuales, generalmente se utilizan 1-10% de soluciones acuosas de los

productos comerciales.

Al añadir las soluciones de coagulantes inorgánicos en el proceso de tratamiento de aguas residuales, estos se hidrolizan y forman hidrocomplejos (oxihidratos) con diferentes grados de polimerización y pocas sales básicas solubles e hidróxidos de aluminio y hierro. La velocidad y la composición de los productos de hidrólisis son dependientes de la temperatura, de la concentración, del pH y de la composición química del coagulante. Las sales férricas se hidrolizan más que las sales de aluminio y hierro divalente, y con la formación de hidróxidos menos solubles. Por ejemplo, después de 10-15 minutos a 20°C el cloruro férrico en 0.1N de solución se hidroliza en 79%, el sulfato de óxido de hierro en 43% y el sulfato de aluminio en 39%. Además de los iones de hidroxilo, la composición de los hidrocomplejos puede incluir y otros aniones: fosfato, sulfato, carboxilo que pueden alterar su solubilidad. Por ejemplo, oxisulfatos de aluminio tienen menos solubilidad que los oxiclорuros. (Residuales Monica Alejandra Bravo Gallardo et al., 2015)

1.2.10.1. Características físico-químicas del sulfato de aluminio y de hierro

Una característica común de las sales ácidas de aluminio y hierro es la buena solubilidad en el agua. Los datos de pH y solubilidad de las soluciones coagulantes de sulfato se presentan en la tabla 4, datos de las densidades y el pH de las soluciones se presentan en las tablas 5 y 6.

Tabla 4: Solubilidad de sulfatos de aluminio y de hierro en el agua

Denominación	Solubilidad G / 100 G de agua	Densidad solución, G / cm ³	pH
Al ₂ (SO ₄) ₃	34,6	1,264	2,65
FeSO ₄	24,2	1,208	2,71
Fe ₂ (SO ₄) ₃	36	1,45	-

Fuente: (... & 2012, s. f.)

Tabla 5: Densidad de las soluciones acuosas de sulfato de aluminio y de hierro en el agua

Concentración solución, %	Al ₂ (SO ₄) ₃ a 19°C	FeSO ₄ a 18°C	Fe ₂ (SO ₄) ₃ a 17,5°C
1	1,009	1,008	1,007
2	1,019	1,018	1,016
4	1,040	1,037	1,033
6	1,061	1,057	1,050
8	1,083	1,078	1,067
10	1,105	1,100	1,154
20	1,226	1,213	1,181
28	1,333		-
30			1,307
40			1,449
50			1,613

Fuente: (... & 2012, s. f.)

Tabla 6: Valores de pH de las soluciones acuosas del sulfato de aluminio y de hierro

Sulfato de aluminio		Sulfato de hierro	
Concentración de solución por Al ₂ O ₃ %	pH	Concentración FeSO ₄ .7H ₂ O g/L	pH
2	2,4-3,2	50	2,97
4	1,9-2,8	100	2,85

6	1,6-2,6	200	2,77
8	1,4-2,4	300	2,77
		400	2,71
		500	2,52

Fuente: (... & 2012, s. f.)

1.2.12. Utilización de coagulantes y floculantes en el tratamiento de aguas residuales

La dosis de los reactivos es uno de los parámetros prioritarios del cual depende su eficiencia. El grado de purificación del agua aumenta con el aumento de la dosis del reactivo. La dosis óptima generalmente se considera la dosis, con la cual se logra el máximo efecto de limpieza posible o requerido por la normativa. Una de las formas de reducir la utilización del coagulante o floculante y mejorar la eficiencia es aplicar la metodología fraccional de dosificación, que consta en aplicar las dosis de reactivos en diferentes etapas del proceso de tratamiento del agua, por ejemplo en la industria cárnica la mitad de la dosis del reactivo se administra antes de la trampa de grasas y la segunda mitad antes del flotador, si bien es cierto, esta forma de dosificación no es aplicable a todos los tratamientos de aguas residuales, pero se puede entender que, el sentido de las investigaciones se dan con el propósito de disminuir la cantidad de reactivos químicos para tratar las aguas residuales, y este es un tema al cual se intentara dar un aporte de conocimientos en la presente tesis.

1.2.13. Aguas residuales sintéticas

Las aguas residuales de tipo doméstico o industrial tienen ciertas propiedades de tipo físico, químico o biológico con la presencia de diversos contaminantes y nutrientes. A partir de estas consideraciones, se puede elaborar aguas residuales

sintéticas teniendo en cuenta los objetivos de la experimentación, atribuyéndole parámetros específicos que son representativos para la investigación, siendo estos parámetros controlados y manipulados a criterio del investigador. La elaboración del agua sintética se sustenta puesto que llevar la muestra natural hacia el laboratorio se complica y algunas propiedades previamente descritas pueden verse afectadas (Pérez, 2017)

1.2.14. Problemas y perspectivas de la reutilización de residuos textiles

La creciente demanda de productos textiles plantea agudamente la cuestión del reciclaje de residuos de la producción textil. El enfoque principal que se debe dar es de reutilizar al máximo los residuos en lugar de eliminarlos (rellenos sanitarios, incineración, etc.). Todos los residuos textiles se distribuyen en 4 grupos: (Dayana et al., s. f.) (De & Ambiental, 2021)

El primer grupo incluye los residuos fibrosos de producción, que están sujetos a reciclar en la empresa donde se forman.

El segundo grupo incluye los residuos textiles de producción, que pueden ser reciclados solo en plantas de reciclaje.

El tercer grupo está representado por los residuos textiles que no se reciclan para producción y se utilizan como material de limpieza o se tiran a vertederos.

En el cuarto grupo de materiales textiles incluye residuos de bajo grado industrial que son prácticamente inadecuadas para la producción textil, es decir, residuos no reciclables. En el mismo grupo pueden clasificarse los que hayan cumplido su periodo de servicio, como filtros industriales cuya limpieza y restauración es económicamente inviable. Estos desechos son más propensos a ser neutralizados térmicamente o enterrados en vertederos. En presencia de equipos de molienda, ciertos residuos del cuarto grupo se pueden reutilizar, por ejemplo, para obtener

materiales compuestos, y su vez fabricar de estos, placas de fibra, algunos residuos de este grupo que se pueden reutilizar son de la construcción de losas, pero es necesario resolver problemas relacionados con el montaje de los equipos, la seguridad ambiental de la producción, rentabilidad y otros.

En Europa, las plantas de tratamiento de residuos sólidos urbanos recuperan los componentes como el papel, chatarra de metales ferrosos, vidrio, polímeros. Solo en la planta de procesamiento de residuos sólidos ubicada en Doncaster (Reino Unido) que cuenta con una capacidad de 320 T/día, realiza también la recuperación de los desechos textiles. Otra planta en Alemania con una capacidad de 50 T/hora de procesamiento de residuos sólidos urbanos, realiza la separación y clasificación manual de los residuos textiles. En solo algunos casos cuando el componente textil se encuentra en mezcla con componentes que no son reutilizables, entonces se lleva a incineración. (Fabiola & Medina, 2020)

Los residuos textiles en el proceso de su procesamiento pasan por varias etapas: desinfección, desempolvado, clasificación, lavado, limpieza en seco, corte, desenrollado.(PICHARDO, s. f.)

De los residuos textiles se fabrican telas no tejidas, materiales aislantes de calor o ruido, algodón técnico, materiales para limpieza, telas técnicas tales como filtros, en este último caso se prefieren utilizar los residuos de las fibras sintéticas. Es necesario introducir tecnologías fundamentalmente nuevas para el uso de materiales textiles reciclados que actualmente no son reciclables. Las formas más tradicionales de utilizar los residuos textiles son obtener materiales laminados multicapa, revestimientos textiles de paredes, ropa de trabajo para soldadores resistente al fuego.

En Hungría se fabrican paneles aislantes con el uso de los residuos textiles, en Alemania se utiliza como aglutinante en el revestimiento de techos, también se conoce la fabricación de placas órgano-sintéticas fibrosas como materia de

construcción con el uso de los residuos de fibra textil mezclados con residuos de la industria maderera. (PICHARDO, s. f.)

Científicos de los países bajos han presentado una tecnología mejorada que sin preclasificación, bajo un solo sistema, separa y limpia toda la materia prima de los residuos. Las materias primas se limpian completamente de impurezas, se embalan y puede ser reutilizados. En muchos países de Europa la ropa no apta se utiliza en la producción de papel artístico para dibujar con acuarela o impresión de billetes. (Barría, 2020)

El reciclaje de residuos textiles reducirá la cantidad de recursos primarios, ampliará la gama de productos fabricados de residuos, reducirá la carga negativa sobre el medio ambiente, permitirá tener ingresos a la empresa que reúsa o comercializa sus residuos textiles.

1.2.15. Tipos de aditivos utilizados en diferentes áreas de la industria

Los aditivos se dividen en activos e inactivos. Los aditivos activos se consideran tales que permiten obtener un material compuesto con propiedades físicas y mecánicas más altas que el polímero original. Los aditivos inactivos se introducen en las composiciones para darles propiedades tecnológicas y específicas. (Cornejo, 2014)

Los aditivos pueden ser de origen orgánico y mineral. Todos los aditivos minerales son sustancias dispersas inorgánicas de diferente composición química.

Existen aditivos naturales como el yeso, talco, piedra pomez, etc. y sintéticos como el ácido de sílice coloidal, óxidos de titanio, zinc, silicatos de calcio y aluminio, fluoruro de calcio, etc.

Existe un grupo especial, que son los aditivos de los desechos de diferentes industrias químicas y mineras como los residuos enriquecidos por flotación de minerales metálicos, sales de electrofiltración y otros. (Nikulín et al., 2012)

También como aditivos pueden ser utilizados los desechos de la industria textil, siendo estos de gran interés, puesto que estos residuos no son aprovechados y ocupan un gran volumen en los rellenos sanitarios, estos residuos textiles se pueden clasificar de la siguiente forma:

1. Por la naturaleza química de la fibra: algodón, lana, etc.;
2. De acuerdo con la tecnología de producción y el tipo de materiales textiles: tejidos de desecho, tejidos de jersey, telas no tejidas y su combinación.
3. Por la etapa de producción de materiales textiles: residuos de fibra, enredo de hilo, recorte de telas;
4. Por el color: residuos blancos, claros (pintados en tonos claros: beige, amarillo claro y sus combinaciones), multicolores;
5. Por la limpieza: sin limpiar y limpio (lavado, limpieza en seco, desinfectado y otros métodos de limpieza).

Parte de los residuos textiles generados se utilizan en diversas industrias. Por ejemplo, los desechos de fibra de algodón taponan los pozos de petróleo durante la perforación. También se utilizan en la producción de materiales de revestimiento

para el sector construcción como aislante acústico y para mantener el calor.
(Cornejo, 2014)

1.2.16. Tipos y propiedades de las fibras de origen natural

Las fibras naturales se dividen en fibras de animales (lana, seda) vegetales (algodón, lino, yute, pulpa de madera) y minerales (asbesto).

La parte principal de la lana es la queratina, que pertenece a las proteínas de naturaleza anfótera. La fibra de lana tiene una estructura escamosa, lo que provoca

el crecimiento de su superficie y se caracteriza por una baja resistencia, tiene una significativa higroscopicidad y baja conductividad térmica. Por lo general los residuos de lana se utilizan como aditivos en un tamaño de 3 – 10 mm (Cornejo, 2014)

De las fibras de origen vegetal, las fibras de celulosa se han utilizado más ampliamente. El contenido de celulosa en el aditivo fibroso es variado. Por ejemplo, el algodón contiene hasta 98% de celulosa, en la madera blanda y madera dura alrededor de 50%, en la paja 50 -54%.

Además de celulosa, las fibras vegetales contienen lignina y hemicelulosa (heteropolisacáridos). La lignina se encuentra predominante en la parte intercelular. La madera blanda contiene hasta 30% de lignina, la madera dura contiene hasta 20%, la fibra de algodón contiene una pequeña cantidad de 2-3% de lignina.

Por la naturaleza química, la pulpa de algodón y madera pertenecen a los polisacáridos naturales que consisten en residuos de glucosa. La composición de la celulosa, que es la base de la fibra de algodón, contiene grupos funcionales como aldehído, carboxilo, hidroxilo. Las características de la estructura y composición de la fibra de algodón determinan sus buenas propiedades mecánicas e higroscopicidad moderada.

Actualmente se están desarrollando estudios dirigidos al uso de fibras cortas de celulosa en estructuras para absorber energía como resortes, juntas, amortiguadores, parachoques, suspensiones y otros. (Nikulín et al., 2012)

1.2.17. Fibras de origen sintético - Nylon 6

El nylon 6 (llamado también caprón) es una fibra de poliamida sintética, derivado del petróleo, es producto de polimerización de la caprolactama. Se sintetizó por primera vez en Alemania en 1938 por Paul Schilick, luego se industrializó llegando a una

producción de policaprolactama de 3.5 mil toneladas por año utilizando como materia prima el fenol. Primero se produjo fibra de nylon gruesa utilizada como cerdas artificiales, luego, se comenzaron a producir seda de paracaídas, cable para neumáticos de la aviación y cables de remolques para aviones. (Cornejo, 2014) (Nikulin et al., 2012)

El nylon 6 es una sustancia blanca y transparente, muy fuerte, la elasticidad del nylon es mucho más alta que el de la seda. La resistencia del nylon depende de la tecnología y el cuidado de su producción. El hilo de nylon tiene aproximadamente 0.1 milímetros de diámetro y puede soportar un peso de 0.5 kg. Junto a la alta resistencia las fibras de nylon se caracterizan por la resistencia a la abrasión. Las fibras de nylon no absorben la humedad, por lo que no pierden fuerza cuando están húmedas, pero la fibra de nylon tiene deficiencias, es poco resistente a la acción de los ácidos, las macromoléculas de nylon se someten a hidrólisis en los enlaces de amidas. También el nylon tiene poca resistencia al calor, cuando se calienta su resistencia disminuye, a 215°C se produce la fusión.

Actualmente los filamentos de nylon 6 se utilizan en la fabricación de calcetería, ropa de tejido de punto y paracaídas, y las cerdas de nylon 6 se utilizan para fabricar cepillos de dientes y cepillos de cerdas para la industria. Como un compuesto con otros polímeros, el nylon 6 también se utiliza en la producción de juguetes, ruedas de patín y los marcos de las pistolas.

1.2.18. Método de Superficie de Respuesta (MSR)

La metodología de análisis de superficie de respuesta es útil para encontrar condiciones óptimas del experimento. (Dbik et al., 2022)

En muchos casos, el propósito de la simulación es encontrar tales cantidades o niveles de las variables independientes en las que la respuesta alcanza los valores

óptimos (máximos, mínimos o específicos), si las variables dependientes o independientes son cuantitativas y continuas. Se denota la variable dependiente a través de Y , y las variables independientes a través de (X_1, X_2, \dots, X_k) , donde k es el número de factores, y asumiendo que todas las variables son cuantitativas, continuas y medibles, la ecuación de superficie de respuesta se puede escribir de la siguiente manera:

$$y = F(x_1, x_2, \dots, x_k).$$

Figura 2: Ecuación de superficie de respuesta

Fuente: (Satasiya et al., 2022)

Es muy útil tener una representación geométrica de la superficie de respuesta, en la figura 3 se muestra una superficie de respuesta que representa la dependencia de la respuesta de las dos variables independientes en un sistema de coordenadas rectangular.

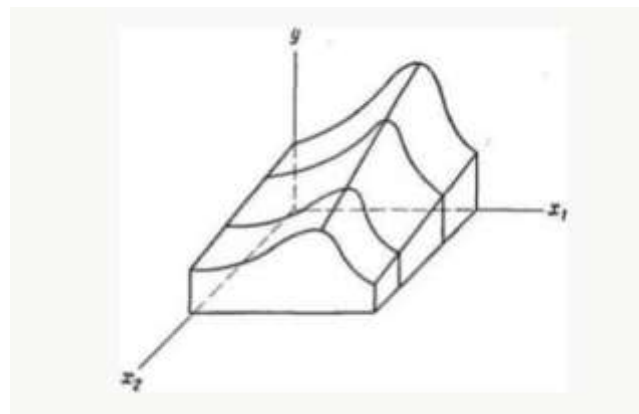


Figura 3: Superficie de respuesta

Fuente: (Satasiya et al., 2022)

Ciertamente, las representaciones geométricas de la superficie de respuesta están limitadas a las imágenes tridimensionales. Sin embargo, la representación

geométrica de MSR no se limita a realizar experimentos con más de dos variables independientes, si bien es cierto no se podrá observar de manera física, pero si se podrá analizar los datos y procesarlos. (Gautam et al., 2022)

La MSR generalmente se basa en el estudio a través de una serie de pequeños experimentos factoriales completos o fraccionados. En la simulación se utiliza la tecnología de planificación secuencial, la cual consiste en encontrar la combinación óptima de niveles K factores cuantitativos donde se realiza paso a paso el procedimiento hasta llegar al punto óptimo. Si se explica de otra manera, si se conoce la expresión matemática exacta de la función respuesta, entonces obtener el punto óptimo es relativamente fácil, pero dado que generalmente no conocemos el tipo de superficie de respuesta, es necesario utilizar una aproximación con cualquier función flexible, que cambie suavemente. Como tal función, se usa usualmente un polinomio de primer orden o un polinomio de segundo orden, donde los coeficientes de estos polinomios se evalúan a través de un experimento. En este caso, la tarea es llegar lo más rápido posible a un nivel cercano al óptimo, tomando ventaja de los métodos analíticos que representan esta función alrededor del punto óptimo. Estos experimentos se pueden usar para resolver dos preguntas: La primera pregunta está relacionada con la elección del orden con las que se va a llevar a cabo el experimento para acercarse al punto óptimo o al área óptima, para ello es necesario llegar de forma más rápida a la superficie de respuesta utilizando el método de elevación más rápida (o escala empinada en la superficie de respuesta). Y la segunda pregunta surge cuando ya se está lo suficientemente cerca del punto extremo, para saber cuál es la ecuación de superficie de respuesta cerca de los puntos óptimos. Se puede utilizar métodos analíticos para representar esta función de los alrededores del punto óptimo, teniendo en cuenta que cerca del punto óptimo, la aproximación lineal deja de ser satisfactoria y es necesario utilizar un polinomio de orden superior, como por ejemplo el cuadrático. (Mallikarjuna & Dash, 2022)

1.2.19. Método de análisis factorial

El análisis factorial es un método multivariado utilizado para examinar las relaciones entre los valores de las variables, suponiendo que las variables conocidas dependen de algunas variables desconocidas con un error aleatorio. El análisis factorial se originó por primera vez en la psicología y ahora se usa en neurofísica, sociología, ciencias políticas, economía, estadística, ingeniería y otras ciencias. Las principales ideas del análisis factorial fueron fundadas por el psicólogo y antropólogo inglés, Evgeni Galton. Spearman y Pearson también contribuyeron al desarrollo del análisis factorial. El análisis factorial permite resolver dos problemas importantes del investigador: describir el objeto de medición de manera integral y al mismo tiempo de forma compacta. Mediante el análisis factorial es posible identificar las variables latentes de los factores responsables de la presencia de correlaciones estadísticas lineales entre las variables observadas. (Gautam et al., 2022) (Satasiya et al., 2022). Los dos objetivos principales del análisis factorial son: Definición de relaciones entre variables; reducir el número de variables necesarias para describir los datos.

En el análisis factorial, las variables fuertemente correlacionadas se combinan en un solo factor, como resultado redistribución de la varianza entre los componentes y se obtiene la estructura más simple y visual de los factores. Después combinando la correlación del componente dentro de cada factor entre sí, se obtendrá mayor correlación que con componentes de otros factores. Este procedimiento también permite resaltar las variables latentes, lo cual es especialmente importante al analizar las percepciones y valores sociales. Por ejemplo, analizando las puntuaciones obtenidas en varias escalas, el investigador observa que son similares entre sí y tienen un alto coeficiente de correlación, puede suponer que existe alguna variable latente con la que se puede explicar la similitud observada de las estimaciones obtenidas. Tal variable latente se llama factor. Este factor afecta a

numerosos indicadores de otras variables, lo que nos da la oportunidad y la necesidad de distinguirlo como el más general, de orden superior. Para identificar los factores más significativos y como consecuencia la estructura de factores más justificable para aplicar el método de componentes principales. La esencia de este método es reemplazar los componentes correlacionados con factores no correlacionados. Otra importante característica del método es la capacidad de limitarse a los componentes principales más informativos y excluir el resto del análisis, lo que facilita la interpretación de los resultados. (Yahia et al., 2021)

1.3. Definición de términos básicos

Agua tratada: Toda agua que paso por un proceso de tratamiento previo, para remover componentes contaminantes y mejorar su calidad para ser descargada a los cuerpos receptores o reutilizarla.

Agua de consumo humano: Agua destinada para uso diario de consumo ilimitado y seguro por la población.

Calidad del agua: La calidad del agua es una característica de la composición y propiedades del agua que determinan su idoneidad para su utilización.

Flóculos: Partículas que se forman después del proceso de coagulación, que puede ser asistida por reactivos químicos como sin la utilización de los mismos, formándose los flóculos por colisión durante un proceso de mezcla lenta después de la coagulación.

Estándar de Calidad Ambiental (ECA): Estándar ambiental que regula el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y

biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente.

Límite Máximo Permisible (LMP): Instrumento de gestión ambiental que regula la concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente.

Efluente: Líquido que se obtiene como resultado de su tratamiento, a la salida de la planta de tratamiento.

Oxígeno disuelto: Es la cantidad de oxígeno molecular que se encuentra disuelto dentro del cuerpo hídrico, siendo esta una característica importante de la calidad del agua superficial.

pH: Es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidronio presentes en determinadas disoluciones.

Sólidos suspendidos totales (TSS): Indica la cantidad de sólidos totales como sólidos totales fijos y sólidos totales volátiles, los cuales representan la cantidad de materia inorgánica y orgánica respectivamente, dentro de la muestra de agua.

Turbiedad: La turbidez del agua es un indicador que caracteriza la disminución de la transparencia del agua debido a la presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos finos, así como el desarrollo de organismos planctónicos.

1.4. Hipótesis de investigación

1.4.1. General

- El efecto del coagulante binario es significativo en la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética.

1.4.2. Específicas

- Los parámetros de pH y concentración del coagulante sin la utilización de fibra textil tienen un efecto significativo en la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética.
- Los parámetros de pH, longitud de fibra y concentración del coagulante tienen un efecto significativo en la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética con la utilización de la fibra natural de algodón.
- Los parámetros de pH, longitud de fibra y concentración del coagulante tienen un efecto significativo en la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética con la utilización de la fibra sintética de nylon 6.

1.5. Operacionalización de variables

Variable independiente	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores
pH	Medida del grado de acidez o alcalinidad de una sustancia o una solución	Escala de pH	0 - 14
Longitud de fibra textil (peso 0.1 gr y diámetro 0.1 mm)	Es la medida de la largura de una fibra textil, que puede ser material natural o sintético, teniendo como diámetro 0.1 mm aproximadamente.	Longitud	milímetros
Coagulante inorgánico	El coagulante inorgánico es un compuesto que se utiliza comúnmente para el tratamiento de las aguas residuales, teniendo la capacidad de neutralizar las cargas de los contaminantes para fomentar su aglomeración.	Concentración	ppm
Variable dependiente			
Eficiencia de remoción de la turbiedad	Cantidad tratada de componentes suspendidos en el agua residual.	Turbiedad NTU	% de remoción

CAPÍTULO II DISEÑO METODOLÓGICO

2.1. Nivel de Investigación

El nivel de la investigación es explicativo, dado que con los resultados obtenidos se explicará el efecto de la aplicación de residuos textiles como ayudantes en el proceso de coagulación, disminuyendo la concentración del reactivo químico con la finalidad de remover de la turbidez preparada en agua residual sintética. (Hernández-Sampieri & Torres, 2018)

2.2. Tipo de Investigación:

El tipo de investigación es aplicada (María et al., 2018) puesto que se pretende dar una solución práctica al problema de los residuos textiles dando una opción para su reúso y también minimizar la utilización de sulfato de aluminio para remover contaminantes del agua residual.

2.3. Método y diseño de la Investigación:

El método de investigación es experimental (Hernández-Sampieri & Torres, 2018) puesto que se manipularan de forma controlada las variables del experimento, siendo estas el pH, concentración del sulfato de aluminio y longitud de fibra textil para obtener como variable respuesta la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética.

En primera instancia se implementa un diseño DOE de superficie de respuesta para encontrar la dosificación y parámetros óptimos de remoción de la turbidez con el sulfato de aluminio, la matriz se muestra en la tabla 7, en base a estos resultados se construyó un diseño DOE factorial 2*3 el cual se muestra en la tabla 8 teniendo como variables al pH, el tamaño de la fibra textil y la concentración del coagulante en proporciones menores del obtenido en la primera experimentación (50 y 70%), con la finalidad de encontrar el tamaño óptimo de la fibra textil que da efecto en la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética con la disminución

de la concentración del coagulante.

Tabla 7: DOE superficie de respuesta

+	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	pH	Al
1	1	1	1	1	5.00000	20.0000
2	2	2	1	1	9.00000	20.0000
3	3	3	1	1	5.00000	30.0000
4	4	4	1	1	9.00000	30.0000
5	5	5	-1	1	4.17157	25.0000
6	6	6	-1	1	9.82843	25.0000
7	7	7	-1	1	7.00000	17.9289
8	8	8	-1	1	7.00000	32.0711
9	9	9	0	1	7.00000	25.0000
10	10	10	0	1	7.00000	25.0000
11	11	11	0	1	7.00000	25.0000
12	12	12	0	1	7.00000	25.0000
13	13	13	0	1	7.00000	25.0000

*Tabla 8: DOE factorial 2*3*

Factores			Nivel (-)			Nivel (+)		
pH								
Longitud de fibra								
Concentración del coagulante inorgánico								
Matriz de experimentos			Plan de experimentación			Eficiencia de remoción		
1	2	3	X1	X2	X3	Y1	Y2	Promedio
1	-	-						
2	+	-						
3	-	+						
4	+	+						
5	-	-						
6	+	-						
7	-	+						
8	+	+						

2.4. Población y Muestra

La población está conformada por aguas residuales sintéticas preparadas con formula conocida para obtener muestras con características específicas de turbidez (200 NTU). Se preparo un total de 60 litros de agua residual, de los cuales, 26 litros se utilizaron en la primera fase de optimización, 16 litros se utilizaron en la segunda fase y unos 16 litros adicionales en la tercera fase de experimentación, el resto de agua sintética se utilizó en las pre pruebas de laboratorio antes de iniciar con las fases de experimentación.

2.5. Técnicas e instrumentos de recopilación de datos

La técnica que se utilizó para recopilar los datos fueron la documental y medición, puesto que se utilizaron datos de los antecedentes para dar inicio a la experimentación, y se midieron con instrumentos calibrados de laboratorio los resultados de cada uno de los experimentos.

Los instrumentos utilizados en laboratorio son:

1. Mezclador magnético.
2. Turbidímetro.
3. Medidor de pH.
4. Recipientes de 1 y 10 L.
5. Vasos de precipitación.
6. Instrumentos de laboratorio.
7. Jeringas de 1, 5, 10ml.

2.5.1. Procedimiento para la preparación del agua residual sintética

El agua residual sintética se preparó agregando una mezcla de arcilla comercial al agua potable que se obtuvo del suministro de la red de abastecimiento convencional, hasta obtener el valor deseado de turbidez de 200 NTU, el agua residual se agito a 100 rpm durante 5 minutos y se dejó reposar por 24 horas a temperatura ambiente el cual durante el día llegó a un máximo de 18° C y durante la noche a un mínimo de 12° C., este procedimiento se realizó con la finalidad de homogenizar e hidratar completamente la arcilla presente en el agua residual.

El pH de la muestra sintética se ajustó hasta los valores deseados agregando gotas de hidróxido de sodio 0.02 N hasta llegar a los valores de un pH de 9 y de la misma forma para acidificar la muestra se agregó ácido sulfúrico al 2% hasta llegar al valor de pH 5. El pH inicial del agua sintética es de pH 7.2, esto debido a las características que le proporciona el agua de abastecimiento potable.

Tabla 9: Valores de dosificación de la arcilla para la preparación de un litro de agua residual sintética.

Cantidad de arcilla (g)	Turbiedad (NTU)
0.2	40-42
0.5	69-71
1	98-103
2.4	200-203

2.5.2. Procedimiento para la preparación del coagulante

La preparación del coagulante sulfato de aluminio se realizó en laboratorio para obtener una solución del 1% en relación peso/volumen. Primero se preparó la solución madre al 10%, pesando 100 gr del sulfato de aluminio que se llevan a fioles aforando con agua destilada hasta 1000 ml, luego de esta solución se sacan 10 ml y se llevan a una fiola de 100 ml para obtener la solución de trabajo.

2.5.3. Procedimiento para la dosificación de reactivos

Para la dosificación del sulfato de aluminio a las concentraciones requeridas para el experimento se utilizó la siguiente fórmula:

$$C_r \text{ 1\%} = \frac{1 \text{ gr (soluto)}}{100 \text{ ml (solución)}} * \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ gr}} = \frac{10 \text{ mg}}{\text{ml}}$$

Para encontrar la dosificación del sulfato de aluminio, se aplicó la siguiente relación:

$$C1 * V1 = C2 * V2$$

Como ejemplo se muestra el cálculo de la dosificación del sulfato de aluminio de 20 ppm.

$$\frac{10 \text{ mg}}{1 \text{ ml}} * V_1 = \frac{20 \text{ mg}}{1 \text{ l}} * 1 \text{ l}$$

Resultando 2 ml de solución al 1% de sulfato de aluminio.

Donde:

Cr = Solución de sulfato de aluminio al 1%

C1, C2 = Concentraciones del coagulante

V1 = Dosificación del sulfato de aluminio

V2 = Volumen de la muestra de agua sintética

2.5.4. Procedimiento para la recolección de datos (Fase de Laboratorio)

Los datos se extrajeron de los experimentos realizados en el Laboratorio, siguiéndose los siguientes pasos:

1. Primero se realizaron pre pruebas en los vasos de precipitación con agua residual sintética para obtener los valores iniciales para la optimización.

2. Luego se realizó una optimización de los resultados de laboratorio utilizando la matriz DOE Superficie de respuesta (MSR) que nos dio los valores del pH y concentración del sulfato de aluminio para obtener la máxima remoción de turbidez.
3. Luego se realizó la experimentación con diferentes tamaños de dos tipos de fibra textil utilizando la matriz DOE Factorial interconectando las variables obtenidas en la experimentación anterior (pH y concentración), con las fibras textiles, teniendo en cuenta que las concentraciones fueron disminuidas al 50 y 70% del valor original para ver si la utilización de las fibras textiles da efecto sobre la eficiencia de remoción de turbidez utilizando menores concentraciones del coagulante.
4. Se realizó la medición de las muestras de agua residual sintética después de la experimentación con las fibras textiles y se contrastó con los resultados de la primera experimentación (sin las fibras textiles) para verificar si se llegó a mantener la eficiencia de remoción de la turbidez con la disminución de la concentración de del coagulante.

2.5.5. Técnica de procesamiento de datos

Se implementó el método DOE de superficie de respuesta con el DOE Factorial para la experimentación. Se procesaron los datos y se validaron cada uno de sus criterios utilizando el P valor con su significancia al nivel de 95%, obteniendo un modelo de regresión, el cual se utilizará para la obtención de los valores óptimos dentro de la experimentación.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan los resultados de los experimentos de acuerdo a lo programado en los planes experimentales.

3.1. Resultados

3.1.1. Datos de operación a considerar en los experimentos

El comienzo de la experimentación inicio con las pre pruebas de laboratorio desarrolladas en vasos de precipitación con agua residual sintética con un pH de 7.2 para encontrar los valores iniciales de la experimentación, donde se tomó en cuenta el comienzo de la clarificación hasta el momento que se obtiene un agua tratada sin turbiedad, la dosificación resultó entre los valores de 20 ppm hasta 30 ppm del sulfato de aluminio con variación del pH entre 5 y 9, estos datos fueron inicialmente consultados con la bibliografía científica y se comprobaron con los resultados de la pre prueba de laboratorio.

Una vez obtenidos los datos iniciales de trabajo, se procedió a encontrar la dosis óptima a través de un DOE MSR, para el cual se utilizó el diseño de MSR disponible en el programa minitab, eligiendo el diseño que se ajusta más a la experimentación a realizar, el cual es un Diseño Completo Central Compuesto de 13 factores continuos completos, eligiendo una cantidad de dos réplicas para la primera fase del experimento, siendo esta cantidad idónea cuando se trabaja a nivel de laboratorio manteniendo un equilibrio entre la viabilidad técnica y económica del desarrollo experimental, por ello, para todas la pruebas que se desarrollaron en la presente investigación se utilizan dos repeticiones para los experimentos, también, de acuerdo a (Vuppala et al., 2021), las réplicas en un experimento son necesarias para poder estimar el error experimental que se cometió en cada uno de los experimentos. El tamaño de error será importante para decidir si el cambio

producido en las respuestas es debido al cambio de los factores, o simplemente al error experimental.

Se definió como factores de la experimentación al pH y a la dosis del coagulante sulfato de aluminio, los cuales se presentan en la siguiente figura 3:

Factor	Nombre	Bajo	Alto
A	pH	5	9
B	Al ₂ (SO ₄) ₃	20	30

Figura 4: Factores y niveles de la Metodología Superficie de Respuesta

En la figura 4 se muestran los dos factores con sus dos niveles los cuales fueron seleccionados a partir de los resultados de la pre prueba, determinándose que el valor de pH 5 es el mínimo para empezar la coagulación de los sólidos suspendidos en el agua residual sintética, siendo el valor de 9 el máximo con el cual el coagulante tiene efecto sobre la turbiedad del agua residual sintética. El valor de la dosificación del sulfato de aluminio se determinó de la misma forma que para el pH, se realizaron las pre pruebas donde se determinó que las concentraciones de influencia sobre la remoción de la turbidez empiezan con el valor de 20 ppm hasta el valor de 30 ppm, observándose que valores mayores a 30 ppm no generan algún cambio sobre la turbidez del agua residual, y que con valores de 37 ppm a más se obtiene un efecto inverso al esperado, apareciendo una crecida en el valor de la turbidez en el agua tratada, cabe resaltar que este efecto inverso tuvo un efecto visual durante el proceso de mezcla rápida y continuó durante el proceso de mezcla

lenta y manteniéndose también en el proceso de decantación.

En la tabla 10 se muestra el orden de los experimentos realizados en laboratorio y las eficiencias de remoción de la turbidez, cabe resaltar que el orden de ejecución de los experimentos es aleatorio para evitar que otros factores externos que no están bajo control no tengan efecto en la respuesta y no puedan afectar la experimentación.

Tabla 10: Tabla de orden experimental con valores de las variables independientes

•	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	pH	Al ₂ (SO ₄) ₃
1	10	1	0	1	7.00000	25.0000
2	3	2	1	1	5.00000	30.0000
3	1	3	1	1	5.00000	20.0000
4	5	4	-1	1	4.17157	25.0000
5	6	5	-1	1	9.82843	25.0000
6	8	6	-1	1	7.00000	32.0711
7	2	7	1	1	9.00000	20.0000
8	4	8	1	1	9.00000	30.0000
9	9	9	0	1	7.00000	25.0000
10	11	10	0	1	7.00000	25.0000
11	12	11	0	1	7.00000	25.0000
12	13	12	0	1	7.00000	25.0000
13	7	13	-1	1	7.00000	17.9289

Luego de realizar el procesamiento del DOE MSR, se obtuvieron los siguientes resultados:

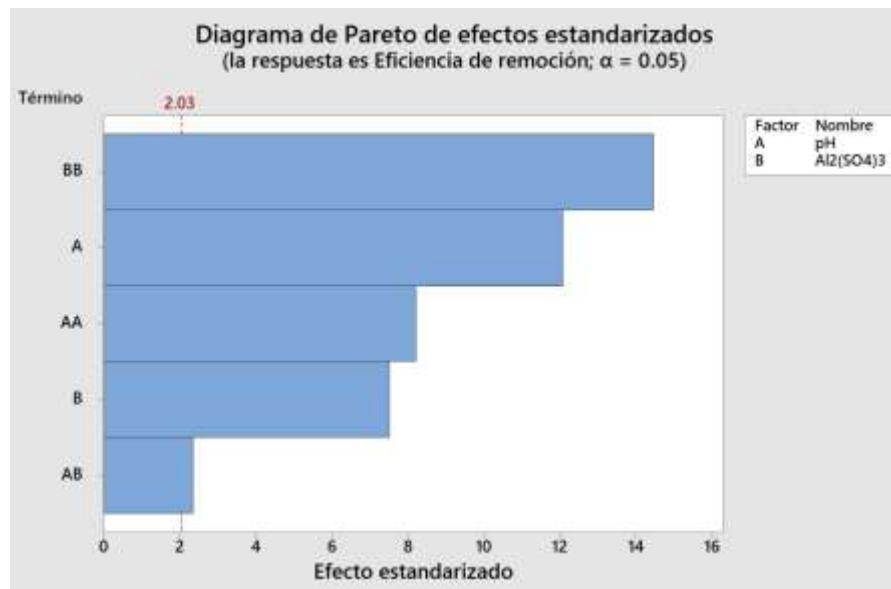


Figura 5: Diagrama de Pareto del pH con el sulfato de aluminio

En el Diagrama de Pareto se muestran los efectos de las variables independientes, su efecto cuadrático, el efecto individual y el de interacción, como se puede apreciar en el diagrama todos los efectos sobrepasan el valor de 2.03, este valor se utiliza para seleccionar solo los efectos que son significativamente grandes como para interpretarlos, ya que si alguno de los cálculos nos da un efecto relativamente pequeño, ese valor podría ser debido únicamente al error experimental, y por tanto no ser representativo de dicho efecto, por ello, se construye un intervalo de confianza usando una distribución t de student el cual es calculado por el software de minitab resultando el valor de 2.03.

De estos efectos mostrados en el diagrama se puede ver que tanto la variable pH y concentración del coagulante, cada una de ellas, tiene un efecto significativo sobre la variable respuesta, de igual forma el efecto cuadrático de cada una de las variables de entrada tienen efecto significativo sobre la variable respuesta, y también la interacción de las variables de entrada tienen efecto significativo sobre la variable respuesta, que es la eficiencia de remoción de turbidez del agua residual sintética.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	10575.0	2115.00	91.31	0.000
Lineal	2	4677.5	2338.76	100.97	0.000
pH	1	3372.0	3372.04	145.57	0.000
Al ₂ (SO ₄) ₃	1	1305.5	1305.48	56.36	0.000
Cuadrado	2	5770.8	2885.38	124.56	0.000
pH*pH	1	1555.5	1555.50	67.15	0.000
Al ₂ (SO ₄) ₃ *Al ₂ (SO ₄) ₃	1	4832.3	4832.28	208.61	0.000
Interacción de 2 factores	1	126.7	126.75	5.47	0.026
pH*Al ₂ (SO ₄) ₃	1	126.7	126.75	5.47	0.026
Error	33	764.4	23.16		
Falta de ajuste	3	654.1	218.05	59.32	0.000
Error puro	30	110.3	3.68		
Total	38	11339.4			

Figura 6: Análisis de varianza para la validación del modelo de regresión

La figura 6 es el resultado que se obtiene del software minitab, donde se puede observar los p valor de cada efecto, estos valores, tanto para los efectos principales, cuadráticos e interacción son menores que 0.05, dando a entender que los efectos son significativos sobre la variable respuesta y de esta manera validando el modelo de regresión que se muestra en la figura 7.

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\text{Eficiencia de remoción} = -329.4 + 16.16 \text{ pH} + 29.63 \text{ Al}_2(\text{SO}_4)_3 - 2.158 \text{ pH}^2 - 0.6087 \text{ Al}_2(\text{SO}_4)_3^2 + 0.325 \text{ pH} \cdot \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$$

Figura 7: Ecuación de regresión de la eficiencia de remoción de la turbidez en función del pH y concentración del sulfato de aluminio.

La metodología de superficie de respuesta es un conjunto de técnicas matemáticas utilizadas en el tratamiento de problemas en los que una respuesta de interés está influida por varios factores de carácter cuantitativo. El propósito inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta y a continuación determinar el modelo de regresión que mejor se ajusta a los datos obtenidos, este modelo de regresión nos ayudará a establecer los valores del pH y concentración del sulfato de aluminio, que optimizan el valor de la eficiencia de remoción de turbidez.

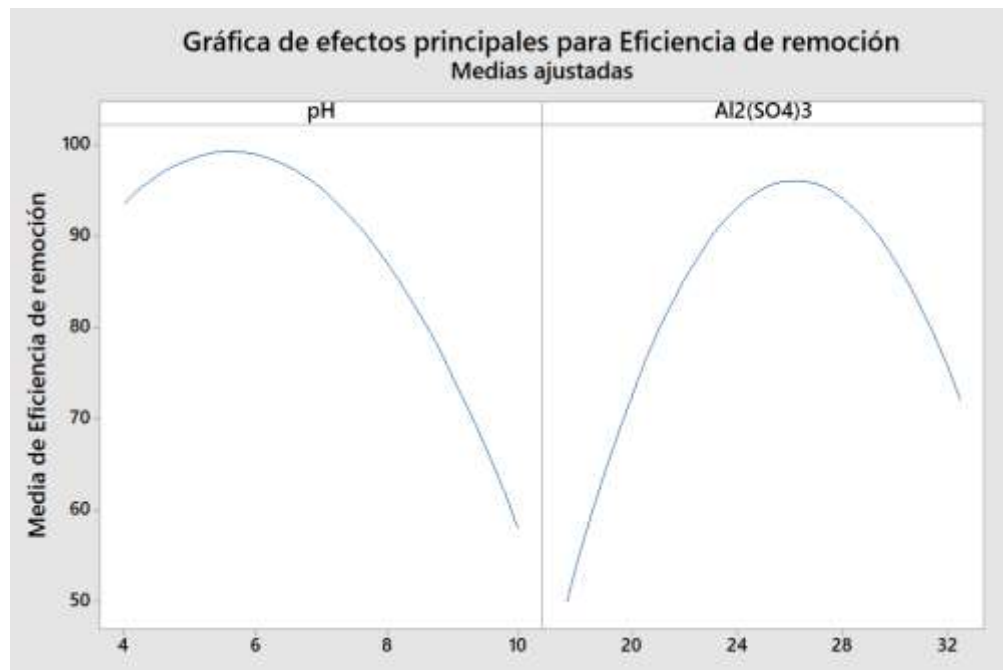


Figura 8: Efectos principales para la eficiencia de remoción de turbidez

En la figura 8 podemos observar los efectos de cada una de las variables de forma individual sobre la eficiencia de remoción de la turbidez, el pH con valores cercanos a 6 tiene un mayor efecto sobre la remoción de turbidez, el sulfato de aluminio con valores de dosificación entre 24 y 28 tienen mayor efecto en la remoción de la turbidez del agua residual sintética.

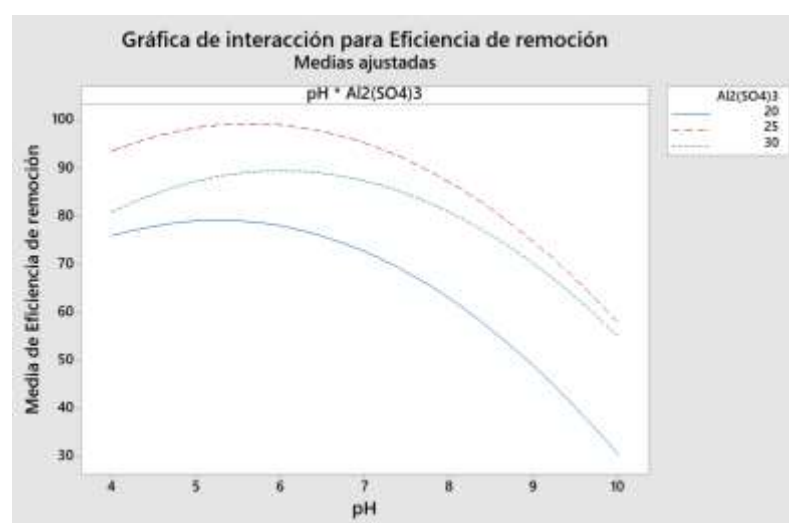


Figura 9: Interacción de las variables pH y concentración de sulfato de aluminio sobre la eficiencia de remoción de la turbidez

En la gráfica de interacción se puede observar la interacción entre las concentraciones de sulfato de aluminio a diferentes dosis con el pH, el valor de la

concentración de sulfato de aluminio a 20 ppm tiene cierto efecto cuando los valores de pH están cercanos a 6, pero con un efecto poco significativo sobre la variable respuesta. El valor de 30 ppm de sulfato de aluminio tiene cierto efecto, que es mayor que la concentración anterior, teniendo una mejor respuesta con los valores de pH entre 6 y 7. El valor de 25 ppm de concentración del sulfato de aluminio tiene mayor efecto sobre la eficiencia de remoción de la turbidez, mostrando los mejores resultados con valores de pH cercanos a 6.



Figura 10: Gráfica de contornos

En la figura 10 se muestran los contornos, donde cada línea de contorno representa un número infinito de combinaciones para su eficiencia de remoción de la turbidez. Se puede apreciar que la eficiencia de remoción que tiene el color verde oscuro es la que representa eficiencias mayores al 80%.

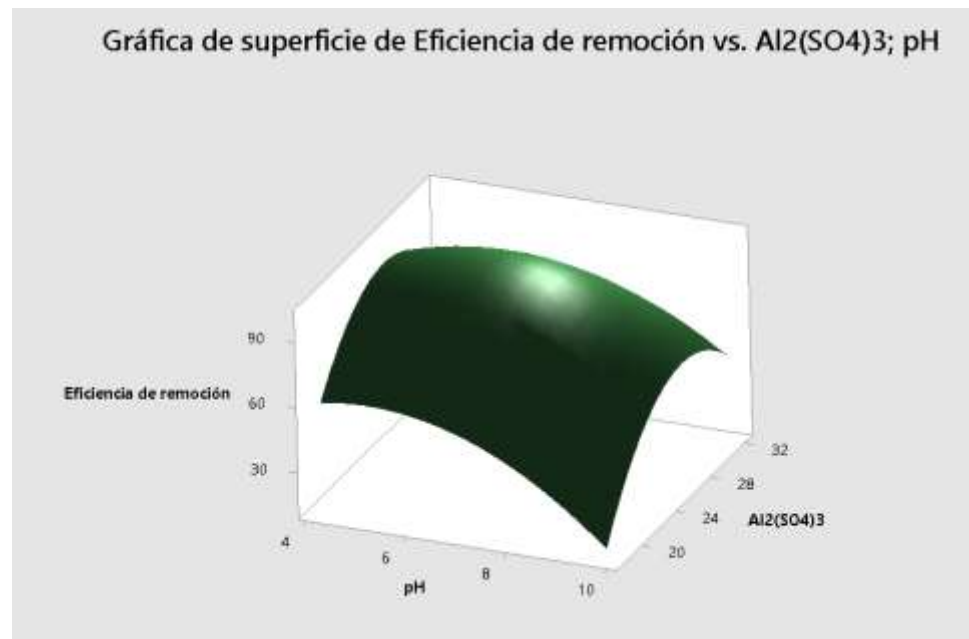


Figura 11: Gráfica de superficie de respuesta tridimensional en la que se observa la eficiencia de remoción esperada de turbidez en función de las cantidades de sulfato de aluminio y pH

En la figura 11 dado que hay dos factores de influencia, la superficie de respuesta se visualiza en el espacio tridimensional en la que la tercera dimensión representa la eficiencia de remoción de la turbidez sobre el plano bidimensional definido por las combinaciones de los niveles de los dos factores, pH y dosificación de sulfato de aluminio.

Los valores más altos de eficiencia de remoción de turbidez se encuentran entre los valores cercanos a 6 \pm 1, y dosificación del coagulante entre 24 y 28 ppm.

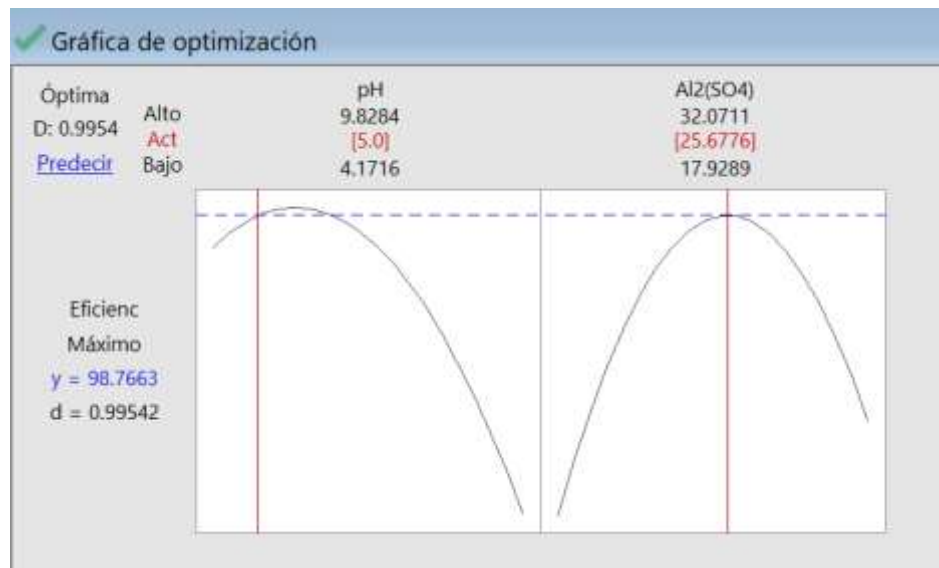


Figura 12: Gráfica de optimización a pH 5

En la figura 12 se muestra el gráfico de optimización, donde, para una eficiencia de remoción de la turbidez de 98.7% los valores de pH son iguales a 5 y la concentración del sulfato de aluminio es igual a 25.6 ppm.

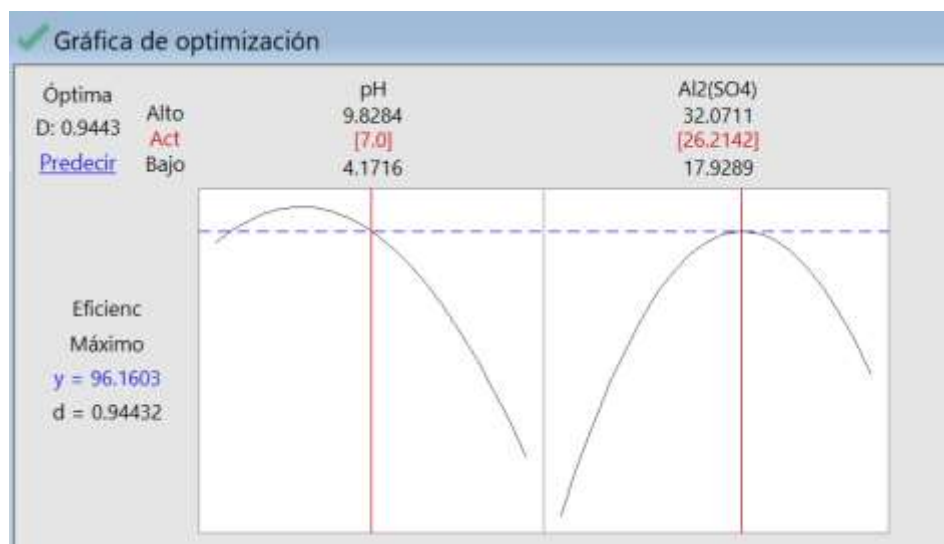


Figura 13: Gráfica de optimización a pH 7

En la figura 13 como en la figura anterior, se observan los valores de una segunda optimización, donde, se muestran para una eficiencia de remoción de la turbidez de 96.1% los valores de pH iguales a 7 y de la concentración del sulfato de aluminio 26.2 ppm, estos valores de las dos optimizaciones se utilizarán para el desarrollo

de los experimentos en la siguiente fase con la matriz factorial 2^3 .

Con los resultados obtenidos se valida la primera hipótesis específica, donde, los parámetros de pH a valores de 5 y 7, y la concentración del sulfato de aluminio con valores de 25.67 y 26.21 tienen un efecto significativo sobre la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética.

3.1.1.1. Implementación del diseño factorial 2^k para la disminución de la concentración del coagulante sulfato de aluminio con la utilización de fibra textil natural

El diseño de experimentos (DOE) factorial puede definirse como un proceso que consiste en plantear los pasos necesarios que se deben seguir, así como el orden de estos, para una recolección y posterior análisis de la información que requiere estudiar un problema de investigación. Su objetivo es el de obtener el máximo de información requerida por el experimento con el mínimo coste y la máxima eficiencia. Un buen diseño es aquel que es capaz de proporcionar exactamente el tipo de información que se busca, con precisión, y es más eficiente cuando proporciona esta información con un número menor de datos.

En un diseño factorial, cada uno de los niveles de cada factor independiente se combina con cada uno de los niveles de los demás, para así realizar todas las combinaciones posibles. Cada una de las combinaciones se convierte en una condición para el experimento. Esto produce que los experimentos sean más eficientes, dado que se puede proporcionar información de los efectos de todos los factores en relación a los niveles de los otros. Este efecto se define como el cambio en la respuesta del experimento producido por un cambio de nivel en el factor.

En esta segunda fase de la experimentación, se decidió implementar un modelo factorial 2^3 , donde los factores que se pondrán a prueba son el pH, la longitud de

la fibra textil y la concentración del sulfato de aluminio para obtener como respuesta la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética, con dos repeticiones para minimizar el posible error de la experimentación. Los valores de las variables independientes y dominio experimental se muestran en la siguiente tabla 11:

Tabla 11: Tabla de factores con el dominio experimental

Factores	Dominio Experimental	
	Nivel -	Nivel +
X1: pH	5	7
X2: Longitud de fibra de algodón mm (peso 0.1 gr y diámetro 0.1 mm)	5	10
X3: Concentración del sulfato de aluminio (ppm)	13	18

Los valores de la variable pH y concentración se obtuvieron de la primera fase de experimentación, donde se optimizaron las respuestas obteniéndose valores de pH 5 y 7 y de concentración del coagulante iguales a 25.67 y 26.21 ppm respectivamente, estos valores se promediaron obteniéndose el valor de 26 ppm, de este valor final de concentración se calcularon las concentraciones para la segunda experimentación disminuyendo la concentración del sulfato de aluminio en un 50 y 30 %, resultando los valores de 13 y 18 ppm (50 y 70%), se espera que estos valores remuevan la turbidez del agua residual sintética con eficiencias cercanas a las de la primera experimentación.

El tamaño de la fibra textil se determinó por los antecedentes de investigación,

donde se menciona la aplicación de residuos textiles de tipo natural, siendo este el algodón, con dos longitudes de fibra textil 5 y 10 mm, con un grosor para ambos casos cercanos a 0.1 milímetros. En la tabla 12 se muestra la matriz de diseño y plan de experimentación.

Tabla 12: Matriz de diseño y plan de experimentación

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	pH	longitud algodón	Al ₂ (SO ₄) ₃
1	1	1	1	1	5	5	13
2	2	2	1	1	7	5	13
3	3	3	1	1	5	10	13
4	4	4	1	1	7	10	13
5	5	5	1	1	5	5	18
6	6	6	1	1	7	5	18
7	7	7	1	1	5	10	18
8	8	8	1	1	7	10	18

Se aleatorizaron los experimentos antes de desarrollarlos en el laboratorio, esto de acuerdo a la literatura científica que sustenta que la aleatorización es necesaria para eliminar el sesgo de la estimación de medidas dadas por factores externos, dar validez a la estimación del error experimental, generar independencia de los errores experimentales y dar robustez al análisis. Luego se realiza el procesamiento de los datos obteniéndose los resultados que se muestran a continuación.

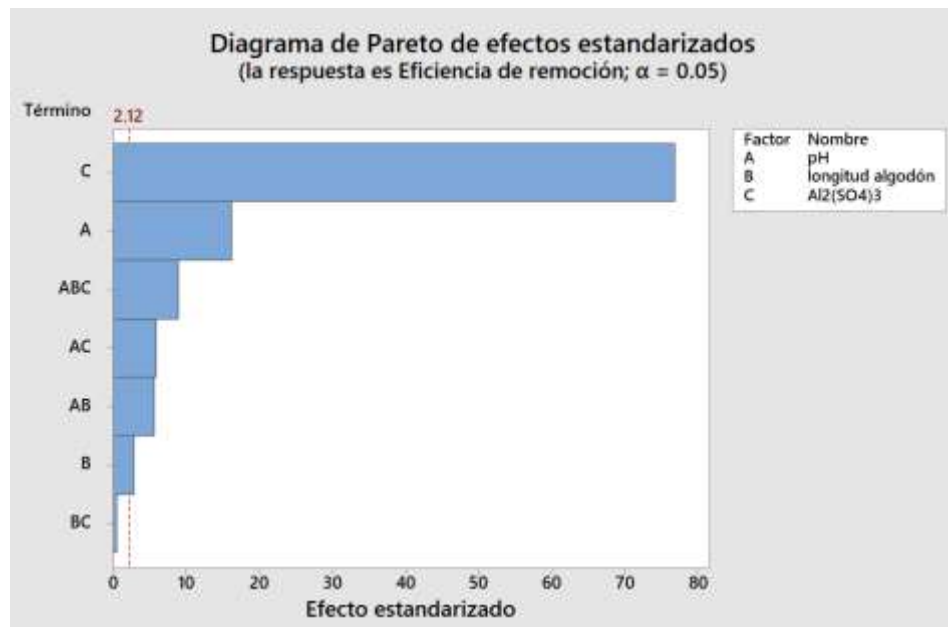


Figura 14: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

El diagrama de Pareto al igual que el caso anterior del MSR, muestra los efectos de las variables independientes tanto de los efectos principales como de interacción. En la figura 14 los efectos principales C, A y B corresponden a la dosificación del sulfato de aluminio, pH y algodón siendo la variable que tiene mayor significancia la concentración del coagulante, seguido del pH y luego el tamaño de fibra. Otro aspecto importante, que es de interés en el análisis de los efectos, es la interacción de todas las variables, dando a entender que todas las tres variables de forma conjunta tienen efecto significativo sobre la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	24761.3	3537.3	903.15	0.000
Lineal	3	24183.5	8061.2	2058.17	0.000
pH	1	1027.0	1027.0	262.22	0.000
longitud algodón	1	30.4	30.4	7.76	0.013
Al ₂ (SO ₄) ₃	1	23126.0	23126.0	5904.52	0.000
Interacciones de 2 términos	3	262.5	87.5	22.34	0.000
pH*longitud algodón	1	126.0	126.0	32.18	0.000
pH*Al ₂ (SO ₄) ₃	1	135.4	135.4	34.56	0.000
longitud algodón*Al ₂ (SO ₄) ₃	1	1.0	1.0	0.27	0.613
Interacciones de 3 términos	1	315.4	315.4	80.52	0.000
pH*longitud algodón*Al ₂ (SO ₄) ₃	1	315.4	315.4	80.52	0.000
Error	16	62.7	3.9		
Total	23	24824.0			

Figura 15: Análisis de varianza

En la figura 15 se muestran los p valores que validan el modelo de regresión de la matriz factorial, la interacción tiene significancia en dos de los casos, siendo solo el caso de la longitud del algodón con la concentración Al₂(SO₄)₃ no significativo, esto se puede explicar de la siguiente manera, cuando interaccionan estas dos variables entonces no se esperaría que tengan alguna relación entre ellas para dar efecto sobre la variable respuesta, y por ello, es mejor retirar esta interacción “longitud algodón*Al₂(SO₄)₃” no significativa del modelo.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	6	24760.2	4126.7	1101.18	0.000
Lineal	3	24183.5	8061.2	2151.05	0.000
pH	1	1027.0	1027.0	274.06	0.000
longitud algodón	1	30.4	30.4	8.11	0.011
Al ₂ (SO ₄) ₃	1	23126.0	23126.0	6170.98	0.000
Interacciones de 2 términos	2	261.4	130.7	34.88	0.000
pH*longitud algodón	1	126.0	126.0	33.63	0.000
pH*Al ₂ (SO ₄) ₃	1	135.4	135.4	36.12	0.000
Interacciones de 3 términos	1	315.4	315.4	84.16	0.000
pH*longitud algodón*Al ₂ (SO ₄) ₃	1	315.4	315.4	84.16	0.000
Error	17	63.7	3.7		
Falta de ajuste	1	1.0	1.0	0.27	0.613
Error puro	16	62.7	3.9		
Total	23	24824.0			

Figura 16: Análisis de varianza después del ajuste de variables

En la figura 16 se tienen los valores con el ajuste del modelo retirando la interacción “no significativa”. Los p valores tanto para el modelo lineal, interacciones de 2 términos y la interacción de 3 términos son menores a 0.05, siendo estos significativos en todos los casos. La interacción de 3 términos es la que tiene una significancia para el experimento, puesto que de esta forma se demuestra que la interacción de un determinado pH, con un determinado tamaño de fibra textil y a una dosificación determinada tienen efecto sobre la eficiencia de remoción de la turbidez.

El error del modelo tiene un valor de 0.613 el cual se entiende que la falta de ajuste es no significativo, de tal forma, el ajuste del modelo es el adecuado y interpretando los datos del resumen del modelo que se presenta a continuación se puede validar el modelo de regresión.

Resumen del modelo		
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)
1.93586	99.74%	99.65%

Figura 17: Resumen del modelo de regresión

En la figura 17 se muestra los valores que nos ayudan a validar el modelo de regresión, el R cuadrado es igual a 99.74, siendo este valor significativo para el modelo, el R cuadrado ajustado 99.65%, el cual es ligeramente menor que el R cuadrado, este valor se da por el ajuste que se da al modelo por la cantidad de variables independiente dentro del mismo.

Una vez validado el modelo de regresión, pasamos a revisar la ecuación de regresión, la cual se utilizará para poder implementar un proceso de optimización utilizando el método de superficie de respuesta.

Ecuación de regresión en unidades codificadas

$$\begin{aligned} \text{Eficiencia de remoción} = & 50.542 + 6.542 \text{ pH} + 1.125 \text{ longitud algodón} + 31.042 \text{ Al}_2(\text{SO}_4)_3 \\ & + 2.292 \text{ pH} \cdot \text{longitud algodón} + 2.375 \text{ pH} \cdot \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \\ & + 3.625 \text{ pH} \cdot \text{longitud algodón} \cdot \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \end{aligned}$$

Figura 18: Ecuación de regresión

3.1.1.2. Análisis de los efectos principales para la eficiencia de remoción de turbidez

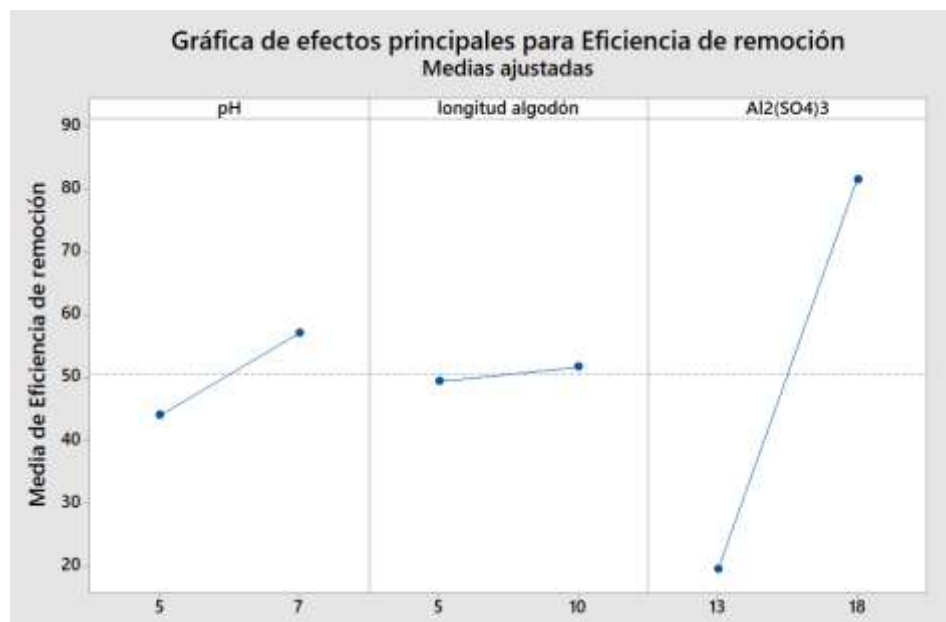


Figura 19: Gráfica de efectos principales para la eficiencia de remoción de turbidez

En la figura 19 podemos observar que el cambio en menor o mayor medida de las variables independientes tienen un efecto sobre la variable respuesta, siendo la dosificación del sulfato de aluminio una de las variables que presenta mayor efecto en función de su dosificación, siendo así, que el valor de 18 ppm de sulfato de aluminio (representa el 70% del valor original) es el que más influye en la eficiencia de remoción de la turbidez en el agua residual sintética. También podemos ver que a mayor longitud de fibra y mayores valores de pH se obtienen mayores efectos sobre la variable respuesta.

3.1.1.3. Gráfica de cubos con las medias ajustadas sobre la Eficiencia de remoción de turbidez del agua residual sintética

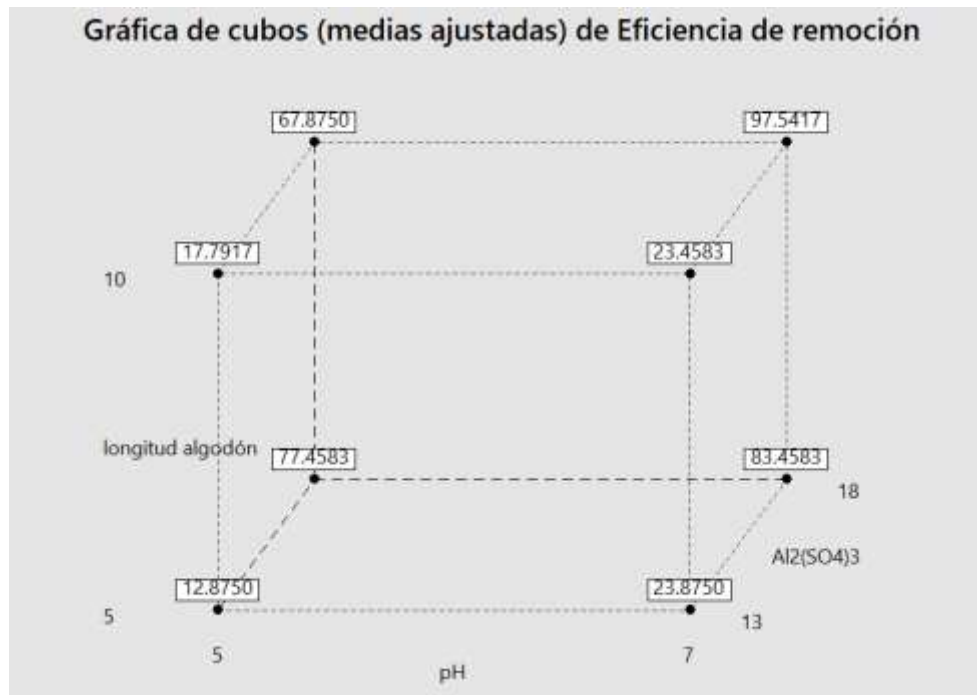


Figura 20: Gráfica de cubos de la eficiencia de remoción de turbidez

En la figura 20 se muestran los valores de eficiencia de remoción de turbidez obtenidos con la ecuación de regresión, el valor más alto de eficiencia de remoción es 97.5417 el cual se obtiene cuando el pH tiene un valor de 7, la longitud de la fibra de algodón tiene un valor de 10mm, y la concentración del sulfato de aluminio tiene un valor de 18 ppm. La eficiencia de remoción más baja se obtiene cuando el valor de pH es igual a 5, el valor de la longitud de fibra de algodón es igual a 5mm y la concentración del sulfato de aluminio es igual a 13 ppm. De esta manera determinamos que se obtiene una alta eficiencia de remoción de la turbidez con una disminución de la concentración del sulfato de aluminio en un 30% cuando se utiliza la fibra textil de mayor longitud y el mayor valor de pH.

3.1.1.4. Análisis de las gráficas de superficie de respuesta

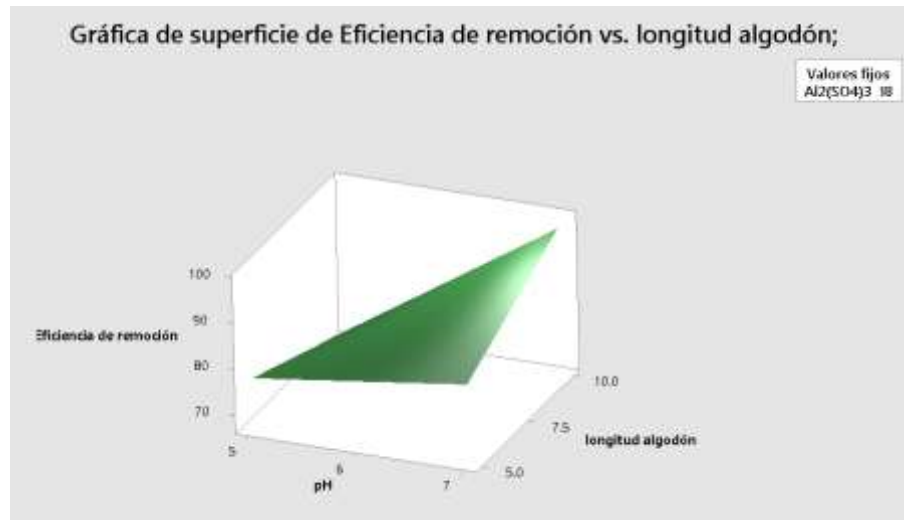


Figura 21: Gráfica de superficie de respuesta para la eficiencia de remoción de la turbidez

La figura 21 nos muestra la interacción de la longitud de la fibra de algodón con el pH, viéndose que a mayor longitud de algodón con un pH de 7 se obtiene la mayor eficiencia de remoción de la turbiedad teniendo en cuenta que el valor que opta la dosificación es de 18 ppm.

De forma adicional para completar el análisis de los datos experimentales, se desarrolla el gráfico de optimización, donde podemos observar que para obtener una eficiencia máxima de remoción de turbidez al 97.54% se tienen que utilizar los valores de pH iguales a 7, longitud de la fibra de algodón igual a 10mm y la dosificación del coagulante sulfato de aluminio tiene que ser igual a 18 ppm.

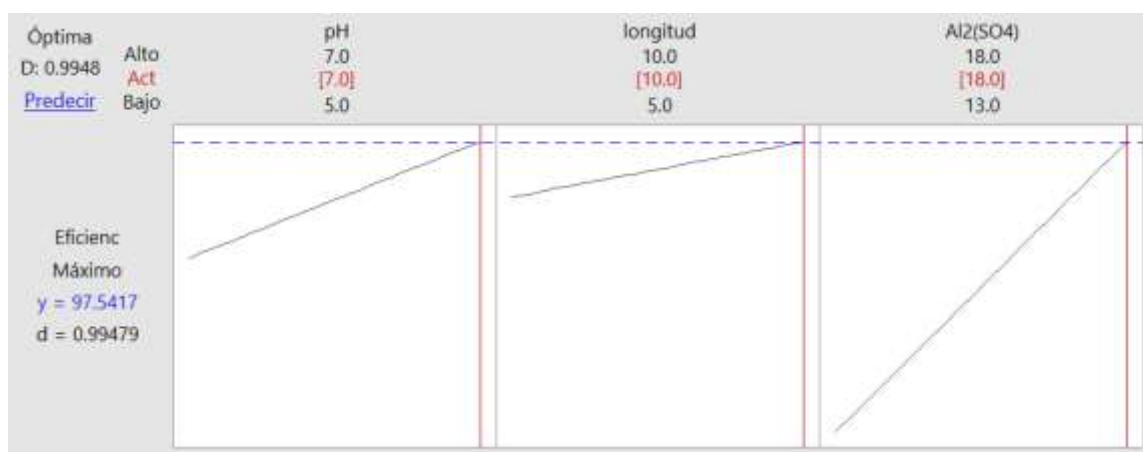


Figura 22: Gráfica de optimización de la eficiencia de remoción de la turbidez

De esta forma podemos concluir esta segunda parte de la experimentación, donde se puso a prueba las variables de pH (5 y 7), longitud de fibra de algodón (5 y 10 mm) y la dosificación del sulfato de aluminio (13 y 18 ppm) para obtener una eficiencia de remoción de la turbidez lo más cercano posible a los valores de eficiencia de la primera fase de experimentación. Se obtuvo una eficiencia de remoción de la turbidez del 97.54% con la aplicación de un pH igual a 7, una longitud de fibra de algodón igual a 10mm y una concentración de 18 ppm, donde se observó la formación de flóculos después de la coagulación, esto gracias a que la fibra de algodón ayuda a atrapar mayor cantidad de materia suspendida del agua durante la coagulación, entendiéndose que durante la formación de los flóculos las fibras sirven como enlaces que aglomeran (atrapan) mayor cantidad de material suspendido originando flóculos que son decantables.

El proceso de coagulación se realizó en el mezclador magnético durante 2 minutos a una velocidad de 100 rpm, luego se reduce la velocidad de mezcla a 40 rpm por 10 minutos para dar lugar a la formación de flóculos, durante este proceso de floculación es que las fibras de algodón actúan como “puentes conectores” entre los flóculos que se generan en el agua residual, estos puentes “enlazan” los flóculos de menor tamaño para formar uno más grande el cual va a tener mejores características en el momento de la decantación.

Cabe resaltar que la dosificación de las fibras de algodón se realizó en distintos momentos durante el proceso de coagulación, determinándose que la mejor aplicación de la fibra es durante la dosificación del coagulante, añadiéndose al agua residual de forma conjunta, el coagulante con la fibra textil. Se observó que añadir la fibra antes o después de la dosificación del coagulante da como resultado el flote de algunas fibras las cuales no participan del proceso de coagulación-floculación y

quedan como residuos en el agua tratada.

En los resultados de los experimentos se observó que se obtiene menor efecto la utilización de una longitud menor de la fibra de algodón, esto se explica que teniendo una longitud mayor, es más fácil que la fibra atrape (enlace) mayor cantidad de flóculos de diferentes tamaños que se encuentran en el agua residual entendiéndose que cuando la fibra es corta, no alcanza atrapar(enlazar) la cantidad necesaria de flóculos para que tengan significancia en la decantación, de igual forma el pH que tuvo mejor efecto es el valor de 7, esto debido a que el coagulante sulfato de aluminio genera mayor eficiencia de remoción de la turbiedad con valores de pH cercanos a 7 ± 0.5 , este valor lo podemos comparar con los resultados de la primera experimentación donde se obtuvieron los valores de eficiencia de remoción de turbidez más altos con un pH igual al valor de 7.

Con los valores obtenidos en esta parte de la investigación, se valida la segunda hipótesis de investigación, donde, el pH con el valor de 7, la longitud de fibra de algodón con el valor de 10 mm y la concentración del coagulante con el valor de 18 ppm tienen un efecto significativo en la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética.

3.1.1.5. Implementación del diseño factorial 2k para la disminución de la concentración del sulfato de aluminio con la utilización de fibra textil sintética

En esta tercera experimentación se utilizó el modelo factorial 2^3 , con los factores de pH, longitud de fibra textil sintética y concentración del sulfato de aluminio, para obtener como respuesta la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual

sintética, con dos repeticiones para minimizar el posible error de la experimentación. Los valores de las variables independientes y dominio experimental se muestran en la tabla 13.

Tabla 13: Factores y dominio experimental

Factores	Dominio Experimental	
	Nivel -	Nivel +
X1: pH	5	7
X2: Longitud de fibra sintética de Nylon mm (peso 0.1 gr y diámetro 0.1 mm)	5	10
X3: Concentración del sulfato de aluminio	13	18

Los valores de la variable pH, y concentración se obtuvieron de la primera experimentación los cuales son 5, 7 y 25.67, 26.21 ppm respectivamente. El valor de la concentración se promedió obteniéndose el valor de 26 ppm, de este valor se calcularon las concentraciones del sulfato de aluminio con una disminución en 50 y 30 %, resultando los valores que se utilizaron para esta tercera parte del experimento de 13 y 18 ppm (50 y 70%), se espera que estos valores remuevan la turbidez del agua residual sintética con eficiencias cercanas a las de la primera fase de experimentación.

La longitud de la fibra textil se determinó por los antecedentes de investigación, el cual fue explicado en la segunda fase de experimentación.

Para esta fase de experimentación se utilizó un residuo textil sintético, eligiéndose

para el experimento el Nylon 6, esto se determinó con el fin de comparar el efecto que da diferentes tipos de fibra textil sobre la eficiencia de remoción de la turbidez, en la tabla 14 se muestra la matriz de diseño y plan de experimentación

Tabla 14: Matriz de diseño

*	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	pH	Longitud nylon	Al ₂ (SO ₄) ₃
1	1	1	1	1	5	5	13
2	2	2	1	1	7	5	13
3	3	3	1	1	5	10	13
4	4	4	1	1	7	10	13
5	5	5	1	1	5	5	18
6	6	6	1	1	7	5	18
7	7	7	1	1	5	10	18
8	8	8	1	1	7	10	18

Se aleatorizaron los experimentos antes de desarrollarlos en el laboratorio, esto de acuerdo a la literatura científica que sustenta que la aleatorización es necesaria para eliminar el sesgo de la estimación de medidas dadas por factores externos, dar validez a la estimación del error experimental, generar independencia de los errores experimentales y dar robustez al análisis. Luego se procedió a procesar los datos obteniéndose los resultados que se muestran a continuación.

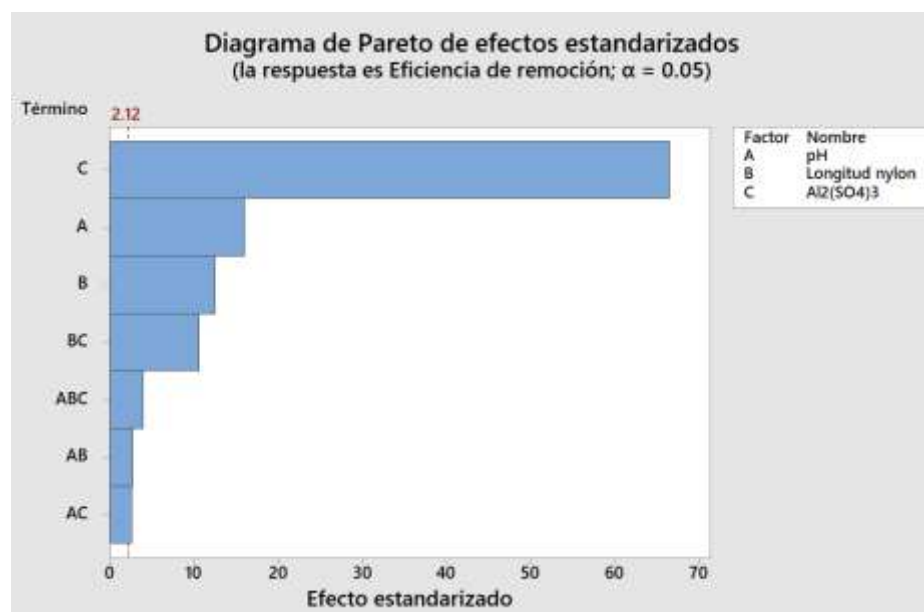


Figura 23: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

El diagrama de Pareto muestra los efectos de las variables independientes tanto de los efectos principales como de interacción. En la figura 23 los efectos principales C, A y B corresponden a la concentración del sulfato de aluminio, pH y longitud de fibra de nylon 6, siendo la variable que tiene mayor significancia la concentración del coagulante, seguido del pH y luego de la longitud de fibra. Otro aspecto importante, que es de interés en el análisis de los efectos, es la interacción de todas las variables, observándose que los resultados de 2 interacciones y de 3 interacciones tienen efecto significativo sobre la variable respuesta.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	27256.7	3893.8	713.37	0.000
Lineal	3	26468.2	8822.7	1616.38	0.000
pH	1	1410.7	1410.7	258.44	0.000
Longitud nylon	1	864.0	864.0	158.29	0.000
Al ₂ (SO ₄) ₃	1	24193.5	24193.5	4432.40	0.000
Interacciones de 2 términos	3	700.3	233.4	42.77	0.000
pH*Longitud nylon	1	42.7	42.7	7.82	0.013
pH*Al ₂ (SO ₄) ₃	1	37.5	37.5	6.87	0.019
Longitud nylon*Al ₂ (SO ₄) ₃	1	620.2	620.2	113.62	0.000
Interacciones de 3 términos	1	88.2	88.2	16.15	0.001
pH*Longitud nylon*Al ₂ (SO ₄) ₃	1	88.2	88.2	16.15	0.001
Error	16	87.3	5.5		
Total	23	27344.0			

Figura 24: Análisis de varianza

En la figura 24 se muestran los p valores, tanto para el modelo lineal, como para las interacciones de 2 términos y de 3 términos, siendo en todos los casos menores a 0.05, resultando significativos. La interacción de 3 términos es la que tiene una mayor significancia para el experimento, puesto que de esta forma se demuestra que la interacción de un determinado pH, con una determinada longitud de fibra textil sintética y a una concentración determinada tienen efecto sobre la eficiencia de remoción de la turbidez.

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)
2.33631	99.68%	99.54%

Figura 25: Resumen del modelo de regresión

En la figura 25 se muestran los valores que nos ayudan a validar el modelo de regresión, el R cuadrado es igual a 99.68, siendo este valor significativo para el modelo, el R cuadrado ajustado 99.54%, este valor se da por el ajuste que se da al R cuadrado por la cantidad de variables independientes que se incluyen dentro del modelo, siendo este valor también significativo.

Una vez validado el modelo de regresión, pasamos a revisar la ecuación de regresión, la cual se utilizará para poder implementar un proceso de optimización utilizando el método de superficie de respuesta.

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\begin{aligned}
 \text{Eficiencia de remoción} = & -262.2 + 31.73 \text{ pH} + 15.11 \text{ Longitud nylon} + 23.40 \text{ Al}_2(\text{SO}_4)_3 \\
 & - 4.22 \text{ pH} * \text{Longitud nylon} - 2.800 \text{ pH} * \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \\
 & - 1.027 \text{ Longitud nylon} * \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \\
 & + 0.3067 \text{ pH} * \text{Longitud nylon} * \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3
 \end{aligned}$$

Figura 26: Ecuación de regresión

3.1.1.6. Análisis de los efectos principales para la eficiencia de remoción de turbidez

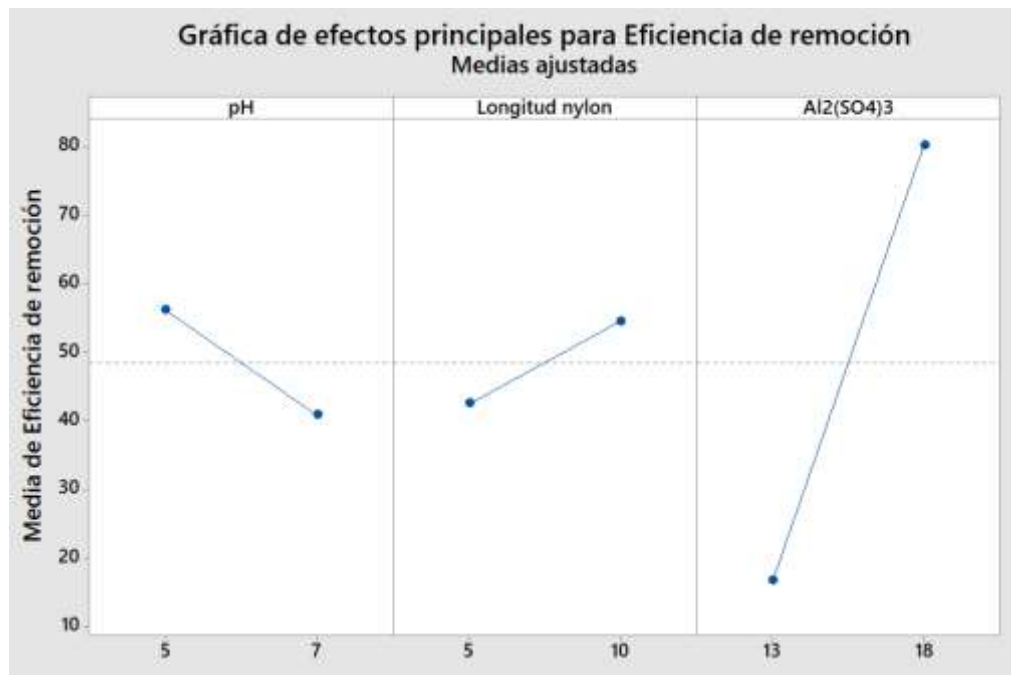


Figura 27: Gráfica de efectos principales para la eficiencia de remoción de turbidez

En la figura 27 podemos observar que el cambio en menor o mayor medida de las variables independientes tienen un efecto sobre la variable respuesta, siendo el sulfato de aluminio una de las variables que presenta mayor efecto en función de su concentración, siendo así, que el valor de 18 ppm de sulfato de aluminio (representa el 70% del valor original) el que más efecto tiene sobre la eficiencia de remoción de la turbidez en el agua residual sintética.

El valor de la fibra textil sintética que tiene mayor efecto en la remoción es de mayor longitud y el pH que tiene mayor efecto sobre la variable respuesta es cuando se utiliza un pH menor.

3.1.1.7. Análisis de las interacciones de las variables independientes sobre la eficiencia de remoción de la turbidez

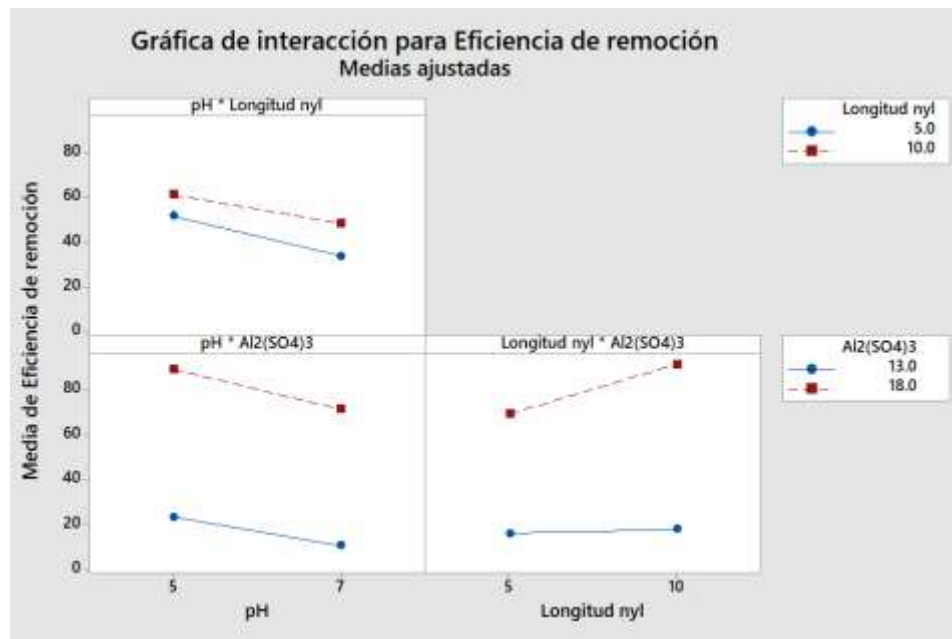


Figura 28: Interacciones de las variables independientes

En la primera gráfica se muestra la interacción del pH con la longitud de la fibra de nylon 6, donde se observa que con una longitud de 10mm y un pH de 5 se obtiene mejor efecto sobre la eficiencia de remoción de turbidez.

En el segundo gráfico se observa que a mayor concentración del coagulante sulfato de aluminio con el menor valor de pH se obtiene la mayor eficiencia de remoción de la turbidez.

En el tercer gráfico se observa que utilizando la mayor concentración del coagulante con el menor valor de pH se obtiene mayor remoción de la turbidez del agua residual sintética con el mayor valor de longitud de fibra.

3.1.1.8. Gráfica de cubos con las medias ajustadas sobre la Eficiencia de remoción de turbidez del agua residual sintética

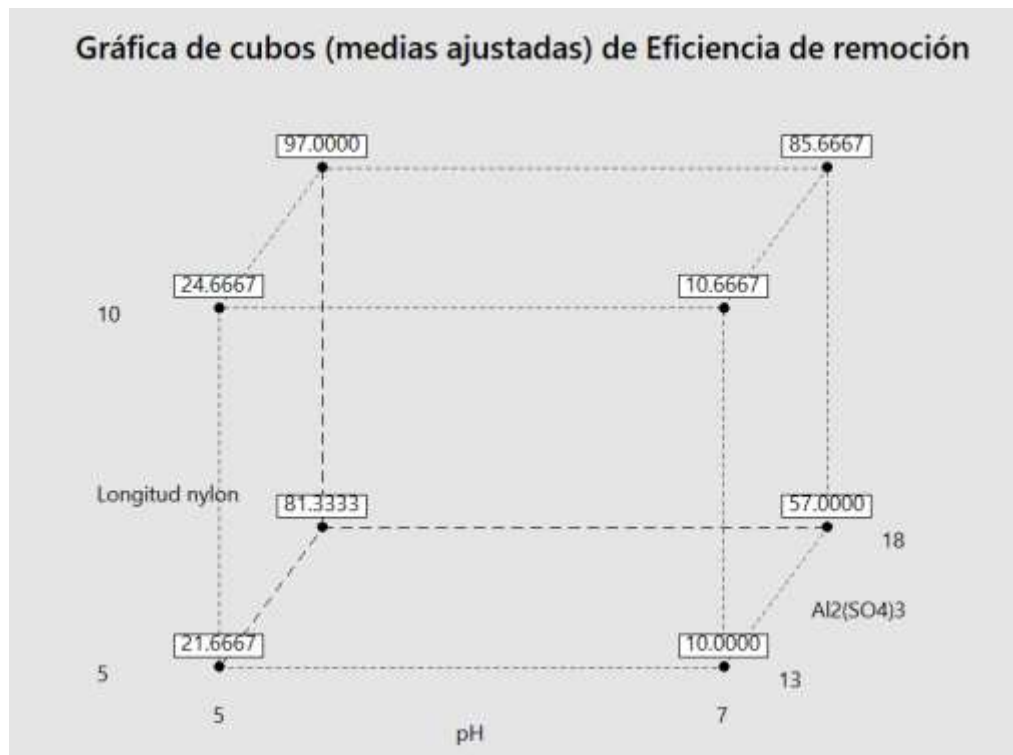
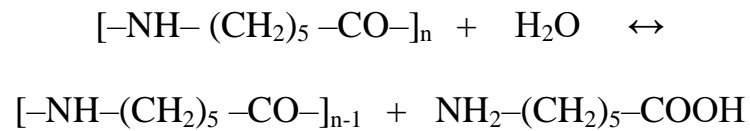


Figura 29: Gráfica de cubos de la eficiencia de remoción de turbidez

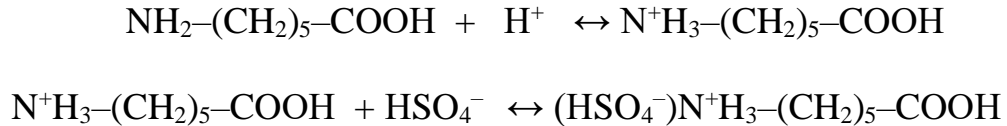
En la figura 29 se muestran los valores de eficiencia de remoción de turbidez obtenidos con la ecuación de regresión, el valor más alto de eficiencia de remoción es 97.00 el cual se obtiene cuando el pH tiene un valor de 5, la longitud de la fibra de nylon 6 tiene un valor de 10mm, y la concentración del sulfato de aluminio tiene un valor de 18 ppm. La eficiencia de remoción más baja de 10.00% se obtiene cuando el valor de pH es 7, los valores de la longitud de fibra de nylon 6 es igual a 5mm y la concentración de sulfato de aluminio es igual a 13. Se puede determinar que se obtiene una alta eficiencia de remoción de la turbidez con una disminución de la concentración del sulfato de aluminio en un 30% de su valor original cuando se utiliza la fibra textil sintética de mayor longitud con el menor valor del pH.

El bajo valor del pH y su efecto sobre la variable respuesta se puede explicar de la siguiente manera, cuando los valores de pH son ácidos, el tipo de fibra textil nylon 6 se hidroliza, generando una composición que posee características coagulantes, dando este efecto un valor agregado a la utilización de este tipo de residuos textiles sintéticos, como aditivos, con buenas perspectivas para su uso como coagulantes binarios.

Se busco información en la literatura científica (Cornejo, 2014) para poder explicar el efecto del pH ácido en la eficiencia de remoción de turbidez con la utilización de la fibra textil sintética nylon 6, explicando este proceso de la siguiente manera: cuando el nylon 6 se encuentra en un medio ácido, en primer lugar, se hidroliza formando ácido aminocaproico.



Después el ácido aminocaproico se protoniza y forma sales de amonio por la acción del ácido sulfúrico que se utiliza para bajar el pH al valor de 5, estas sales de amonio tienen características coagulantes, y por ello, aportan estas características coagulantes al agua residual.



3.1.1.9. Análisis de las gráficas de superficie de respuesta

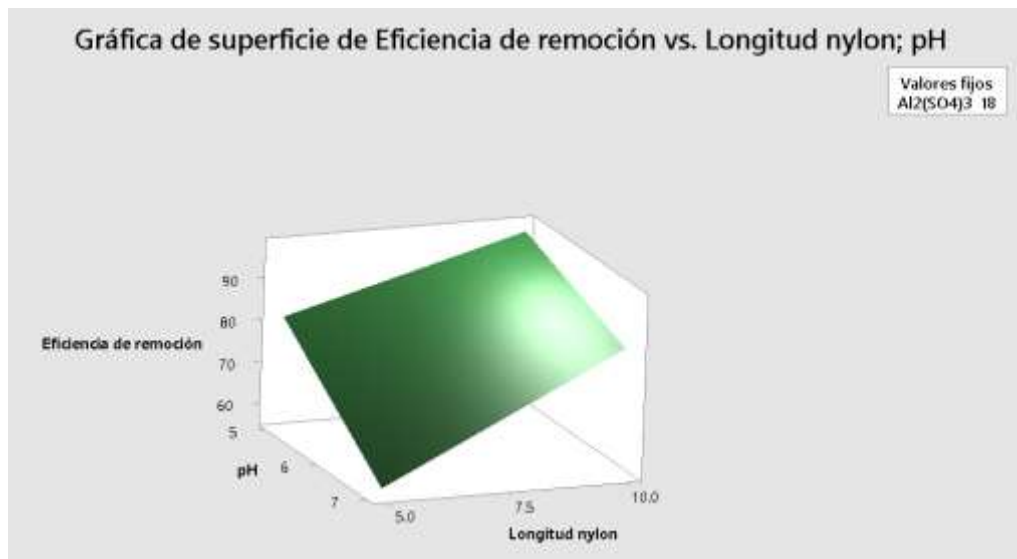


Figura 30: Gráfica de superficie de respuesta para la eficiencia de remoción de la turbidez

La figura 30 nos muestra la interacción de la longitud de la fibra de nylon 6 con el pH, viéndose que a mayor longitud de algodón con un pH de 5 se obtiene la mayor eficiencia de remoción de la turbiedad teniendo en cuenta que el valor que opta la concentración es de 18 ppm.

De forma adicional para completar el análisis de los datos experimentales, se desarrolla el gráfico de optimización, donde podemos observar que para obtener una eficiencia máxima de remoción de turbidez al 97.00% se tienen que utilizar los valores de pH iguales a 5, longitud de la fibra de nylon 6 igual a 10mm y la concentración del coagulante igual a 18 ppm.



Figura 31: Gráfica de optimización de la eficiencia de remoción de la turbidez

De esta forma se concluye con la tercera parte de la experimentación, donde se puso a prueba las variables de pH (5 y 7), longitud de fibra de nylon 6 (5 y 10 mm) y la concentración del sulfato de aluminio (13 y 18 ppm) para obtener una eficiencia de remoción de la turbidez que se encuentra cercano al valor de eficiencia de la primera fase de experimentación. En la optimización se obtuvo una eficiencia de remoción de la turbidez del 97.00% con la aplicación de un pH igual a 5, una longitud de fibra de nylon 6 igual a 10mm, se observó que que la fibra de nylon 6 ayuda a atrapar materia suspendida para la formación de flóculos. Además, se podría suponer la acción positiva que genera la transformación del nylon a componentes coagulantes en medios ácidos, pero durante la experimentación se observó que el nylon 6 no cambia su aspecto físico para convertirse en coagulante, esto puede ser por el valor de pH, que fue solamente de 5, encontrándose evidencia científica donde esta transformación ocurre cuando el pH es igual a 3. Este hallazgo nos da la hipótesis que solo una pequeña parte del nylon se convierte en componentes coagulantes, pero no se logró determinar que tanta cantidad del nylon 6 se transforma en coagulante y cuando favorece a la coagulación, para ello se propone desarrollar más experimentos, para la obtención de mayor información de la generación de un coagulante a partir de nylon 6 a determinados valores de pH.

Cabe resaltar que la dosificación de las fibras textiles de nylon 6 se realizaron en distintos momentos durante el proceso de coagulación, determinándose que la mejor aplicación de la fibra es durante la dosificación del coagulante, agregándose al agua residual juntamente con el coagulante, se observó, al igual que en el segundo experimento, al añadir la fibra textil antes o después de la dosificación del coagulante, da como resultado el flote de algunas fibras textiles las cuales no participan en el proceso de coagulación-floculación y quedan como residuos en el

agua tratada.

En los resultados de los experimentos se observó que se obtiene menor efecto la utilización de una longitud menor de la fibra de nylon 6, esto se explica que teniendo una longitud “mayor”, es más fácil que la fibra atrape (enlace) mayor cantidad de flóculos de diferentes tamaños que se encuentran flotando en el agua residual, entendiéndose que las fibras de corta longitud enlazan poca cantidad de flóculos los cuales no muestran significancia en la experimentación, de igual forma el pH que tuvo mejor efecto es el valor de 5, como se mencionó líneas arriba, puede darse este resultado por el efecto adicional que le da la transformación del nylon 6 a un componente coagulante en medios ácidos.

Con los valores obtenidos en esta parte de la experimentación, se valida la tercera hipótesis específica de investigación, donde, el pH con el valor de 5, la longitud de fibra de nylon 6 con valor de 10mm. y la concentración del sulfato de aluminio con el valor de 18 ppm tienen un efecto significativo en la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética.

Con los resultados de la primera fase de experimentación, los cuales se detallan a continuación: los valores de pH fueron 5 y 7, los valores de la concentración de sulfato de aluminio fueron 25.67 y 26.21 ppm (promediándose este resultado a 26 ppm), obteniéndose eficiencias de remoción de 98.76% y 96.16%, respectivamente. Estos datos se utilizaron para desarrollar la segunda y tercera experimentación. En la segunda experimentación las variables de pH con el valor de 7, longitud de fibra de algodón con el valor de 10mm. y la concentración del sulfato de aluminio con el valor de 18 ppm demostraron tener un efecto significativo sobre la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética obteniéndose el valor de 97.5%. En la tercera experimentación las variables pH con el valor de 5, la longitud de la fibra sintética de nylon 6 con el valor de 10mm. y la concentración del sulfato de aluminio con el valor de 18 ppm demostraron tener un

efecto significativo sobre la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética con un valor del 97%. De tal forma, con los datos obtenidos de toda la investigación, se contrasta la hipótesis general de investigación, validando el enunciado, demostrando que el efecto del coagulante binario es significativo en la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética.

3.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Durante las pruebas experimentales se obtuvieron flóculos de buenas características con la utilización de fibras textiles naturales y sintéticas con longitudes de 10 mm, representado por su decantación y separación de fases logrando la clarificación del agua residual sintética con resultados de eficiencia de remoción del 97%. Resultados similares se obtuvieron en el trabajo de (Cornejo, 2014), donde se obtuvieron flóculos de buenas características después de la aplicación de coagulantes binarios, se coincidió en la utilización de las fibras de longitud de 10 mm observándose formación de flóculos después del proceso de coagulación, disminuyendo en un 30% la concentración de coagulante, de igual manera se coincidió en la forma de dosificación de las fibras textiles, el cual tiene que ser juntamente con el coagulante, para que las fibras textiles se encuentren húmedas en el momento que entren en contacto con el agua residual, de tal forma participen del proceso de coagulación - floculación observándose en caso contrario, el flote en la superficie de algunas fibras que generan residuos en el agua tratada. No se coincidió en la disminución de la concentración del coagulante en un 50%, observándose que la aplicación de coagulantes binarios para la remoción de la turbidez, da los mejores resultados cuando se disminuye la concentración del sulfato de aluminio en tan solo un 30%.

Se utilizó una velocidad de agitación de 100 rpm en el agitador magnético para el proceso de coagulación, para ello se utilizó la información de (Castellares, 2015), (Portilla, 2017), donde se realizan los procesos de coagulación a una velocidad de 100 rpm durante 2 minutos, obteniéndose una completa mezcla del coagulante en el agua residual. (Medina, 2021) utilizó el coagulante sulfato de aluminio para reducir la turbiedad en aguas residuales a nivel piloto, determinando las dosis óptimas del coagulante a una concentración del 1% desde 10 hasta 50 ppm, para diferentes unidades de turbidez, se coincidió en la utilización de sulfato de aluminio

como la mejor opción por sus características coagulantes y por su gran utilización tanto en trabajos de investigación como en plantas de tratamiento de aguas para la remoción de la turbidez utilizando una concentración entre 20 y 30 ppm con resultados óptimos para la investigación. (Hu et al., 2022) y (Tunc, 2020) utilizaron el sulfato de aluminio como agente coagulante, demostrando buenos resultados y motivando a seguir estudiando las propiedades del sulfato de aluminio con el fin de mejorar sus resultados de remoción disminuyendo su concentración, se coincidió en los resultados de remoción de la turbidez, que a pesar que se realizaron en otros medios y con bajas concentraciones del coagulante, las eficiencias de remoción son altas sin afectar la calidad del agua tratada.

(Yahia et al., 2021) y (Vuppala et al., 2021) realizaron experimentos para la remoción de contaminantes a través de procesos de coagulación y floculación química, donde se implementaron las metodologías de superficies de respuesta para optimizar los resultados de la investigación, se coincidió en la aplicación del MSR para investigaciones de tratamiento de aguas residuales, validando los criterios del modelo para optimizar las respuestas y obtener valores máximos, mínimos u objetivos dependiendo de las necesidades de la investigación.

CONCLUSIONES

1. Los parámetros de pH y concentración del sulfato de aluminio dentro del marco estudiado, sin la utilización de las fibras textiles, tienen un efecto significativo sobre la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética, determinándose a través la optimización de la respuesta los valores de pH de 5 y 7; y los valores de la concentración del sulfato de aluminio de 25.67 y 26.21 ppm, para una eficiencia de remoción de la turbidez de 98.76 y 96.16%.
2. Se determinó que los parámetros de pH con el valor de 7, longitud de fibra natural de algodón con el valor de 10 mm y la concentración del sulfato de aluminio con el valor de 18 ppm tienen un efecto significativo en la eficiencia de remoción de turbidez del agua residual sintética con un valor de 97.54%, el cual se asemeja a los valores de eficiencia del primer experimento con valores de 98.76 y 96.16%, determinando que la adición de fibra de algodón en el proceso de coagulación contribuye en la disminución de la concentración del coagulante en un 30% manteniendo la eficiencia de remoción de turbidez.
3. Se determinó que los parámetros de pH con el valor de 5, longitud de fibra sintética de nylon 6 con el valor de 10 mm y la concentración del sulfato de aluminio con el valor de 18 ppm tienen un efecto significativo en la eficiencia de remoción de turbidez del agua residual sintética con un valor del 97%, el cual se asemeja a los valores del primer experimento con valores de 98.76 y 96.16%, determinando que la adición de fibra de nylon 6 en el proceso de coagulación contribuye en la disminución de la concentración del coagulante en un 30% manteniendo la eficiencia de remoción de turbidez.
4. Finalmente, se determinó que, el coagulante binario de fibras textiles con el sulfato de aluminio tiene un efecto significativo en la eficiencia de remoción

de la turbidez, obteniéndose valores de eficiencia del 97%, utilizándose en todos los casos las fibras de mayor longitud, la concentración del sulfato de aluminio de 18 ppm y el valor de pH 7 (para el coagulante binario con fibra de algodón) y pH 5 (para el coagulante binario de fibra de nylon).

RECOMENDACIONES

1. Realizar más estudios con la utilización del coagulante binario para la remoción de otros tipos de contaminantes de las aguas residuales.
2. Realizar más estudios con otras longitudes de la fibra textil para determinar el efecto que tienen sobre el tratamiento de las aguas residuales.
3. Realizar más estudios con valores bajos de turbiedad, para determinar si la hay efecto positivo de la remoción de la turbiedad cuando hay poca colisión de las partículas coaguladas, observando si las fibras pueden atrapar flóculos cuando hay pequeñas concentraciones de contaminantes.
4. Realizar el estudio de la generación de componentes coagulantes en medios ácidos de materiales sintéticos como el nylon 6, para determinar su perspectiva utilización como aditivo para el proceso de coagulación.
5. Realizar más estudios con otros tipos de residuos textiles para determinar su efecto sobre el tratamiento de las aguas residuales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

... W. L.-R.-P. de T. de A. R., & 2012, undefined. (s. f.). Fundamentos de diseño de plantas depuradoras de aguas residuales. *researchgate.net*. Recuperado 28 de diciembre de 2021, de [https://www.researchgate.net/profile/William-Antonio-Lozano-](https://www.researchgate.net/profile/William-Antonio-Lozano-Rivas/publication/298354134_Disenos_de_Plantas_de_Tratamiento_de_Aguas_Residuales/links/56e898e908ae9bcb3e1cd7f4/Diseno-de-Plantas-de-Tratamiento-de-Aguas-Residuales.pdf)

Rivas/publication/298354134_Disenos_de_Plantas_de_Tratamiento_de_Aguas_Residuales/links/56e898e908ae9bcb3e1cd7f4/Diseno-de-Plantas-de-Tratamiento-de-Aguas-Residuales.pdf.

Avellaneda Andrade, B. P. (2021). *Evaluación de un modelo mecanicista para la aireación de agua residual con difusor de burbuja fina*. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/6888>.

Barría, P. L. (2020). *Confeción y reutilización: desarrollo de un método de coloración natural a partir del orujo de uva para el reuso de fibras textiles de algodón*. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/175911>.

Bogotá, J. R. R.-, CO, undefined, de, E. C., & 2004, undefined. (s. f.). Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño. *dspace.scz.ucb.edu.bo*. Recuperado 28 de diciembre de 2021, de <https://dspace.scz.ucb.edu.bo/dspace/bitstream/123456789/22876/1/11991.pdf>.

Castellares, J. (2015). «EFECTOS DEL POLIHIDROXICLORURO DE ALUMINIO, VELOCIDAD DE AGITACIÓN Y pH EN LA TURBIDEZ DEL AGUA DEL RÍO SHULLCAS-HUANCAYO, 2013» [Universidad Nacional del Centro del Perú]. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNCP_7ba50627ccd014f986fe0404eb6557ca.

Cornejo, V. (2014). *Propiedades de la composición en base a cauchos sintéticos con aditivos anizotropicos*. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/100777/browse?type=author&order=DESC&rpp=100&value=Cornejo+Tueros%2C+José+Vladimir>.

Dayana, S., Villa, C., Andrés, S., Monsalve, Q., & Villa, L. V. (s. f.). El desperdicio de materia prima en la industria textil. *revistas.unal.edu.co*. Recuperado 28 de diciembre de 2021, de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ensayos/article/view/97859>.

Dbik, A., Messaoudi, N. El, Bentahar, S., Khomri, M. El, Lacherai, A., & Faska, N. (2022). Optimization of methylene blue adsorption on agricultural solid waste using box-behnken design

(BBD) combined with response surface methodology (RSM) modeling. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 12(4), 4567-4583. <https://doi.org/10.33263/BRIAC124.45674583>.

De, C., & Ambiental, I. (2021). *PROPUESTA DE UN PLAN DE GESTIÓN DE DESECHOS SÓLIDOS GENERADOS EN LA EMPRESA DE CONFECCIÓN TEXTIL JC SAN JUAN*. <http://181.198.35.98/Archivos/CASTRO FERNANDEZ NELSON ALFONSO.pdf>.

Dyna, J. C. F., & 2011, undefined. (s. f.). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. *scielo.org.co*. Recuperado 28 de diciembre de 2021, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532011000100002&script=sci_abstract&tlng=pt.

Fabiola, S., & Medina, C. (2020). *Gestión de desechos sólidos en una empresa textil alpaquera para reducir el impacto ambiental—Arequipa 2018-2019*. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/8081>.

García, H. H., & Méndez, G. B. (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño*. <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/30973>.

Gautam, P., Kumar, S., Vishwakarma, S., & Gautam, A. (2022). Synergistic optimization of electrocoagulation process parameters using response surface methodology for treatment of hazardous waste landfill leachate. *Chemosphere*, 290, 133255. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.133255>.

Hernández-Sampieri, R., & Torres, C. (2018). *Metodología de la investigación*. <https://dspace.scz.ucb.edu.bo/dspace/bitstream/123456789/21401/1/11699.pdf>.

Hu, R., Liu, Y., Zhu, G., Chen, C., Hantoko, D., & Yan, M. (2022). COD removal of wastewater from hydrothermal carbonization of food waste: Using coagulation combined activated carbon adsorption. *Journal of Water Process Engineering*, 45, 102462. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102462>.

Mallikarjuna, C., & Dash, R. R. (2022). Removal of Lignin from Wastewater Using an Industrial Waste as Adsorbent: A Statistical and Kinetic Modeling Approach. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 26(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hz.2153-5515.0000677](https://doi.org/10.1061/(asce)hz.2153-5515.0000677).

María, E., Carmen, M. del, & Victoria, M. (2018). *Metodología de investigación*.

<https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/31324>.

Medina, T. (2021). *Evaluación de los coagulantes sulfato de aluminio tipo A y policloruro de aluminio para reducir la turbiedad del agua de procesos para una planta piloto de flotación* [Universidad San Agustín de Arequipa]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12773/12922>.

Nikulin, S. S., Cornejo Tueros, J. V., & Pa, T. N. (2012). Specific features of rubber recovery from latex with poly-N,N-dimethyl-N,N-diallylammonium chloride in the presence of cotton fiber. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 85(6), 984-987. <https://doi.org/10.1134/S1070427212050962>.

Pérez, J. (2017). *Elaluación de la sustitución del agente coagulante sulfato de aluminio en el proceso actual de coagulación-floculación de agua potable en la empresa EAF SAS ESP* [Universidad de América]. <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6371>.

PICHARDO, P. P. (s. f.). *Elaboración y caracterización de materiales compuestos elaborados con resina poliéster, fibras textiles de desecho y agregados minerales, para su uso como bloque*. *ri.uaemex.mx*. Recuperado 28 de diciembre de 2021, de <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/99530>.

Portilla, J. (2017). *Determinación de las curvas características de la sedimentación tipo II con diferentes coagulantes comerciales a nivel de laboratorio* [Universidad Católica de Colombia]. [https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14455/1/PROYECTO SEDIMENTACION TIPO II.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14455/1/PROYECTO%20SEDIMENTACION%20TIPO%20II.pdf).

Ramalho, R. (2021). *Tratamiento de aguas residuales*. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=T9MfEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=tratamiento+de+aguas+residuales&ots=3jINmt3ozf&sig=SneyTKFzwoCc2hnN0bp0dGzdeVE>.

Residuales Monica Alejandra Bravo Gallardo, A., CASTRILLÓN CARDONA MsC, W., & ANDRÉS MATULEVICH PELÁEZ MsC, J. (2015). *Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales*. <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/5609>.

Satasiya, G. V., Bhojani, G., Kikani, M., Amit, C., Dineshkumar, R., & Kumar, M. A. (2022). Response surface algorithm for improved biotransformation of 1,4-dioxane using *Staphylococcus*

capitis strain AG. *Environmental Research*, 205, 112511.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112511>.

Tafur Bardales, E. H. (2018). Evaluación del cloruro férrico y sulfato de aluminio, como coagulantes en el proceso de potabilización, en términos de turbidez y potencial de hidrógeno, de las aguas de la quebrada Rumiyacu, distrito de Moyobamba. *Universidad Nacional de San Martín-Tarapoto*.
<http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/3044>.

Tafur, E. (2017). *Evaluación del cloruro férrico y sulfato de aluminio, como coagulantes en el proceso de potabilización, en términos de turbidez y potencial de hidrógeno, de las aguas de la quebrada Rumiyacu, distrito de Moyobamba* [Universidad Nacional San Martín].
<https://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/3044>.

Trujillo, D., Duque, L., Arcila, J., Rincón, A., Ion, S. P.-R., & 2014, undefined. (s. f.). Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *scielo.org.co*. Recuperado 28 de diciembre de 2021, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-100X2014000100003&script=sci_abstract&tlng=en.

Tunc, M. S. (2020). Co-pretreatment of municipal wastewater and landfill leachate by chemical coagulation using ferric chloride and aluminum sulfate. *Gazi University Journal of Science*, 33(4), 679-688. <https://doi.org/10.35378/gujs.645757>.

Vuppala, S., Shaik, R. U., & Stoller, M. (2021). Multi-response optimization of coagulation and flocculation of olive mill wastewater: Statistical approach. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(5), 1-10. <https://doi.org/10.3390/app11052344>.



Yahia, A., Fersi, C., Djebali, K., Salah, I. Ben, & Touati, F. (2021). Modeling and optimizing of coagulation–flocculation process by response surface methodology for rehabilitation of tannery wastewater treatment plant. *Desalination and Water Treatment*, 225, 175-189. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27229>.

**TITULO: “Evaluación de residuos textiles como coagulantes binarios
para la remoción de la turbidez en agua residual sintética”**






Formulación del Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Metodología
<p>Problema general •¿Qué efecto tiene la aplicación del coagulante binario en la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética?</p> <p>Problemas específicos •¿Cuáles son los parámetros de remoción de la turbidez del agua residual sintética sin la utilización del residuo textil? •¿Cuáles son los parámetros de remoción de la turbidez del agua residual sintética con la utilización de la fibra natural de algodón? •¿Cuáles son los parámetros de remoción de la turbidez del agua residual sintética con</p>	<p>Objetivo General Determinar el efecto que tiene la aplicación del coagulante binario en la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética.</p> <p>Objetivos Específicos •Determinar los parámetros de remoción de la turbidez del agua residual sintética sin la utilización del residuo textil. •Determinar los parámetros de remoción de la turbidez del agua residual sintética con la utilización de la fibra natural de algodón. •Determina</p>	<p>Hipótesis General •El efecto del coagulante binario es significativo en la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética.</p> <p>Hipótesis Específicas •Los parámetros de pH y concentración del coagulante sin la utilización de fibra textil tienen un efecto significativo en la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética. •Los parámetros de pH, longitud de fibra y concentración del coagulante tienen un efecto significativo en la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética con la utilización</p>	<p>Variable Dependiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia de remoción de la turbidez <p>Variable Independiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • pH • Longitud de fibra • Concentración del coagulante 	<p>Diseño de Investigación: Experimental</p> <p>Población de Estudio: Agua residual sintética.</p> <p>Población y Muestra: La población y muestra se obtienen de laboratorio, siendo la población 60 litros de agua residual sintética</p> <p>Técnicas e instrumentos de Recolección de Datos: Técnica “Medición” y el instrumento “Fichas estructuradas”</p> <p>Análisis e Interpretación de los resultados: Estadística descriptiva para la organización de los datos y la estadística inferencial para el procesamiento de los datos obtenidos en laboratorio.</p>






<p>la utilización de la fibra sintética de nylon 6?</p>	<p>r los parámetros de remoción de la turbidez del agua residual sintética con la utilización de la fibra sintética de nylon 6.</p>	<p>de la fibra natural de algodón. •Los parámetros de pH, longitud de fibra y concentración del coagulante tienen un efecto significativo en la eficiencia de remoción de la turbidez del agua residual sintética con la utilización de la fibra sintética de nylon 6.</p>		<p>98</p>
---	---	---	--	-----------

Determinaciones de rutina

1. Presionar la tecla .
2. Enjuagar la cubeta 3 veces con la prueba a analizar. A continuación llenar la cubeta con la prueba. Cerrar la cubeta con tapa y asegurarse de que las superficies exteriores estén limpias y secas.
3. Colocar y posicionar la cubeta en el departamento de medición Σ .
4. Cerrar el compartimento de medición con su tapa.
5. Iniciar la determinación presionando las teclas .
6. Leer el valor NTU analizado.

Calibración realizada por el usuario

Presionar la tecla  y mantenerla apretada. Encender el aparato con la tecla . En la pantalla aparecen 3 puntos decimales, soltar la tecla . La tecla  permite la selección de los siguientes puntos del menú: Ajuste por el usuario (Cal). Apretando la tecla  MODE se confirma la selección.

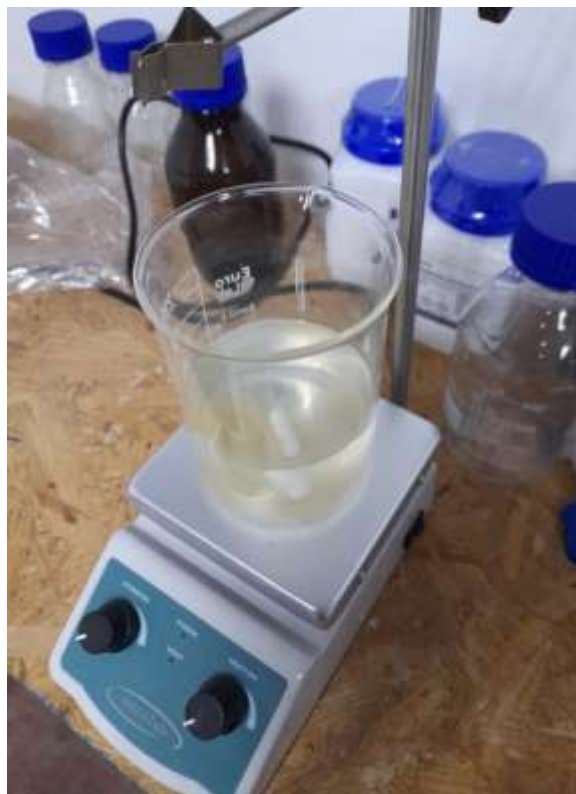
1. Colocar y posicionar el estándar < 0.1 NTU en el compartimento de medición Σ y cerrar éste con su tapa. Presionar la tecla . La determinación se realizará una vez terminado la cuenta atrás.
2. Colocar y posicionar el estándar 20 NTU en el compartimento de medición Σ y cerrar éste con su tapa. Presionar la tecla . La determinación se realizará una vez terminado la cuenta atrás.
3. Colocar y posicionar el estándar 200 NTU en el compartimento de medición Σ y cerrar éste con su tapa. Presionar la tecla . La determinación se realizará una vez terminado la cuenta atrás.
4. Colocar y posicionar el estándar 800 NTU en el compartimento de medición Σ y cerrar éste con su tapa. Presionar la tecla . La determinación se realizará una vez terminado la cuenta atrás.
5. Para memorizar presionar la tecla .

Procedimiento para la calibración del turbidímetro marca “LOVIBOND”

Materiales y equipos utilizados en laboratorio



Turbidímetro marca Lovibond



Mezclador magnético



Jeringas para la dosificación del coagulante



Recipiente para la elaboración del agua residual sintética



Arcilla comercial



Desechos textiles de material natural - algodón



Desechos textiles de material sintético – Nylon 6



Deshilachado de los materiales textiles (izquierda – material natural; derecha – material



Pesaje del material textil para los experimentos



Muestra de agua residual sintética



Medición de muestras en el turbidímetro para la primera experimentación



Resultado de turbidez del agua residual sintética



Resultado de la aplicación del sulfato de aluminio sin las fibras textiles (primera experimentación)



Valores de turbidez de la primera experimentación después de la aplicación del sulfato de aluminio



Resultado de la segunda fase de experimentación con fibras textiles naturales



Comparación del lodo formado sin las fibras textiles (izquierda) y con las fibras textiles de algodón (derecha)



Resultado de turbidez de la segunda experimentación



Resultado de la tercera experimentación con fibras textiles sintéticas



Comparación de los lodos generados en la primera experimentación sin fibras textiles con la tercera experimentación con fibras sintéticas



Resultado de turbidez de la tercera experimentación