



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ÓPTIMA ENTRE LA POLIACRILAMIDA Y EL
POLICLORURO DE ALUMINIO QUE OBTENGA LA MAYOR EFICIENCIA FLOCULANTE DE
ARCILLA EN AGUA A NIVEL DE LABORATORIO**

Evelyn Sucely de León Hernández
Asesorada por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, octubre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ÓPTIMA ENTRE LA POLIACRILAMIDA Y EL
POLICLORURO DE ALUMINIO QUE OBTENGA LA MAYOR EFICIENCIA FLOCULANTE DE
ARCILLA EN AGUA A NIVEL DE LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

EVELYN SUCELY DE LEÓN HERNÁNDEZ
ASESORADA POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. Estuardo Edmundo Monroy Benítez
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ÓPTIMA ENTRE LA POLIACRILAMIDA Y EL POLICLORURO DE ALUMINIO QUE OBTENGA LA MAYOR EFICIENCIA FLOCULANTE DE ARCILLA EN AGUA A NIVEL DE LABORATORIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 6 de julio de 2016.

Evelyn Sucely de León Hernández

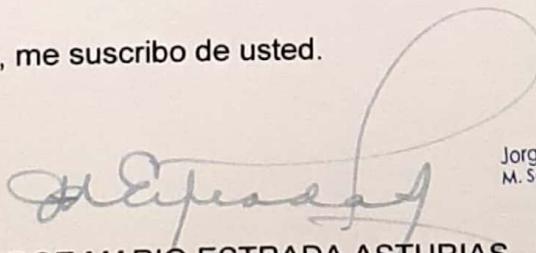
Guatemala, 17 de julio de 2019

Ingeniero
Williams Alvarez
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
USAC

Respetable Señor Director

Me dirijo a usted para informarle que a la presente fecha he revisado el informe final del trabajo de graduación titulado: **"DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ÓPTIMA ENTRE LA POLIACRILAMIDA Y EL POLICLORURO DE ALUMINIO QUE OBTENGA LA MAYOR EFICIENCIA FLOCULANTE DE ARCILLA EN AGUA A NIVEL DE LABORATORIO"**, del estudiante universitario EVELYN SUCELY DE LEÓN HERNÁNDEZ de la carrera de INGENIERÍA QUÍMICA con el carné No. 2285626510101 y registro académico No. 201020333, de quien estoy fungiendo como ASESOR. Siendo que los aspectos metodológicos del trabajo en cuestión llenan los requisitos técnicos que ameritan su aprobación, sirva la presente para patentizarlo a efecto de que se autorice el trabajo realizado y se proceda a continuar con los tramites subsiguientes.

Sin más por el momento, me suscribo de usted.



JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

Ing. Químico, colegiado 685

Jorge Mario ESTRADA ASTURIAS
M. Sc. Ingeniero Químico Col. 685
PROFESOR TITULAR
Facultad de Ingeniería
Registro USAC 20080059

Guatemala, 23 de septiembre de 2019.
Ref. EIQ.TG-IF.035.2019.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación del informe final correlativo **027-2016** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Seminario de Investigación-

Solicitado por la estudiante universitaria: **Evelyn Sucely de León Hernández**.
Identificada con número de carné: **2285626510101**.
Identificada con registro académico: **201020333**.
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

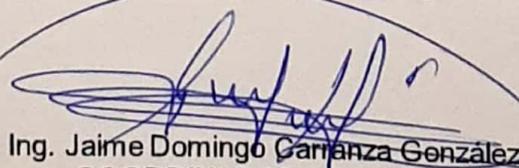
**DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ÓPTIMA ENTRE LA POLIACRILAMIDA
Y EL POLICLORURO DE ALUMINIO QUE OBTENGA LA MAYOR EFICIENCIA
FLOCULANTE DE ARCILLA EN AGUA A NIVEL DE LABORATORIO**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Mario Estrada Asturias**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.



"ID Y ENSEÑADA TODOS"


Ing. Jaime Domingo Carranza González
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Guatemala, 15 de octubre de 2021
Ref. EIQ.213.2021

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera
Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ÓPTIMA ENTRE LA POLIACRILAMIDA Y EL POLICLORURO DE ALUMINIO QUE OBTENGA LA MAYOR EFICIENCIA FLOCULANTE DE ARCILLA EN AGUA A NIVEL DE LABORATORIO** del(la) estudiante Evelyn Sucely de León Hernández, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Química.

“Id y Enseñad a Todos”



Ing. Williams G. Alvarez Mejia, M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

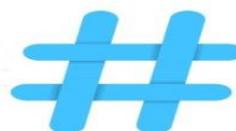
Cc. Archivo
WGAM/wgam



Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



Formando Ingenieros Químicos en Guatemala desde 1939



NO SALGAS
QUÉDATE EN
CASA



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101 - 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

DTG. 525-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ÓPTIMA ENTRE LA POLIACRILAMIDA Y EL POLICLORURO DE ALUMINIO QUE OBTENGA LA MAYOR EFICIENCIA FLOCULANTE DE ARCILLA EN AGUA A NIVEL DE LABORATORIO**, presentado por la estudiante universitaria: **Evelyn Sucely de León Hernández**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, octubre de 2021

AACE/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios y a la Virgen María	Por ser mi guía y acompañarme en cada paso durante toda mi vida. Nada de esto habría sido posible sin Su infinita bendición.
Mis padres	William de León y Carmen Hernández, por su amor y apoyo incondicional. Este logro es totalmente suyo, sin ustedes no sería la mujer que soy hoy.
Mis hermanas	Leslie y Sofía de León, por ser mis primeras amigas y compañeras de vida. Son las mejores hermanas del mundo.
Mis abuelitos	Carmen de Hernández, Víctor Hernández (q. e. p. d.), por cuidarme desde pequeña y ayudarme siempre, son mis segundos papás. Antonio de León (q. e. p. d.), por su amor y estar siempre pendiente.
Mis tíos	En especial a Guillermo Hernández, por estar siempre ayudando y aconsejando cuando ha sido necesario.
Mis amigas de toda la vida	Vanessa Velásquez y Gabriela Pérez, por tantos años de amistad sincera y estar

conmigo en las buenas y en las malas,
incondicionalmente.

Mis amigos de Universidad

Por haberme acompañado en cada paso para llegar a la meta que teníamos en común; en cada sonrisa, desilusión, noche de desvelo y éxito alcanzado.

Mis amigos de trabajo

Por ayudarme desde el inicio, hacer más amenas las jornadas y siempre alegrarse por los pasos que daba para llegar hasta acá.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios y la Virgen María	La gloria sea por siempre para Ustedes.
Mis padres	Por darme todo su apoyo incondicional.
Mis hermanas	Por no dejarme sola en ningún momento de la vida.
Mis abuelitos	Por consentirme y darme todo su amor.
Mis tíos	Por su apoyo incondicional.
Mis amigos	Por apoyarme, aconsejarme y hacer este camino más fácil.
Mi asesor	Ingeniero Jorge Mario Estrada, por el tiempo y paciencia que me brindó durante todo este proceso.
Escuela de Ingeniería Química	Por todas las enseñanzas brindadas.
Facultad de Ingeniería	Por formarme en mi carrera profesional.

**Universidad San Carlos
de Guatemala**

Por abirme las puertas para cumplir el sueño.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	XI
OBJETIVOS.....	XIII
HIPÓTESIS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Floculación	3
2.1. Teorías emitidas sobre la formación del flóculo.....	5
2.2. Caracterización del agua	6
2.3. Caracterización de la arcilla.....	8
2.3.1. Generalidades	8
2.3.2. Origen de las arcillas	9
2.3.3. Coloración	11
2.4. Agentes floculantes	12
2.4.1. Poliacrilamida	12
2.4.1.1. Aplicación	
2.4.2. Policloruro de aluminio	15
2.5. Precipitación	17
2.5.1. Definición	17
2.6. Prueba de jarras	18

2.6.1.	Generalidades	18
2.6.2.	Equipo necesario.....	19
3.	MARCO METODOLÓGICO	23
3.1.	Variables	23
3.1.1.	Variables físicas	23
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	25
3.3.	Recursos humanos disponibles	25
3.4.	Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos).....	25
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	26
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	26
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	29
3.8.	Análisis estadístico.....	32
4.	RESULTADOS.....	39
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	43
	CONCLUSIONES.....	47
	RECOMENDACIONES.....	49
	BIBLIOGRAFÍA.....	51
	APÉNDICES.....	53
	ANEXO	63

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Apariencia física arcilla ferruginosa.....	11
2.	Estructura química poliacrilamida	14
3.	Esquema de equipo de prueba de jarras	21
4.	Turbidez final de las muestras con diferentes concentraciones de poliacrilamida	39
5.	Turbidez final de las muestras con diferentes concentraciones de policloruro de aluminio	40

TABLAS

I.	Características físicas y organolépticas que debe tener el agua para consumo humano.....	7
II.	Clasificación del agua por dureza	8
III.	Propiedades físicas de la poliacrilamida	14
IV.	Propiedades físicas de la poliacrilamida	17
V.	Definición de variables para el primer procedimiento experimental	24
VI.	Definición de variables para el segundo procedimiento experimental..	24
VII.	Datos iniciales de la muestra a clarificar	29
VIII.	Datos para la determinación de la capacidad floculante de la poliacrilamida para concentración 0,002 mg/L	29
IX.	Datos para la determinación de la capacidad floculante de la poliacrilamida para concentración 0,003 mg/L	30

X.	Datos para la determinación de la capacidad floculante de la poliacrilamida para concentración 0,004 mg/L.....	30
XI.	Datos para la determinación de la capacidad floculante de la poliacrilamida para concentración 0,005 mg/L.....	30
XII.	Datos para la determinación de la capacidad floculante del policloruro de aluminio para concentración 0,002 mg/L.....	31
XIII.	Datos para la determinación de la capacidad floculante del policloruro de aluminio para concentración 0,003 mg/L.....	31
XIV.	Datos para la determinación de la capacidad floculante del policloruro de aluminio para concentración 0,004 mg/L.....	31
XV.	Datos para la determinación de la capacidad floculante del policloruro de aluminio para concentración 0,005 mg/L.....	32
XVI.	Análisis estadístico de la poliacrilamida.....	36
XVII.	Análisis estadístico del policloruro de aluminio.....	36
XVIII.	Datos para cálculo de valor F de tabla.....	36
XIX.	Datos para cálculo de valor F de prueba para poliacrilamida.....	37
XX.	Datos para cálculo de valor F de prueba para policloruro de aluminio.....	37
XXI.	Eficiencia como floculante de la poliacrilamida en diferentes concentraciones.....	40
XXII.	Eficiencia como floculante del policloruro de aluminio en diferentes concentraciones.....	41

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ASTM	<i>Association for Testing Materials</i>
<i>cv</i>	Coeficiente de variación
COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas
σ	Desviación estándar
η	Eficiencia como floculante
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
<i>g.l</i>	Grados de libertad
lb	Libra
L	Litro
\bar{x}	Media aritmética
mg	Miligramo
mL	Mililitro
min	Minuto
<i>N</i>	Número de datos.
pH	Potencial de hidrógeno
<i>n</i>	Repeticiones
rpm	Revoluciones por minuto
<i>k</i>	Tratamientos
UNT	Unidades nefelométricas de turbidez
x_i	Valores obtenidos

GLOSARIO

Álcali	Es cualquier sustancia que presente propiedades alcalinas y que en disolución acuosa aporta iones OH^- al medio.
Clarificación	Consiste en la remoción de turbiedad y color del agua. Implica la utilización de coagulantes o polielectrolitos, los cuales provocan que las finas partículas que determinan la turbiedad se agrupen formando flóculos, cuya precipitación y remoción son mucho más simples.
Coagulación	Es el proceso de desestabilización química de partículas coloidales realizadas por adicción de un coagulante al agua. Este neutraliza las cargas responsables de la estabilidad de las partículas cargadas que generan fuerzas de repulsión superficial, las cuales impiden la sedimentación por gravedad en tiempos cortos.
Coloides	Un sistema formado por dos o más fases, principalmente una continua, por lo general fluida, y otra dispersa en forma de partículas usualmente sólidas. Las partículas en los coloides no son visibles directamente sino a nivel microscópico (entre 1 nm y 1 μm).

Floculación

Es el proceso hidrodinámico en el que se efectúan las colisiones de partículas desestabilizadas que favorecen la agregación (cohesión) entre ellas. Logran formar aglomerados de partículas coloidales que, unidas entre sí, alcanzan un peso que las hace sedimentables por gravedad.

Ión

Es una partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutro. Los iones cargados negativamente, producidos por haber más electrones que protones, se conocen como aniones (que son atraídos por el ánodo). Los cargados positivamente, consecuencia de una pérdida de electrones, se conocen como cationes (los que son atraídos por el cátodo).

Poliacrilamida

De fórmula $(C_3H_5NO)_n$ es un homopolímero de acrilamida. Puede ser sintetizado en forma de cadena lineal o entrecruzado, e incluso se emplea junto con otros monómeros como el acrilato de sodio para formar distintos copolímeros. La poliacrilamida no es tóxica. Absorbe agua fácilmente, por lo que en la práctica es un hidrogel.

Polímero

Es un compuesto químico que posee una elevada masa molecular y es obtenido a través de un proceso de polimerización. La polimerización consiste en la unión de varias moléculas de un

compuesto a partir del calor, la luz o un catalizador, con la misión de conformar una cadena de múltiples eslabones de moléculas para obtener una macromolécula.

Precipitado

Sólido que se produce en una disolución por efecto de cristalización o de una reacción química. A este proceso se le llama precipitación. Dicha reacción puede ocurrir cuando una sustancia insoluble se forma en la disolución debido a una reacción química o a que la disolución ha sido sobresaturada por algún compuesto; esto es, que no acepta más soluto y que, al no poder ser disuelto, forma el precipitado.

Prueba de jarras

Es un proceso unitario y la principal prueba de laboratorio para determinar el dosaje de coagulantes en las plantas de tratamiento de agua potable. Son simulaciones en el laboratorio de las operaciones de coagulación-floculación-decantación que se realizan en las plantas de tratamiento y purificación de aguas. El método ha sido estandarizado para facilitar la comparación y convalidación de los resultados.

Sedimentación

Es un método industrial de separación de dos componentes de la suspensión o cualquier otra mezcla heterogénea, cuando la separación de los componentes con la gravedad es lo

suficientemente práctico. Todos estos métodos son comunes en el sentido de que todos utilizan la gravedad como la fuerza dominante. A menudo se aplican otros métodos para hacer la separación más rápida y eficiente, como la floculación, coagulación y la succión.

Turbidez

Falta de transparencia de un líquido debido a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el líquido (generalmente se hace referencia al agua), más sucia parecerá esta y más alta será la turbidez. La turbidez es considerada una buena medida de la calidad del agua cuanto más turbia, menor será su calidad. Según la OMS (Organización Mundial para la Salud), la turbidez del agua para consumo humano no debe superar en ningún caso las 5 NTU, y estará idealmente por debajo de 1 NTU.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se evaluó y comparó la capacidad floculante de una sal orgánica metálica (policloruro de aluminio) y una sal orgánica sintética (poliacrilamida) para tratamiento primario de agua. La experimentación se realizó a nivel de laboratorio.

Los ensayos que se realizaron fueron pruebas de jarras bajo norma ASTM D 2035-08 a velocidades de mezclado iniciales de 100 rpm, disminuidas al cabo de cierto tiempo; la cantidad de floculante que se utilizó va de 0,002 a 0,005 mg/L. Al cabo de la experimentación se midió la turbidez final de la solución UNT bajo norma ASTM WK4193; el pH según norma COGUANOR NGO 29001, con lo que fue posible la determinación de la eficiencia de cada floculante y una comparación entre ambos.

La investigación se realizó para satisfacer la necesidad de investigar las características floculantes del policloruro de aluminio $[(Al_2(OH)_3Cl_3)]$ y la poliacrilamida (C_3H_5NO), para determinar cuál presenta mejor eficiencia para clarificación de agua.

La poliacrilamida presentó menores valores promedio de turbidez. A una concentración de 0,005 mg/L se obtiene la menor con 8,5 UNT. En el caso del policloruro de aluminio, se obtuvo la menor turbidez a una concentración de 0,004 mg/L, con un valor promedio de 120,75 UNT. El efecto de ambos floculantes en el pH es el de disminuirlo hasta valores de 7,57 y 7,23, respectivamente. La temperatura no se ve afectada por los mismos.

Tras la evaluación y comparación de la eficiencia de ambos compuestos floculantes se obtuvo que la poliacrilamida es más eficiente, con un valor de 99,105 %, a una concentración de 0,005 mg/L.

Los resultados obtenidos de la experimentación fueron evaluados estadísticamente a través de un análisis de varianza y la prueba F de Fisher para asegurar la confiabilidad de los resultados. La hipótesis consistía en que el tiempo de sedimentación y la cantidad de floculante utilizado difiere significativamente respecto al otro; se rechazó para la poliacrilamida y se aceptó para el policloruro de aluminio.

OBJETIVOS

General

Evaluar la dosis óptima de floculante entre la poliacrilamida y el policloruro de aluminio que obtenga la mayor eficiencia de turbiedad, pH y temperatura, para cumplimiento de la Norma COGUANOR 29001.

Específicos

1. Determinar la concentración óptima de poliacrilamida a 0,002, 0,003, 0,004 y 0,005 mg/L en agua por medio de la prueba de jarras e identificar pH y temperatura.
2. Determinar la concentración óptima de policloruro de aluminio a 0,002, 0,003, 0,004 y 0,005 mg/L en agua por medio de la prueba de jarras e identificar pH y temperatura.
3. Comparar la eficiencia floculante entre la poliacrilamida y el policloruro de aluminio.
4. Evaluar el cumplimiento de los parámetros de turbiedad, pH y temperatura según la Norma COGUANOR 29001.

HIPÓTESIS

Hipótesis de trabajo

Es posible evaluar y comparar la capacidad floculante del policloruro de aluminio y poliacrilamida en el tratamiento de agua primario utilizando la prueba de jarras.

Hipótesis estadística

Hipótesis alternativa:

El tiempo de sedimentación y la cantidad de floculante utilizado difiere significativamente respecto al otro.

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Hipótesis nula:

El tiempo de sedimentación y la cantidad de floculante utilizado no difiere significativamente respecto al otro.

$$\mu_1 = \mu_2$$

INTRODUCCIÓN

La calidad del agua ha sido objeto de estudio desde que la industrialización empezó a nivel mundial. En Guatemala hay registros de la primera planta de tratamiento que data de 1927. Con el avance de la tecnología y las investigaciones se ha llegado a conocer diversos agentes químicos que pueden ser utilizados para aumentar dicha calidad, sin dañar a los consumidores o al medio ambiente.

Las poliacrilamidas y el policloruro de aluminio son agentes floculantes que han tomado importancia a nivel industrial para tratar aguas de residuo. La presente investigación busca evaluar la capacidad floculante de cada uno y compararlos, para establecer cuál presenta una mejor eficiencia al clarificar agua y que no afecte factores determinantes como el pH o la temperatura del agua.

La información obtenida a partir de esta investigación puede ser utilizada como guía al momento de escoger el floculante que mejor convenga para determinadas condiciones y su posterior evaluación a mayor escala.

1. ANTECEDENTES

Se sabe, por códices antiguos, que los egipcios utilizaron muchos procesos para clarificar la lodosa agua del río Nilo. Se emplearon varios tipos de coagulantes, como almendras, frijoles y alumbre. También se ha dado crédito a los chinos por el uso de alumbre para clarificar el agua. En la literatura antigua aparecen muchas citas a este respecto, todas las cuales confirman el hecho de que el uso de coagulantes químicos era bien conocido y ampliamente practicado antes de la Era Cristiana.

En 1806, en París empezó a funcionar la mayor planta de tratamiento de agua, la cual sedimentaba durante 12 horas. En 1827, el inglés James Simpton construye un filtro de arena para la purificación del agua. Hoy todavía se considera el primer sistema efectivo utilizado con fines de salud pública.

En 1884 se patenta el proceso de filtración por floculación química. Actualmente, dicho proceso ha sufrido modificaciones por el avance en la tecnología y es utilizado en toda planta que requiera de un proceso de tratamiento para el agua de consumo interno y para las que suministran agua para consumo público.

Fue hasta 1927 que en Guatemala se estableció una empresa privada de distribución de agua potable, la Compañía del Agua del Mariscal S. A. Esta planta explotaba, captaba, trataba y bombeaba su agua desde un nacimiento de agua en Mixco.

Con el avance en investigaciones y técnicas se ha creado distintos compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos, con propiedades floculantes y coagulantes para tratar las aguas de una manera más eficiente y que produzca la menor cantidad de residuos dañinos para las personas que la consumen pura o los productos fabricados con ella. De estos surgen la poliacrilamida y el policloruro de aluminio.

Existen estudios previos de capacidad floculante de policloruro de aluminio y de sustancias de origen natural en comparación con el sulfato de aluminio.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Floculación

Es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua. De esta manera, facilitan su decantación y posterior filtrado. Es un paso del proceso de potabilización de aguas de origen superficial y del tratamiento de aguas servidas domésticas, industriales y de la minería.

- Proceso

El proceso de floculación es precedido por la coagulación; por eso se suele hablar de los procesos de coagulación-floculación. Estos facilitan la retirada de las sustancias en suspensión y de las partículas coloidales:

- La coagulación es la desestabilización de las partículas coloidales causadas por la adición de un reactivo químico llamado coagulante, el cual neutraliza sus cargas electrostáticas y hace que las partículas tiendan a unirse entre sí.
- La floculación es la aglomeración de partículas desestabilizadas en microflóculos y después en los flóculos más grandes que tienden a depositarse en el fondo de los recipientes construidos para este fin, denominados sedimentadores.

Los factores que pueden promover la coagulación-floculación son el gradiente de la velocidad, el tiempo y el pH. El tiempo y el gradiente de velocidad son importantes al aumentar la probabilidad de que las partículas se unan y da más tiempo para que descendan, por efecto de la gravedad, y así se acumulen en el fondo. Por otra parte, el pH es un factor prominente en la acción desestabilizadora de las sustancias coagulantes y floculantes.

La solución floculante más adecuada a la naturaleza de los materiales en suspensión, con el fin de conseguir aguas decantadas limpias y la formación de lodos espesos se determina por pruebas, ya sea en laboratorio o en el campo.

En la minería, los floculantes utilizados son polímeros sintéticos de alto peso molecular, cuyas moléculas son de cadena larga y con gran afinidad por las superficies sólidas. Estas macromoléculas se fijan por adsorción a las partículas y provocan así la floculación por formación de puentes interpartículas.

- Floculación iónica

Mediante la floculación iónica se modifican las moléculas disueltas en un fluido a través de la acción de los llamados floculadores iónicos, que son los elementos materiales compuestos por tubos de acero inoxidable, plata o cobre que, conectados en su extremo a polos de corriente directa, positiva o negativa, generan la actividad iónica. Los floculadores iónicos sumergidos en el fluido producen un campo eléctrico de baja intensidad con actividad iónica constante, que incrementa la energía de los electrones de enlace; entonces, los átomos que componen las moléculas diluidas en el medio sufren un cambio en su estructura que las lleva a su forma más elemental, lo cual confirma la teoría electrolítica de la disociación.

2.1. Teorías emitidas sobre la formación del flóculo

Han existido muchos conceptos para explicar la formación o inhibición de la floculación química, tal como se practica en los procesos de acondicionamiento de agua. Hay los ha fraccionado en dos clasificaciones principales, que son: 1) los del protogel y 2) los conceptos mecanísticos.

En el concepto del protogel se ha sugerido que tanto el agua como las impurezas se encuentran, en un momento dado, dentro de una red de tipo fibrilar. Cuando esta se rompe se compacta por las diferencias de presión creadas en el acondicionamiento del flóculo. El agua debe pasar al exterior a través de los intersticios. Como la partícula de flóculo primeramente disminuye en tamaño y en densidad aparente, los poros se hacen cada vez menores hasta que alcanzan un tamaño tal que la viscosidad del agua suministra una resistencia al flujo que contrarresta la tendencia del flóculo al encogimiento. El crecimiento en este punto hacia flóculos mayores proporcionará mayor rigidez y mejores características de sedimentación, las cuales pueden alcanzarse bajo estas condiciones de formación. A bajas temperaturas y con alta viscosidad de agua, se alcanzará equilibrio con menos deshidratación del flóculo y habrá, entonces, menor rigidez y una sedimentación más pobre.

En relación con las teorías mecanísticas de la formación del flóculo, un balance químico coloidal tiene significado máximo. Es un tratamiento matemático. Camp y Stein han supuesto que dos partículas en una corriente de fluido chocarán necesariamente si los cálculos indican que ellas pueden colocarse dentro de una distancia igual a la mitad de la suma de sus dos diámetros. Tales cálculos pueden verificarse para materiales inertes, pero no para partículas coloidales cargadas eléctricamente, las cuales, con frecuencia, constituyen flóculos. Aún con cargas grandemente reducidas en las partículas,

se puede esperar la existencia de alguna orientación, más que una disposición errática. La explicación que de la química coloidal sobre la formación de flóculos es demasiado complicada para dar una discusión detallada en la comprensión del mecanismo de formación de flóculos, así como también de importancia práctica al encontrar problemas de coagulación difícil. Los beneficios de un balance coloidal para contrarrestar el problema de baja temperatura son un caso digno de mencionarse.

Independientemente del concepto que se acepte, la experiencia ha demostrado que se obtiene una coagulación satisfactoria con eficiencia máxima de sedimentación solamente cuando todas las partículas contenidas en el agua independientemente de su condición física o química están aglomeradas formando masas relativamente grandes con gravedad específica suficientemente alta para causar su deposición en un periodo corto. Para alcanzar esta condición favorable, la selección y dosis de coagulante químico y la estructura del flóculo deberán ser tales que se realice una clarificación satisfactoria.

2.2. Caracterización del agua

Agua potable es aquella que, por sus características organolépticas, físicas, químicas y bacteriológicas, no representa un riesgo para la salud del consumidor.

Tabla I. **Características físicas y organolépticas que debe tener el agua para consumo humano**

Características	Límite máximo aceptable	Límite máximo permitido
Color	5,0 u	35,0 u ^(a)
Olor	No rechazable	No rechazable
Turbiedad	5,0 UNT	15,0 UNT ^(b)
Conductividad eléctrica	750 uS/cm	1 500 uS/cm ^(d)
Potencial de hidrógeno	7,0 – 7,5	6,5 – 8,5 ^{(c)(d)}
Sólidos totales disueltos	500,0 mg/L	1 000,0 mg/L
(a) Unidades de color en la escala de platino-cobalto (b) Unidades nefelométricas de turbiedad (UNT) (c) En unidades de pH (d) Límites establecidos a una temperatura de 25 °C		

Fuente: Norma COGUANOR NTG 29001. *Especificaciones de agua para consumo humano*.
p. 3.

El agua desmineralizada es aquella que tiene una cantidad muy baja o prácticamente 0 de minerales, por lo que podría considerarse como "extremadamente blanda o extremadamente suave".

Algunos usos:

- Laboratorios: soluciones, lavado de material, esterilización de material.
- Industrias: refrigerante de bajo costo, limpieza de cristales, industria farmacéutica, perfumes, elaboración de detergentes, máquinas de corte por hilo, centros mecanizados, entre otros.

- Otros: humificadores, planchas, máquinas de oxígeno.

Tabla II. **Clasificación del agua por dureza**

Tipos de agua	ppm de CaCO ₃
Agua blanda	≤17
Agua levemente dura	≤60
Agua moderadamente dura	≤120
Agua dura	≤180
Agua muy dura	>180

Fuente: elaboración propia.

2.3. Caracterización de la arcilla

Se da el nombre de arcilla a las partículas sólidas con diámetro menor de 0,005mm que, al ser mezcladas con agua, tienen la propiedad de volverse plásticas, dúctiles y maleables. Químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque en algunas ocasiones contiene silicatos de hierro o magnesio hidratados. El tamaño de partícula de las arcillas es inferior a los 2 μ m.

2.3.1. Generalidades

La arcilla se compone de un grupo de minerales alúmino-silicatos formados por la meteorización de rocas feldespáticas, como el granito. El grano es de tamaño microscópico y con forma de escamas. Esto hace que la superficie de agregación sea mucho mayor que su espesor, lo que permite un gran almacenamiento de agua por adherencia que da plasticidad a la arcilla y provoca hinchazón de algunas variedades.

2.3.2. Origen de las arcillas

La arcilla es un silicoaluminato hidratado. Los silicatos forman el árbol genealógico de las arcillas y comprenden la mayoría de los minerales de la corteza terrestre. Su composición y estructura están relacionados directamente con la historia geológica de la Tierra; es decir, dependen de la naturaleza de la roca madre que les dio origen, así como del ambiente a que fueron sometidos durante la etapa de arrastre o deposición. Las arcillas son una rama de los silicatos y su formación obedeció a tres mecanismos principales: 1. Por herencia, 2. Por neoformación y 3. Por transformación.

A continuación, se presenta un glosario de los tipos más comunes de arcilla:

- Arcilla figulina: es la que contiene impurezas como arena, la caliza y óxidos de hierro.
- Arcilla refractaria: es rica en óxidos metálicos y tiene la propiedad de ser muy resistente al calor.
- Arcilla roja: esta clase la integra generalmente un depósito de tipo marino formado por los restos de materiales calcáreos y ferrógenos, polvo volcánico, restos de esponjas silíceas, dientes de tiburón, entre otros. El color rojizo proviene por lo común de sus componentes férricos. Se ha encontrado que estos depósitos son muy extensos y cubren hasta el 60 % de la superficie marina.
- Arcilla ferruginosa: contiene en su composición diferentes cantidades y tipos de óxido de hierro. Puede ser de color amarillo o negra debido al

óxido de hierro hidratado. Esta particularidad de las arcillas explica por qué en algunas regiones el barro es negro o rojizo.

- Arcilla magra y arcilla grasa: estos materiales contienen cierto grado de impurezas, lo que afecta sus propiedades plásticas; es decir, a mayor contenido de impurezas se obtiene una pasta menos plástica (arcilla magra) al amasarla con agua.
- Arcilla de batán: llamadas también tierra de batán, debido al uso que se les dio con telas y fibras vegetales como el algodón. Este proceso consistía en limpiar las fibras formadas en la máquina (batán) y eliminar la materia grasa mediante adición de arcilla, por lo general del tipo esmectita.
- Arcilla magra: es un material impermeable y frágil, con un contenido de caliza entre 20 y 60 %, aproximadamente.
- Arcillas de esquisto o pizarra: las constituyen formaciones antiguas que se presentan en forma de estratos o de plaquetas paralelas que se han dividido por la presión del suelo.
- Arcilla atapulgita: también conocida como tierra de Florida o tierra de Fuller. El último apelativo se empleó también para denominar las sapiolitas. Actualmente la atapulgita es llamada paligorskita.
- Arcilla bentonita: nombre comercial de las arcillas tipo montmorillonita, que cuando son tratadas con compuestos químicos se vuelven repelentes al agua.

2.3.3. Coloración

Esta se debe a la presencia de óxidos metálicos, principalmente el de hierro (por su actividad y abundancia). El hierro es el agente colorante más común en las arcillas en bruto y rocas relacionadas. La diferencia de color refleja solamente el estado de oxidación del hierro. En medios reductores se presentan colores oscuros, verdosos, grises o negros; en medios oxidantes, colores rojizos, amarillos o pardos. La presencia de material orgánico transmite colores grises o negros. Las arcillas blancas están exentas de impurezas colorantes.

Figura 1. **Apariencia física arcilla ferruginosa**



Fuente: CliccaScienze. *Arcilla ferruginosa*. <https://www.cliccascienze.it/diccionario-de-geologia/arcilla-ferruginosa/>. Consulta: 23 de octubre de 2017.

2.4. Agentes floculantes

Existe en la actualidad una variedad de agentes floculantes utilizados a nivel industrial, para efectos de esta investigación se tomaron en cuenta la poliacrilamida y el policloruro de aluminio, como se presenta a continuación.

2.4.1. Poliacrilamida

La poliacrilamida es un homopolímero de acrilamida. Puede ser sintetizado en forma de cadena lineal o entrecruzado, e incluso se emplea junto con otros monómeros como el acrilato de sodio para formar distintos copolímeros. La poliacrilamida no es tóxica. Sin embargo, la acrilamida que no ha polimerizado es una neurotoxina que puede estar presente en muy pequeñas cantidades en la acrilamida polimerizada, de ahí que sea recomendable su manipulación con precaución. En la forma entrecruzada, la probabilidad de que haya monómero libre es incluso mayor. Absorbe agua fácilmente, por lo que en la práctica es un hidrogel, y uno de los geles más utilizados para realizar electroforesis. Su objetivo es realizar un análisis o separación por carga y tamaño molecular de los fragmentos de aminoácidos o nucleótidos que componen muestras biológicas como las proteínas o ácidos nucleicos como el ADN o el ARN, respectivamente.

Uno de los usos industriales más importantes para la poliacrilamida es la de flocular sólidos en un líquido. Este proceso se aplica para el tratamiento del agua y en procesos tales como la fabricación de papel. La poliacrilamida se puede suministrar en polvo o en forma líquida; como forma líquida se subdivide en disolución y polímero de emulsión. A pesar de que estos productos son a menudo llamados "poliacrilamida", muchos son en realidad copolímeros de acrilamida y una o más de otras especies químicas, tales como un ácido acrílico

o una sal del mismo. La principal consecuencia de esto es dar al polímero "modificado" un carácter iónico particular.

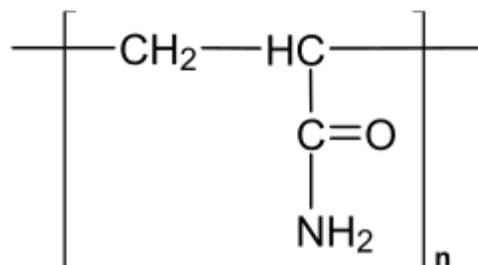
2.4.1.1. Aplicación

Se usan ampliamente como agente espesante, aglutinante, super absorbente, acondicionador del suelo, coadyuvante de filtración, agente de floculación, reticulante, agente de suspensión, lubricante y agente de recuperación de petróleo. Uno de sus usos más importantes es el tratamiento de aguas residuales. Cuando se agrega al agua residual, hace que las partículas en suspensión se agreguen y se precipiten. En el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales puede usarse en todos los procesos de separación líquido-sólido, incluido el tratamiento primario de aguas residuales. Los PAM también se usan para tratar el agua de las operaciones mineras. Otro uso común es la extracción y recuperación de petróleo.

Las poliacrilamidas catiónicas (CPAM) se utilizan para la ruptura de emulsiones y para promover la filtración y la deshidratación de lodos. El uso principal es el tratamiento de aguas residuales. Como coagulante orgánico primario, neutraliza las partículas coloidales cargadas negativamente y así induce floculación y sedimentación, lo que reduce el volumen de lodo. En las fábricas de papel, se usa principalmente para mejorar la retención y la eliminación de agua.

Otro uso de volumen bajo pero importante de poliacrilamidas aniónicas y catiónicas es la electroforesis en gel para la separación de macromoléculas.

Figura 2. **Estructura química poliacrilamida**



Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Propiedades físicas de la poliacrilamida**

Punto de fusión	>300 °C
Densidad	1,189 g/mL a 25 °C
Estado	Sólido granular
Color	Blanco a amarillo claro
Solubilidad	Soluble en agua (215 g/100mL a 30 °C). Insoluble en benceno, tolueno, xileno, gasolina, keroseno, combustible diésel.
Estabilidad	Estable, incompatible con agentes fuertemente oxidantes, aluminio, cobre, hierro y sales de hierro.

Fuente: elaboración propia.

Descripción de la acrilamida por la Organización Mundial de la Salud (OMS):

Los coagulantes de poliacrilamida usados en el tratamiento del agua de consumo contienen concentraciones residuales de monómero de acrilamida. En

general, la dosis máxima autorizada de polímero es de 1 mg/L. Para un contenido de monómero de la poliacrilamida del 0,05 %, esta dosis daría una concentración teórica máxima de monómero en agua de 0,5 ug/L, si bien, en la práctica, las concentraciones podrían ser de 2 a 3 veces menores. Estos valores corresponden a las poliacrilamidas aniónicas y no iónicas, pero las concentraciones residuales derivadas de las poliacrilamidas catiónicas pueden ser mayores.

Las poliacrilamidas se utilizan también como agentes cementantes en la construcción de pozos y embalses de agua de consumo. Las personas pueden estar expuestas a concentraciones adicionales de origen alimentario por el uso de poliacrilamida en el procesado de alimentos y la posible formación de acrilamida en alimentos cocinados a temperaturas altas.

2.4.2. Policloruro de aluminio

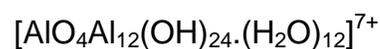
Es el resultado de un proceso de fabricación complejo bajo condiciones de trabajo controladas. Su abreviación es PACI según la norma ANSI/AWWA B408-10.

Acerca de la composición, el PACI es una sal básica del cloruro de aluminio, un polímero de hidroxicloruro de aluminio con fórmula:



Donde $0 < m < 3n$.

Es esencialmente un polímero inorgánico catiónico.



En solución, y dependiendo del proceso empleado, tiene un contenido en Al_2O_3 de 10 a 23 g/100 g. Sólido, puede alcanzar un contenido de 44 g/100 g de Al_2O_3 . El contenido de basicidad puede ir desde el 10 al 83 %.

Es usado como coagulante en el proceso de potabilización de las aguas para consumo humano, en el tratamiento de aguas residuales, en la industria del papel y del cuero, entre otros.

Es un producto corrosivo, por eso se almacena en tanques de PRFV.

Está alistado como coagulantes provenientes de sales de aluminio junto con el tradicional sulfato de aluminio. Sin embargo, tiene algunas ventajas frente a este:

- Bajo ciertas condiciones puede presentar menor gasto de coagulante (especialmente a altas turbiedades).
- Disminuye el carbono orgánico total (TOC).
- Menor consumo de álcalis.
- Efectividad en un amplio rango de pH.
- Igual rendimiento con distintas temperaturas.
- Remoción de color (al igual como ocurre con el sulfato de aluminio depende del tipo de color presente en el agua).

Debe considerarse que estas ventajas dependen del tipo de agua a tratar y condiciones de turbiedad presentes. La elección de cualquier coagulante dependerá principalmente de los resultados del ensayo de jarras y una evaluación económica de las opciones de productos coagulantes disponibles.

Tabla IV. **Propiedades físicas del policloruro de aluminio**

pH	2 – 4 solución acuosa al 4 %
Densidad	0,85 g/cm ³
Estado	Sólido granular
Color	Ámbar
Solubilidad	Soluble en agua (>300 g/L)
Estabilidad	Estable, reacciona con hipoclorito de calcio, ácidos y álcalis.

Fuente: elaboración propia.

2.5. Precipitación

A continuación, se presenta una definición del proceso de precipitación y sus principales aplicaciones.

2.5.1. Definición

Un precipitado es el sólido que se produce en una disolución por efecto de cristalización o de una reacción química. A este proceso se le llama precipitación. Dicha reacción puede ocurrir cuando una sustancia insoluble se forma en la disolución debido a una reacción química o a que la

disolución ha sido sobresaturada por algún compuesto; esto es, que no acepta más soluto y que al no poder ser disuelto, forma el precipitado.

En la mayoría de los casos, el precipitado (el sólido formado) baja al fondo de la disolución, aunque esto depende de la densidad del mismo: si es más denso que el resto de la disolución cae. Si es menos denso, flota, y si tiene una densidad similar, se queda en suspensión.

El efecto de la precipitación es muy útil en muchas aplicaciones, tanto industriales como científicas, en las que una reacción química produce sólidos que después puedan ser recogidos por diversos métodos, como la filtración, la decantación o por un proceso de centrifugado.

En síntesis, la precipitación es la sustancia sólida visible que se forma al combinar varias sustancias.

2.6. Prueba de jarras

Es una técnica de laboratorio que pretende realizar una simulación del proceso de clarificación del agua que se lleva a cabo en planta. Permite evaluar a escala y de una manera rápida la acción que ejerce sobre el proceso de clarificación la variación de los diferentes parámetros como velocidad o tiempo de agitación, gradientes de velocidad producidos, dosificación de diversos compuestos químicos solos o en combinaciones, entre otros.

2.6.1. Generalidades

Se usa para evaluar, determinar y optimizar variables químicas del proceso de coagulación o floculación; esto es, medir el desempeño de uno o

varios productos químicos dados y encontrar la dosificación adecuada tanto en términos de calidad final del agua obtenida, como en términos económicos.

También es usada para determinar la concentración de la solución de coagulante más apropiada para utilizar en la planta. Encontrar el punto o etapa de dosificación adecuado para el producto que se ensaya. Evaluar y comparar el desempeño de una combinación de productos y para la determinación del pH óptimo de coagulación.

En operación permite tomar decisiones rápidas sobre la dosificación de químicos a utilizar de acuerdo con las variaciones de la calidad del agua cruda. Además, evaluar los efectos de modificaciones en las condiciones de operación de la planta sobre el proceso de clarificación.

2.6.2. Equipo necesario

Usualmente se utiliza un dispositivo que permite trabajar simultáneamente 6 jarras. Consiste en 6 paletas interconectadas a un regulador de velocidad, con el cual se puede dar la misma velocidad de agitación, y durante el mismo tiempo, a las 6 jarras. Comercialmente se encuentran equipos capaces de operar entre 0 y 400 rpm. El agitador mecánico se encuentra instalado sobre un iluminador de flóculos preferentemente con una base blanca, que le sirve como soporte.

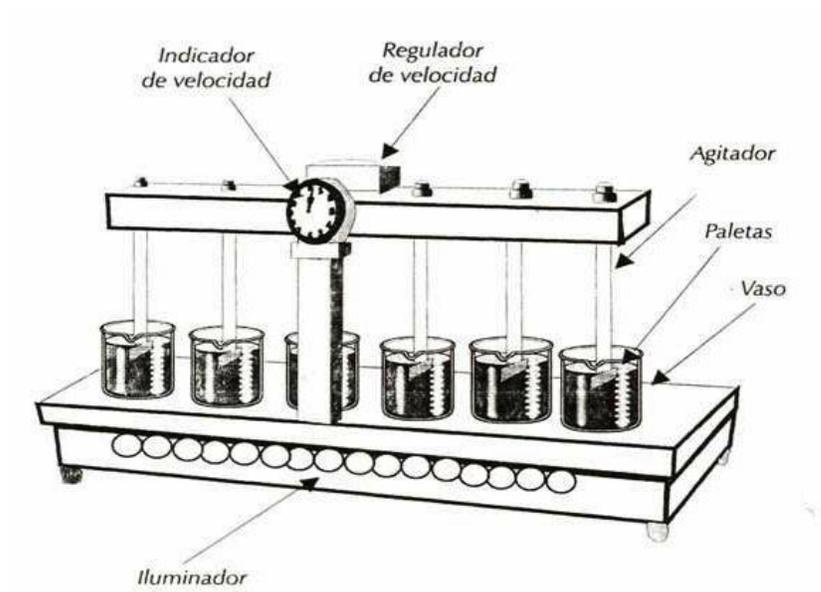
Lo ideal es que la iluminación esté en ángulo recto a la dirección del observador, o sea, arriba o debajo de los vasos. Debe evitarse fuentes de luz que generen mucho calor, que produzcan diferencias de temperatura entre el agua de las jarras y el agua cruda de la planta. Esto se traduce en diferencias de viscosidad, choque de partículas, y en general, en una serie de parámetros

que finalmente producen un efecto significativo en la coagulación y sedimentación. Las jarras o vaso a usar deben ser de 2 L preferentemente o de 1 L, alternativamente. Se debe evitar usar vasos de menor tamaño, debido a la dificultad de obtener precisión en la dosificación de reducidos volúmenes de coagulantes ayudantes de coagulación o de floculación en jarras con volúmenes más pequeños.

Cuando se utilicen jarras de vidrio, se debe evitar en lo posible lavarlas con detergentes, porque muchos de estos tienen compuestos aniónicos que son fuertemente absorbidos por las paredes de los recipientes de vidrio; de no ser completamente removidos, pueden afectar la prueba en forma significativa. En cada una de las 6 jarras se coloca igual cantidad de agua por tratar, a la cual se le han medido los parámetros iniciales: temperatura, pH, turbiedad, color y alcalinidad como mínimo. En cada jarra se coloca una dosificación del químico, que aumenta gradualmente y en la misma proporción, respecto a la jarra anterior. La dosificación de químicos debe ser rápida y simultánea en cada jarra; de lo contrario se causan errores en los resultados.

Como alternativa se puede utilizar jeringas dosificadoras, previamente llenadas con la cantidad de cada coagulante o floculante, ya que toman menos tiempo al dosificar. El contenido de las jeringas se debe vaciar profundamente en la correspondiente jarra para que la dispersión sea lo más rápida posible. En términos generales, se recomienda aplicar las dosis en un punto fijo localizado en o cerca del eje impulsor de la paleta durante una mezcla rápida a alta velocidad.

Figura 3. Esquema de equipo de prueba de jarras



Fuente: Repositorio. *Operación y mantenimiento de plantas de potabilización de agua.*
https://repositorio.sena.edu.co/sitios/calidad_del_agua/operacion_potabilizacion/index.html.

Consulta: 16 de abril de 2016.

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Variables

En la determinación de la capacidad floculante de policloruro de aluminio y acrilamida se utilizarán variables físicas.

3.1.1. Variables físicas

Se describe como variables físicas a todas las magnitudes que pueden influir en el estado físico de un sistema, para esta experimentación se tendrán las siguientes:

- Tiempo de sedimentación
- Volumen de agua a clarificar
- Masa de cada floculante
- Velocidad de agitación
- Tiempo de agitación
- Masa sedimentada
- Definición de las variables para el primer procedimiento experimental.

Dentro de la experimentación se utilizarán diferentes cantidades de floculante y velocidades de agitación para encontrar el óptimo. En el primer procedimiento experimental se variará la cantidad de poliacrilamida con velocidad de agitación constante.

Tabla V. Definición de variables para el primer procedimiento experimental

No.	Variable	Unidad	Factor de diseño		Tipo de variable	
			Constante	Variable	Independiente	Dependiente
1	Tiempo de sedimentación	min	X			X
2	Volumen de agua	L	X		X	
3	Masa de poliacrilamida	mg		X	X	
4	Velocidad de agitación	rpm	X		X	
5	Tiempo de agitación	min	X		X	
6	Masa sedimentada	mg		X		X

Fuente: elaboración propia.

- Definición de las variables para el segundo procedimiento experimental

Dentro de la experimentación se utilizarán diferentes cantidades de floculante y velocidades de agitación para encontrar el óptimo. En el segundo procedimiento experimental se mantendrá constante la velocidad de agitación y variará la cantidad de policloruro de aluminio.

Tabla VI. Definición de variables para el segundo procedimiento experimental

No.	Variable	Unidad	Factor de diseño		Tipo de variable	
			Constante	Variable	Independiente	Dependiente
1	Tiempo de sedimentación	min	X			X
2	Volumen de agua	L	X		X	
3	Masa de policloruro de aluminio	mg		X	X	
4	Velocidad de agitación	rpm	X		X	
5	Tiempo de agitación	min	X		X	
6	Masa sedimentada	mg		X		X

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

Se realizó a escala de laboratorio una prueba de jarras para la evaluación y comparación de la actividad floculante de poliacrilamida y policloruro de aluminio. Se aplicaron conceptos de agitación, mezclado, floculación y técnicas analíticas para determinar la cantidad de floculante óptima.

3.3. Recursos humanos disponibles

La prueba de jarras para la evaluación y comparación de la actividad floculante de poliacrilamida y policloruro de aluminio y posterior manejo de datos e interpretación obtenidos de la experimentación estuvo a cargo de la investigadora Evelyn Sucely de León Hernández, bajo la asesoría del Ing. Qco. Jorge Mario Estrada Asturias.

3.4. Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería, reactivos)

Tomando en cuenta la metodología experimental propuesta, se requirió del siguiente equipo, cristalería y reactivos:

- Equipo
 - Agitador múltiple para prueba de jarras
 - Potenciómetro

- Instrumentos de medición
 - Balanza analítica
 - Equipo de medición de UTN
 - Termómetro de mercurio
 - Cronómetro

- Cristalería
 - Beacker
 - Probeta
 - Varilla de agitación
 - Vidrio de reloj

- Reactivos
 - Poliacrilamida (C_3H_5NO),
 - Agua tipo IV según norma ASTM 1193: 2001
 - Policloruro de aluminio [$(Al_2(OH)_3Cl_3)$]

- Materiales
 - Papel filtro

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Se utilizó una técnica cuantitativa para la determinación de la cantidad óptima de floculante para clarificar agua, su pH y turbidez (NTU), además de técnicas cualitativas para la evaluación del color final del agua.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

- Metodología de elaboración de las muestras de agua con arcilla

Se utilizó arcilla ferruginosa comercial para agregar al agua desmineralizada. Se empleó la misma, ya que carece de dureza.

Se colocó 2 libras de arcilla por cada 5 galones de agua, cantidad con la cual se observó una turbidez de 950 UNT y pH de 9,23.

- Dosificación y forma de aplicación de los floculantes

Según la Organización Mundial de la Salud, la poliacrilamida tiene como máxima dosis a utilizar para tratamiento de agua, 1mg/L. Es la misma dosis que deberá ser utilizada de policloruro de aluminio para comparar. De dichas diluciones se tomaron muestras de 2, 3, 4 y 5 mL, las cuales se agregarán al agua a tratar. Se obtuvo concentraciones de cada uno de los floculantes puros de 0,002, 0,003, 0,004 y 0,005 mg/L, respectivamente.

- Metodología experimental para la determinación de la capacidad floculante de poliacrilamida y de policloruro de aluminio variando su concentración según norma Norma ASTM D 2035-08
 - Tomar muestra de agua a ser tratada y medir UNT.
 - Distribuir homogéneamente el agua en los beakers del equipo de agitación.
 - Colocar dentro de cada beaker su deflector.
 - Colocar en beakers menores la dosificación de floculante a utilizar: 0,002, 0,003, 0,004 y 0,005 mg/L; se coloca en el primer beaker la dosificación más baja y en las siguientes se agrega una cantidad mayor que la anterior.
 - Colocar el indicador de velocidad del equipo a 100 rpm, en un tiempo de 1 minuto. Durante ese tiempo, vaciar cada uno de los beaker de 100mL en el beaker de 2 000 mL
 - Disminuir la velocidad de agitación a 65 rpm durante 6 minutos.
 - Disminuir la velocidad de agitación a 30 rpm durante 9 minutos.
 - Dar el tiempo de sedimentación (15 minutos).
 - Transcurrido el tiempo de sedimentación se recolecta la muestra de cada uno de los beakers.

- Toma de características como turbidez UNT, pH, cantidad de masa sedimentada.
- Metodología experimental para evaluación de efectos de parámetros de pH y temperatura
 - Para la medición de pH se hará uso de un potenciómetro que será sumergido en la solución por evaluar. Se dejará durante unos segundos hasta que la medición no varíe. Cada vez que se evalúe una muestra diferente hay que lavar el diodo del potenciómetro con agua destilada para evitar que trazas de la muestra anterior modifiquen la nueva medición. La medición de pH debe realizarse antes de iniciar la floculación y al finalizarla.
 - Para medir la temperatura se hará uso de un termómetro de mercurio. Debe tomarse al iniciar la floculación y al finalizarla.
- Metodología experimental para determinación de la eficiencia como floculante de la poliacrilamida y el policloruro de aluminio.

$$\eta = \frac{UNT_0 - UNT_f}{UNT_0}$$

(Ecuación 1)

Donde:

η : es la eficiencia como floculante

UNT_0 : Turbidez inicial del agua

UNT_f : Turbidez final de la solución

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Se presentan a continuación los datos correspondientes a pH, turbidez y temperatura de la muestra inicial y las variaciones de concentración de las muestras a evaluar:

Tabla VII. **Datos iniciales de la muestra a clarificar**

Muestra inicio	
pH	9,340
UNT	950
Temperatura (°C)	23

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Datos para la determinación de la capacidad floculante de la poliacrilamida para concentración 0,002 mg/L**

0,002 mg/L			
	Turbidez (UNT)	pH	Temperatura (°C)
1	9	7,620	24
2	13	8,640	24
3	18	8,510	24
4	17	8,640	24

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Datos para la determinación de la capacidad floculante de la poliacrilamida para concentración 0,003 mg/L**

0,003 mg/L			
	Turbidez (UNT)	pH	Temperatura (°C)
1	10	8,470	24
2	8	8,610	24
3	11	8,370	24
4	13	8,040	24

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Datos para la determinación de la capacidad floculante de la poliacrilamida para concentración 0,004 mg/L**

0,004 mg/L			
	Turbidez (UNT)	pH	Temperatura (°C)
1	11	8,570	24
2	9	8,630	24
3	12	8,540	24
4	11	8,540	24

Fuente: elaboración propia

Tabla XI. **Datos para la determinación de la capacidad floculante de la poliacrilamida para concentración 0,005 mg/L**

0,005 mg/L			
	Turbidez (UNT)	pH	Temperatura (°C)
1	9	8,480	24
2	6	8,590	24
3	7	8,640	24
4	12	7,570	24

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Datos para la determinación de la capacidad floculante del policloruro de aluminio para concentración 0,002 mg/L.**

0,002 mg/L			
	Turbidez (UNT)	pH	Temperatura (°C)
1	170	7,480	24
2	72	7,380	24
3	220	7,620	24
4	140	8,400	24

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Datos para la determinación de la capacidad floculante del policloruro de aluminio para concentración 0,003 mg/L**

0,003 mg/L			
	Turbidez (UNT)	pH	Temperatura (°C)
1	76	7,330	24
2	19	7,230	24
3	250	7,630	24
4	70	7,640	24

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Datos para la determinación de la capacidad floculante del policloruro de aluminio para concentración 0,004 mg/L**

0,004 mg/L			
	Turbidez (UNT)	pH	Temperatura (°C)
1	66	8,360	24
2	85	8,350	24
3	64	7,580	24
4	48	7,730	24

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Datos para la determinación de la capacidad floculante del policloruro de aluminio para concentración 0,005 mg/L**

0,005 mg/L			
	Turbidez (UNT)	pH	Temperatura (°C)
1	60	7,930	24
2	48	8,090	24
3	290	7,800	24
4	85	8,160	24

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Se obtendrá los valores de masa que sedimenta al utilizar el floculante indicado, así como las unidades nefelométricas de turbidez, para posteriormente analizar la variabilidad de los resultados obtenidos con el coeficiente de variación, con el fin de aprobar su validez.

- Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N}$$

(Ecuación 2)

Donde:

\bar{x} : media aritmética

x_i : valores obtenidos

N : número de datos

- Desviación estándar

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}$$

(Ecuación 3)

Donde:

σ : desviación estándar

\bar{x} : media aritmética

x : valores obtenidos

N : número de datos

- Coeficiente de variación

$$C_v = \frac{\sigma}{|\bar{x}|}$$

(Ecuación 4)

Donde:

C_v : coeficiente de variación

σ : desviación estándar

\bar{x} : media aritmética

- Análisis estadístico Fischer

Para los resultados de la experimentación se utilizará un análisis estadístico de Fischer. El valor estadístico de prueba se debe comparar con un valor tabular de F, que indicará el valor máximo del valor estadístico de prueba que ocurriría si la H_0 fuera verdadera, a un nivel de significación seleccionado.

Para realizar el análisis estadístico se necesita tener un conjunto de datos tabulados según sus tratamientos y repeticiones para comparar los valores F de tabla y F de prueba.

- F de tabla

Se calcula los grados de libertad del numerador a partir de:

$$g.l. = k - 1$$

Donde

g.l.: grados de libertad

k: número de tratamientos

Se calculan los grados de libertad del denominador:

$$k(n - 1)$$

Donde:

k: número de tratamientos

n: número de repeticiones

Tomando en cuenta un nivel de confianza o significancia de $\alpha = 0,05$ se obtiene con lectura de tabla el valor F_{tabla} .

- F de prueba

Para el denominador:

Se calcula la desviación estándar para cada tratamiento.

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}$$

Se calcula la estimación interna de desviación estándar a partir de

$$\sigma_w = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_k}{k}$$

Para el numerador:

Se calcula la desviación estándar de las medias muestrales

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{k - 1}$$

Multiplicar la desviación de las medias muestrales por n

$$\sigma_x = n\sigma_{\bar{x}}$$

Calcular la Razón F

$$F_{prueba} = \frac{\sigma_x}{\sigma_w}$$

Si F_{prueba} es menor que F_{tabla} , H_0 se aprueba.

Tabla XVI. Análisis estadístico de la poliacrilamida

Concentración	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación
2 mg/L	14,250	4,113	0,289
3 mg/L	10,500	2,082	0,198
4 mg/L	10,750	1,258	0,117
5 mg/L	8,500	2,646	0,311

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. Análisis estadístico del policloruro de aluminio

Concentración	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación
2 mg/L	150,500	61,868	0,411
3 mg/L	103,750	100,798	0,972
4 mg/L	65,750	15,152	0,230
5 mg/L	120,750	113,881	0,943

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. Datos para cálculo de valor F de tabla

Repeticiones	4
Tratamientos	4
Grados de libertad nominador	3
Grados de libertad denominador	12
Valor F de la tabla	3,49

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Datos para cálculo de valor F de prueba para poliacrilamida**

Estimación interna de la desviación	2,525
Estimación desviación de las medias	2,389
Desviación de las medias por n	9,557
Valor F de prueba	3,785

Fuente: elaboración propia.

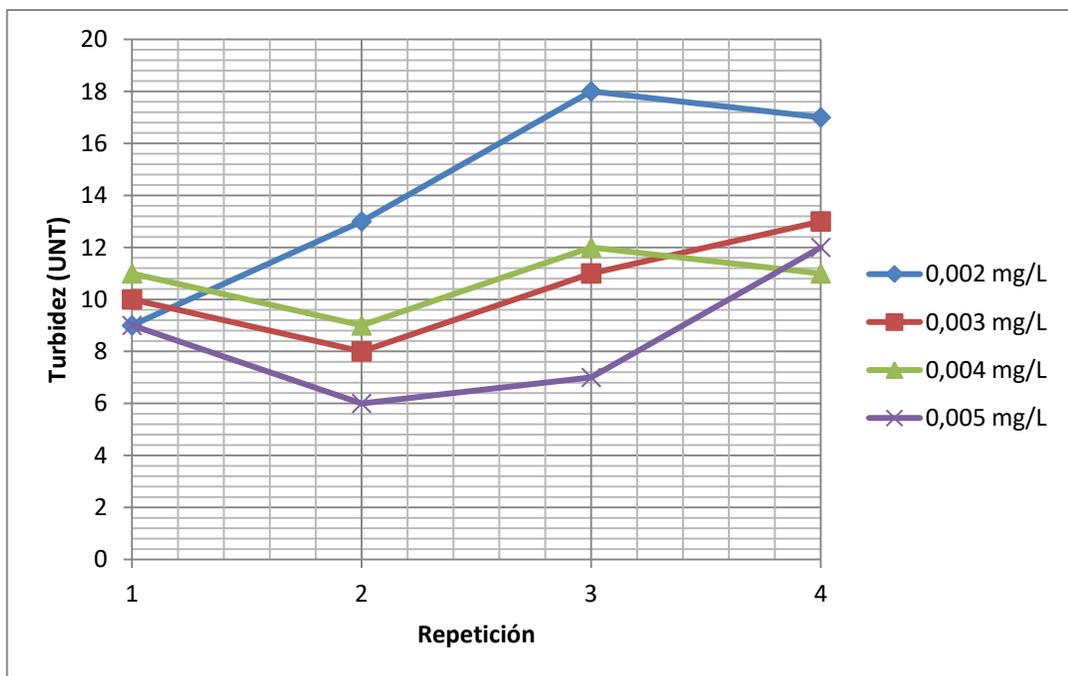
Tabla XX. **Datos para cálculo de valor F de prueba para policloruro de aluminio**

Estimación interna de la desviación	72,924
Estimación desviación de las medias	35,368
Desviación de las medias por n	141,474
Valor F de prueba	1,939

Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

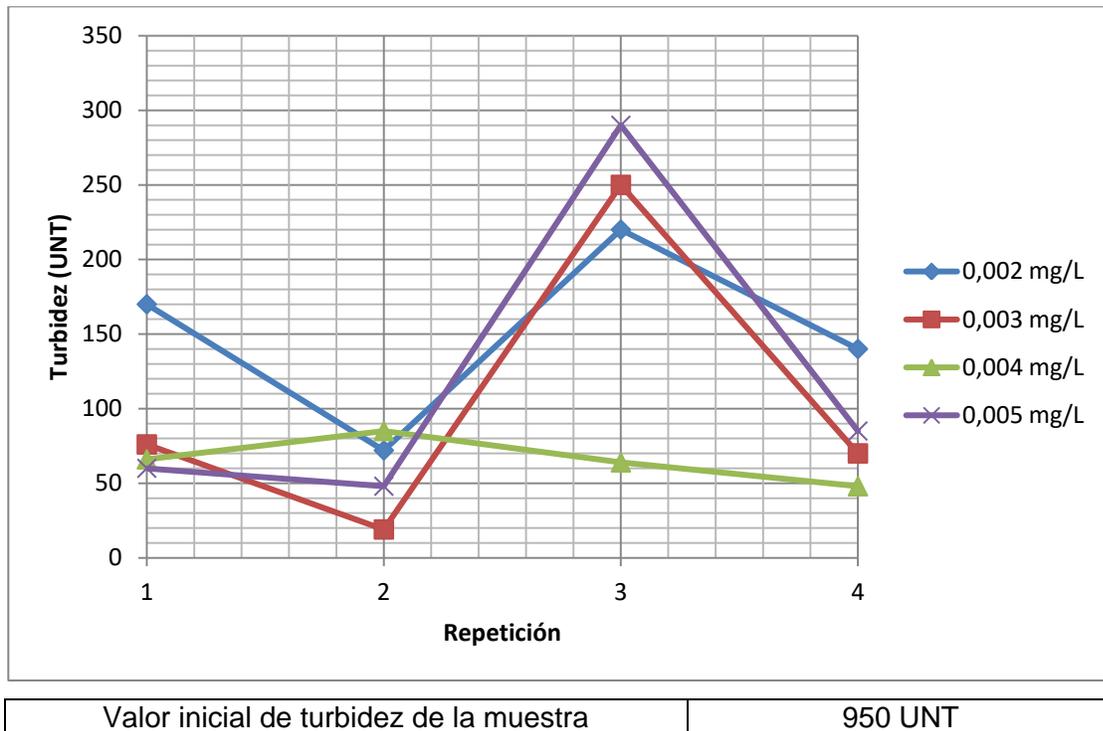
Figura 4. Turbidez final de las muestras con diferentes concentraciones de poliacrilamida



Valor inicial de turbidez de la muestra	950 UNT
---	---------

Fuente: elaboración propia.

Figura 5. **Turbidez final de las muestras con diferentes concentraciones de policloruro de aluminio**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Eficiencia como floculante de la poliacrilamida en diferentes concentraciones**

Concentración (mg/L)	Turbidez inicial (UNT)	Turbidez final promedio (UNT)	Eficiencia
0,002	950	14,250	98,500 %
0,003		10,500	98,895 %
0,004		10,750	98,868 %
0,005		8,500	99,105 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Eficiencia como floculante del policloruro de aluminio en diferentes concentraciones**

Concentración (mg/L)	Turbidez inicial (UNT)	Turbidez final promedio (UNT)	Eficiencia
0,002	950	150,500	84,158 %
0,003		103,750	89,079 %
0,004		65,750	93,079 %
0,005		120,750	87,289 %

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el presente trabajo de graduación se determinó la capacidad floculante de la poliacrilamida y del policloruro de aluminio, además del cálculo de eficiencia floculante de ambos compuestos.

La muestra original consistía de agua con arcilla, la cual tenía una turbidez de 950 UNT, un pH de 9,340 y una temperatura al momento de la toma de la muestra de 23 °C.

En la figura 4 se presenta la turbidez final en unidades nefelométricas de turbidez de la muestra de agua tras su tratamiento con poliacrilamida a diferentes concentraciones: 0,002, 0,003, 0,004 y 0,005 mg/L, respectivamente. Se realizaron 4 repeticiones para cada una. Para una concentración de 0,005 mg/L se obtuvo los valores promedio menores de turbidez, siendo esta de 8,5 UNT.

En el caso del policloruro de aluminio, en la figura 5 se presenta la turbidez final en unidades nefelométricas de turbidez para concentraciones iguales que las mencionadas anteriormente para la poliacrilamida. Se obtuvo los menores valores promedio de turbidez para una concentración de 0,004 mg/L con un valor de 65,75 UNT.

En cuanto al efecto que tienen ambos floculantes en el pH y la temperatura, se busca que ninguno afecte significativamente estos parámetros, por tratarse de aspectos sumamente importantes al momento de determinar que el agua sea apta para su uso. Para la poliacrilamida se obtuvo valores de

pH que van desde 7,57 para una concentración de 5 mg/L hasta 8,64 para una concentración de 2 mg/L. En cuanto a la temperatura, es de 24 °C en todas las muestras, como puede observarse en las tablas VIII, IX, X y XI

Para el caso del policloruro de aluminio se obtuvo valores de pH que van desde 7,23 para una concentración de 3 mg/L, hasta 8,4 para una concentración de 2 mg/L. De igual manera que para la poliacrilamida, la temperatura para todas las muestras es de 24 °C como puede observarse en las tablas XII, XIII, XIV y XV.

En las tablas XXI y XXII se presentan los resultados de eficiencias como floculantes de la poliacrilamida y el policloruro de aluminio. Para su determinación se realizó una relación entre la turbidez de la muestra inicial y la turbidez tras el tratamiento de prueba de jarras utilizando cada floculante. La poliacrilamida presenta la mayor eficiencia a una concentración de 0,005 mg/L, siendo esta de 99,105 %. Por su parte el policloruro de aluminio presenta la mayor eficiencia a concentración 0,003 mg/L, de 93,079 %.

Al evaluarse las eficiencias de cada uno de los floculantes, es evidente que la poliacrilamida presenta mayor eficiencia que el policloruro de aluminio. Aunque es mayor la cantidad de floculante utilizado, si se trata de la poliacrilamida se reduce la turbidez en 57,25 UNT más que si se utiliza el policloruro de aluminio. Si se analiza en general los valores de turbidez obtenidos del tratamiento con poliacrilamida, son todos menores que los obtenidos con el uso del policloruro de aluminio.

Para cada uno de los resultados de cada floculante evaluado se realizó un análisis estadístico, el cual consistía en coeficiente de variación y la F de Fisher para asegurar la confiabilidad de los resultados. Estos datos se presentan en

las tablas XVI a la XX. El coeficiente de variación de todos los resultados presenta un valor menor a 1, lo cual indica que no se presenta variación significativa entre los datos. Para la prueba F de Fisher se plantearon dos hipótesis: la alternativa consistía en que el tiempo de sedimentación y la cantidad de floculante utilizado difiere significativamente respecto al otro.

El valor F de la tabla fue de 3,490; el valor de F calculado para la poliacrilamida fue 3,785 y para el policloruro de aluminio, de 1,939, por lo que se rechaza la hipótesis estadística alternativa de que el tiempo de sedimentación y la cantidad de floculante utilizado difiere significativamente respecto a la del otro.

CONCLUSIONES

1. A una concentración de 0,005 mg/L la poliacrilamida presenta la mayor eficiencia como floculante en agua preparada con arcilla, con una turbidez promedio final de 8,5 UNT.
2. El policloruro de aluminio presenta la mayor eficiencia como floculante a una concentración de 0,004 mg/L en agua preparada con arcilla, con una turbidez promedio final de 120,75 UNT.
3. El pH de las muestras se ve reducido al aumentar la concentración de cada floculante desde 9,34 hasta valores de 7,57 para poliacrilamida y 7,23 para policloruro de aluminio.
4. La aplicación de los floculantes no tiene efecto significativo en la temperatura de las muestras.
5. La poliacrilamida presenta mayor eficiencia floculante que el policloruro de aluminio, con valores de 99,105 % y 93,079 % respectivamente.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio con los mismos floculantes en menores concentraciones o bien regular el pH previo a la aplicación de los mismos.
2. Comparar la poliacrilamida y el policloruro de aluminio con otros tipos de floculantes comúnmente utilizados en la industria.
3. El reposo tras la realización de las pruebas de jarras es de suma importancia y debe dársele un tiempo prudente de al menos 15 minutos.
4. La toma de la temperatura y pH in situ de la muestra original es un factor importante a tener en cuenta.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Water Works Association. *Calidad y tratamiento del agua: manual de suministros de agua comunitaria*. [en línea]. <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=55>>. [Consulta: 15 de abril de 2016].
2. CÁCERES RODRÍGUEZ, José Alberto. *Evaluación del uso de policloruro de aluminio como coagulante primario en la planta de tratamiento de agua potable El Cambray*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2009. 91 p.
3. Estadística 2. *Formulario*. [en línea]. <https://estadistica.ingenieria.usac.edu.gt/file.php/1/Formulario_de_analisis_2_2013.pdf>. [Consulta: 4 de abril de 2016].
4. POWELL, Sheppard T. *Acondicionamiento de aguas para la industria*. 2 ed. México: Limusa, 1974. 631 p.
5. Slideshare. *Reacciones de precipitación*. [en línea] <<http://es.slideshare.net/fatimaslideshare/tema-8-reacciones-de-precipitacin>>. [Consulta: 15 de abril de 2016].
6. _____. *Tratamiento de agua potable*. [en línea]. <<http://es.slideshare.net/steffivalencia1/tratamiento-de-agua-potable>>. [Consultado: 4 de abril de 2016].

APÉNDICES

Apéndice 1. **Muestras de agua tras tratamiento con poliacrilamida utilizando el equipo de jarras**



Fuente: elaboración propia, empleando el laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.

Apéndice 2. **Muestra de agua tratada con policloruro de aluminio
repetición 1**



Fuente: elaboración propia, empleando el laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.

Apéndice 3. **Muestra de agua tratada con poliacrilamida
repetición 1**



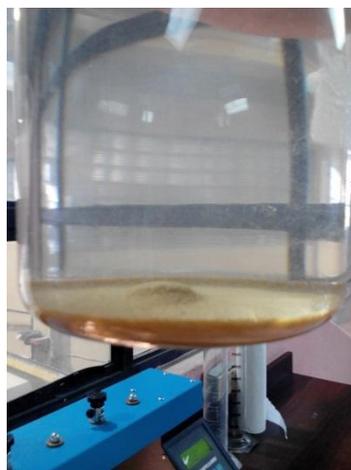
Fuente: elaboración propia, empleando el laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.

Apéndice 4. **Muestra de agua tratada con poliacrilamida
repetición 2**



Fuente: elaboración propia, empleando el laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.

Apéndice 5. **Muestra de agua tratada con policloruro de aluminio
repetición 2**



Fuente: elaboración propia, empleando el laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.

Apéndice 6. **Muestra de agua tratada con poliacrilamida
repetición 3**



Fuente: elaboración propia, empleando el laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.

Apéndice 7. **Sistema de prueba de jarras en acción**



Fuente: elaboración propia, empleando el laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.

Apéndice 8. **Muestra de agua tratada con policloruro de aluminio
repetición 3**



Fuente: elaboración propia, empleando el laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.

Apéndice 9. **Muestra de agua tratada con policloruro de aluminio
repetición 4**



Fuente: elaboración propia, empleando el laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.

Apéndice 10. **Muestra de agua tratada con poliacrilamida repetición 4**



Fuente: elaboración propia, empleando el laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.

Apéndice 11. **Diluciones de los floculantes poliacrilamida y policloruro de aluminio**



Fuente: elaboración propia, empleando el laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.

Apéndice 12. **Equipo de prueba de Jarras previo a experimentación**



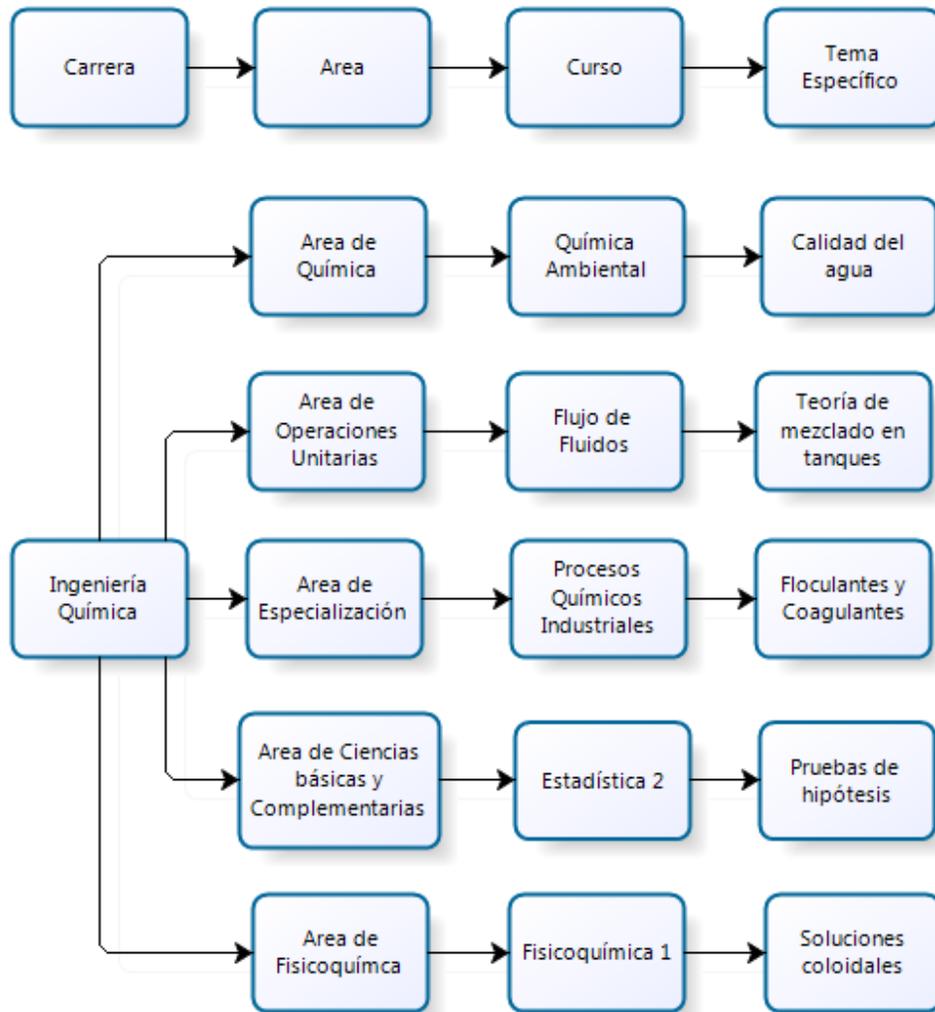
Fuente: elaboración propia, empleando el laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.

Apéndice 13. **Equipo para medición de peso de arcilla a utilizar en las muestras.**



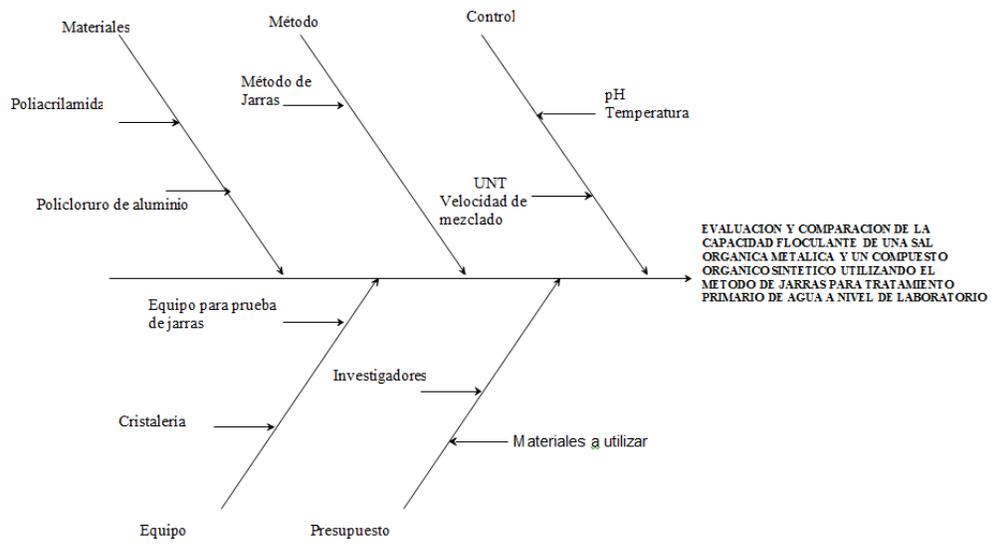
Fuente: elaboración propia, empleando el laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.

Apéndice 14. Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

ANEXO

Anexo 1. Valores de F de tabla para prueba de Fisher

Valores críticos de la distribución F de Fisher

$\alpha = 0.05$

		V ₁																	
V ₂	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	inf
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88	243.90	245.95	248.02	249.05	250.10	251.14	252.20	253.25	254.30
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.37
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.41
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62

Fuente: CÁCERES RODRÍGUEZ, José Alberto. *Evaluación del uso de policloruro de aluminio como coagulante primario en la planta de tratamiento de agua potable El Cambray.*

