



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**COMPARACIÓN DE LA COAGULACIÓN QUÍMICA Y LA
ELECTROCOAGULACIÓN EN LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE
TURBIDEZ DE AGUA DEL RÍO RÍMAC, 2016**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR

JOSÉ JOSÉ VERA RAMÍREZ

ASESOR

Dr. LORGIO GILBERTO VALDIVIEZO GONZALES

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

SISTEMA DE GESTIÓN AMBIENTAL

LIMA – PERÚ

2016

JORNADA DE INVESTIGACIÓN N° 2
ACTA DE SUSTENTACIÓN

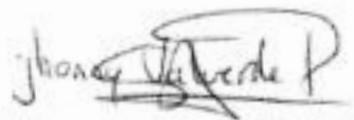
El Jurado encargado de evaluar el Trabajo De Investigación, PRESENTADO EN LA MODALIDAD DE : DPI (indicar si es proyecto de Tesis o Tesis)

Presentado por don (a) VERA RAMÍREZ, José José
Cuyo Título es: Comparación de la coagulación química y la electrocoagulación en la eficiencia de remoción de turbidez de agua del río Pírrac, 2016

Reunido en la fecha, escuchó la sustentación y la resolución de preguntas por el estudiante, otorgándole el calificativo de: M (número) once (letras).

Lima 05 de Julio, del 2016


.....
PRESIDENTE


.....
SECRETARIO




.....
VOCAL

NOTA: En el caso de que haya nuevas observaciones en el informe, el estudiante debe levantar las observaciones para dar el pase a Resolución.

DEDICATORIA

A mis padres por su amor, buen ejemplo,
palabras y apoyo incondicional. A mis
abuelos y, en especial, a mi abuela Anita
quien siempre me acompañó en el camino
y depositó su confianza en mí.

AGRADECIMIENTO

A mis padres Mónica y José, quienes no han tenido nada más que amor y apoyo para mí.

A mis cuatro abuelos, Petita, Ricardo, Fermín y Anita, quienes me tienen mucha estima, confianza y, que sobre todo, me brindan momentos de relajación y bromas.

A mi asesor Lorgio Valdiviezo Gonzales, por guiarme en los conocimientos necesarios para el desarrollo de mi proyecto de investigación y por aportar conocimientos en el campo del tratamiento de aguas.

A mis amigos más cercanos por el apoyo incondicional.

DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD

Yo José José Vera Ramírez con DNI N° 73192844 a efecto de cumplir con las disposiciones vigentes consideradas en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Cesar Vallejo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Ambiental, declaro bajo fundamento que toda la documentación que se adjuntó y acompañó es veraz y auténtica.

Así mismo, declaro también bajo juramento que todos los datos e información que se presenta en el desarrollo del proyecto de tesis son auténticos y veraces.

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

Lima, 14 de Julio del 2016

José José Vera Ramírez

DNI N° 73192844

PRESENTACIÓN

Señores miembros del Jurado:

En cumplimiento del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Cesar Vallejo presento ante ustedes la Tesis titulada: Comparación entre la coagulación química y la electrocoagulación en la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016; de la misma manera me someto a vuestra consideración y espero que cumpla con los requisitos de aprobación para obtener el título Profesional de INGENIERO AMBIENTAL.

José José Vera Ramírez

RESUMEN

El presente trabajo de investigación es de tipo cuantitativo, transversal y experimental; que tiene como objetivo principal comparar tres técnicas de tratamiento para remover turbidez en el agua del río Rímac, cuya muestra fue obtenida mediante un muestreo probabilístico aleatorio simple: Coagulación con sulfato de aluminio, coagulación con hidroxiclورو de aluminio y electrocoagulación con placas de aluminio. Para tal fin se hicieron experimentos en un equipo de test de jarras y un experimento de electrocoagulación dentro de un laboratorio. Se tomó una muestra de agua de 25 litros, 5 litros para cada una de las dos primeras pruebas y 2 litros aproximadamente para la tercera. Para conocer los niveles de turbidez tanto inicial como finales se usó un turbidímetro perfectamente calibrado. Además se halló el aluminio residual tanto experimental mediante la técnica de absorción atómica; como el teórico en base a la estequiometría de los coagulantes químicos y la masa de las placas de aluminio y la 1ª ley de Faraday para la técnica de electrocoagulación. Los datos obtenidos fueron procesados e interpretados en base a programas Excel y SPSS, usando los estadísticos de Análisis de varianzas (ANOVA) y el Índice de correlación de Pearson, para luego ser interpretados. Gracias al estadístico de ANOVA se probó que el promedio de las eficiencias de al menos uno de los tres métodos analizados arroja una diferencia significativa en la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac respecto a la otra u otras pruebas con un nivel de confianza del 95 %. La media más alta estuvo relacionada con el método de electrocoagulación con un 85.18 % de remoción de turbidez, seguido del hidroxiclورو de aluminio con 81.53 % y la menor la obtuvo el sulfato de aluminio con 69.81 %. Sin embargo, la electrocoagulación arrojó un mayor contenido de aluminio disuelto experimental según el análisis de absorción atómica. Respecto a la correlación de cada uno de los métodos usados, el estadístico señala que ninguno tiene una correlación respecto de la dosificación y densidad de corriente con la eficiencia en remoción de turbidez. Con esto se ha cumplido satisfactoriamente con los objetivos planeados.

Palabras clave: Remoción, coagulación, electrocoagulación, turbidez, eficiencia.

ABSTRACT

This research is quantitative, transversal and experimental; whose main objective is to compare three techniques of treatment to remove turbidity in the water the Rimac River, whose sample was obtained by random probability sampling: Coagulation with aluminum sulfate, coagulation with aluminum chlorohydrate and electrocoagulation with aluminum plates. To this end experiments on a test jar and electrocoagulation experiment in a laboratory it was made. a water sample 25 liters, 5 liters for each of the first two tests and about 2 liters for the third was taken. For both levels of initial turbidity with a turbidimeter end it was used perfectly calibrated. Besides the experimental both residual aluminum was found by atomic absorption technique; as the theoretical based on the stoichiometry of the chemical coagulants and mass of the aluminum plates and 1 Faraday law for electrocoagulation technique. The obtained data were processed and interpreted based on Excel and SPSS, using statistical Analysis of variances (ANOVA) and Pearson correlation index, then they are interpreted. Thanks to statistical ANOVA was proved that the average efficiencies of at least one of the three methods discussed casts a significant difference in removal efficiency of turbidity of the river Rimac respect to each other or other tests with a confidence level 95%. The highest average was related to the method of electrocoagulation with 85.18% removal of turbidity, followed by aluminum chlorohydrate with 81.53% and the lower the obtained aluminum sulfate with 69.81%. However, electrocoagulation showed a higher content of dissolved aluminum experimental according to atomic absorption analysis. Regarding the correlation of each of the methods used, the statistical notes that none has a correlation with the current density and dosage with turbidity removal efficiency. With this it has been satisfactorily completed the planned objectives.

Keywords: Removal, coagulation, electrocoagulation, turbidity, efficiency.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD	v
PRESENTACIÓN	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	viii
ÍNDICE GENERAL	ii
LISTA DE TABLAS	iv
LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE ANEXOS.....	v
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Realidad de la problemática	1
1.2. Trabajos previos.....	2
1.3. Teorías relacionadas al tema	4
1.6.1. Coagulación química	4
1.6.1.1. Coagulación con Sulfato de Aluminio	4
1.6.1.2. Coagulación con Hidroxicloruro de Aluminio	4
1.6.2. Electrocoagulación	5
1.6.3. Masa de Al + 3 que se produce en la electrocoagulación	6
1.6.4. Turbidez	7
1.4. Formulación del problema.....	7
1.2.1. Problema general	7
1.2.2. Problemas específicos.....	8
1.5. Justificación del estudio	8
2.1. Hipótesis	9
2.3.1. Hipótesis general.....	9
2.3.2. Hipótesis específicas	9
□ Hipótesis específica 1	9
1.6. Objetivos.....	10
1.5.1. Objetivo general	10

1.5.2. Objetivos específicos.....	11
II. MÉTODO	11
2.2. Diseño de investigación	11
1.2.1. De acuerdo al tipo	11
1.2.2. De acuerdo al tiempo.....	11
2.3. Operacionalización de variable	12
2.4. Población y muestra.....	14
2.6.1. Población.....	14
2.6.2. Muestreo	14
2.5. Criterios de selección.....	14
2.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad	15
2.7. Métodos de análisis de datos	16
2.8. Aspectos éticos	17
III. RESULTADOS.....	18
3.1. Etapa N° 01: Recolección de la muestra de agua de río Rímac y análisis de turbidez inicial y otros parámetros	18
3.2. Etapa N° 02: Prueba de jarras usando sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$	20
3.3. Etapa N° 03: Prueba de jarras usando hidroxiclorigenato de aluminio $Al_2Cl(OH)_5$	21
3.4. Etapa N° 04: Proceso de electrocoagulación con placas de aluminio.....	23
3.5. Etapa N° 05 Cálculo del aluminio residual.....	27
3.6. Interpretación de los resultados	28
3.6.1. De la hipótesis general	28
3.6.1.4. De la hipótesis específicas.....	32
IV. DISCUSIÓN	40
V. CONCLUSIONES	43
VI. RECOMENDACIONES	45
VII. REFERENCIAS	47
ANEXOS.....	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Características del Sulfato de aluminio de grado potable.....	4
Tabla 2 Características del Hidroxicloruro de aluminio PAC ZB-005	5
Tabla 3 Operacionalización de variables	13
Tabla 4 Etapas del estudio	15
Tabla 5 Características iniciales de la muestra.....	20
Tabla 6 Resultados del proceso de coagulación con Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$	21
Tabla 7 Resultados del proceso de coagulación con Hidroxicloruro de Aluminio $Al_2Cl(OH)_5$	22
Tabla 8 Resultados del proceso electrocoagulación con placas de aluminio	26
Tabla 9 Resumen de las eficiencias de los resultados experimentales.....	27
Tabla 10 Datos para aplicar el Análisis de varianzas (ANOVA)	29
Tabla 11 Prueba de normalidad	30
Tabla 12 Prueba de Homocedasticidad	30
Tabla 13 Análisis de varianzas (ANOVA)	31
Tabla 14 Coeficiente de correlación de Pearson respecto al tratamiento con sulfato de aluminio	32
Tabla 15 Análisis descriptivo de la dosificación de sulfato de aluminio	33
Tabla 16 Coeficiente de correlación de Pearson respecto al tratamiento con hidroxiclورو de aluminio	35
Tabla 17 Análisis descriptivo de la dosificación de hidroxiclورو de aluminio	35
Tabla 18 Coeficiente de correlación de Pearson respecto al tratamiento con electrocoagulación con placas de aluminio.	37
Tabla 19 Análisis descriptivo de la electrocoagulación con ánodos de aluminio	37
Tabla 20 Resumen de los resultados de aluminio residual	39
Tabla 21 Resumen de los resultados de aluminio residual comparando los coagulantes químicos.	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Esquema del proceso de electrocoagulación	6
Figura 2 Muestreo en las aguas del río Rímac	16
Figura 3 Zona de muestreo	18
Figura 4 Medición de Conductividad, pH y temperatura de la muestra de agua.	19
Figura 5 Sulfato de aluminio adquirido para los experimentos	20
Figura 6 Pesado del Sulfato de aluminio en las cantidades de 10, 20, 30, 40 y 50 mg....	20
Figura 7 Hidroxicloruro de aluminio PAC ZB-005 adquirido para el experimento	22
Figura 8 Pesado del Hidroxicloruro de aluminio	22
Figura 9 Medición de turbidez para Hidroxicloruro de Aluminio $Al_2Cl(OH)_5$	22
Figura 10 Equipo de test de jarras	22

Figura 11 Experimento de electrocoagulación con placas de aluminio.....	24
Figura 12 Placas de aluminio reciclado.....	25
Figura 13 Vaso Beaker de 500ml luego de haber aplicado la electrocoagulación	25
Figura 14 Comparación de los resultados de los tres experimentos.....	31
Figura 16 Eficiencia de remoción de turbidez respecto	34
Figura 17 Eficiencia de remoción de turbidez respecto a la concentración.....	36
Figura 18 Eficiencia de remoción de turbidez respecto a la densidad de	38

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Formato de características iniciales de la muestra.....	50
Anexo 2 Formato de evaluación para el proceso de coagulación con Sulfato de aluminio	50
Anexo 3 Formato de evaluación para el proceso de coagulación con Hidroxicloruro de Aluminio.....	51
Anexo 4 Formato de evaluación para el proceso de electrocoagulación con placas de aluminio	51
Anexo 5 Límites máximos permisible de los parámetros involucrados	52
Anexo 6 Requisitos para toma de muestras de agua y preservación	52
Anexo 7 Ubicación de la zona de muestreo: Autopista Ramiro Prialé 4.5 con Av. Los Cisnes	53
Anexo 8 Matriz de consistencia.....	54
Anexo 9 Valores F de la distribución de Fisher	55
Anexo 10 Cálculo de la eficiencia de cada dosificación con sulfato de aluminio.....	56
Anexo 11 Cálculo de la eficiencia de cada dosificación con hidroxicluro de aluminio... 56	56
Anexo 12 Cálculo de la eficiencia de cada experimento de electrocoagulación	56
Anexo 13 Cálculo de la masa de aluminio teórico del agua tratada con la dosificación más eficiente de sulfato de aluminio.....	57
Anexo 14 Cálculo de la masa de aluminio teórico del agua tratada con la dosificación más eficiente de hidroxicluro de aluminio.	57
Anexo 15 Cálculo de la masa de aluminio teórico del experimento de electrocoagulación más eficiente según la 1º ley de Faraday.....	58
Anexo 16 .Cálculo de la masa de aluminio perdido tras el experimento de electrocoagulación.....	58
Anexo 17 Resultado del aluminio soluble contenido en las muestras de agua tratadas en el experimento más eficiente de cada técnica.....	59

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad de la problemática

Hoy en día la humanidad enfrenta a una de las mayores problemáticas del siglo XXI y es la necesidad de proveer agua potable para una creciente población mundial. Actualmente, una de cada tres personas del mundo no dispone de agua suficiente para satisfacer sus necesidades diarias (Organización Mundial de la Salud OMS). A nivel mundial, el problema está empeorando con el crecimiento demográfico y de las ciudades, además del aumento de las necesidades de agua en la agricultura, la industria y los hogares.

En el caso del Perú, según cifras del INEI del año 2012, el porcentaje de hogares de la zona rural que no tenían acceso a agua potable se incrementó de 59.5% a 62.5%. Además, se dio a conocer que 2/3 de los hogares rurales aún no accedían a servicios de agua potable. Aparte de ello, es necesario implementar sistemas que además de bastecer la demanda, sean de calidad con lo cual no haya afectos adversos sobre la salud y la economía. Para lo cual, uno de los procesos más delicados es la floculación, cuyo tratamiento implica el uso de aditamentos químicos, orgánicos u otros no convencionales con el fin del reducir la turbidez del agua a tratar.

Según Cogollo, se ha cuestionado en los últimos años el uso de los coagulantes más comunes, incluido el sulfato de aluminio, básicamente porque en esta técnica es complejo mantener la estabilidad del pH óptimo de la coagulación durante la operación, además de una posible relación con la aparición de enfermedades neurodegenerativas como Alzheimer. (2011)

Por otro lado, en los últimos años ha habido una serie de tecnologías emergentes que tienen su fundamento en la electroquímica; y dentro de ellas tenemos a la electrocoagulación, y aunque es una tecnología que ya se ha usado en el pasado, no ha sido estudiado a fondo. Sin embargo, ya se han demostrado sus ventajas en costos, equipos simples y sencillos, además de ser ambientalmente respetuosos.

La calidad del agua del río Rímac ofrece características que se podrían ajustar a tratamientos alternativos que deriven en ventajas técnicas y económicas; adecuándose al Protocolo de monitoreo de la calidad de los recursos hídricos de la Autoridad Nacional del Agua del año 2011.

Actualmente el agua es tratada con el coagulante convencional como es el Sulfato aluminio; sin embargo, estudios anteriores ya han demostrado las ventajas de la aplicación de métodos alternos.

1.2. Trabajos previos

- a) El artículo publicado el año 2007 por Carlos Romero [Et al.] para la revista Ingeniería UC cuyo nombre fue “Síntesis de un polímero inorgánico de aluminio y su uso para clarificación de agua”, cuyo objetivo ha sido estudiar sustitutos de las sales de aluminio convencionales que tengan mayor eficiencia en el tratamiento de agua, para ello se realizó la síntesis del polímero de aluminio catiónico (Policloruro de aluminio) $[Al_{13}O_4(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{+7}$, realizada a pH 4,50 y a partir de cloruro de aluminio, logra su mejor aplicación para el tratamiento de floculación del agua. Los resultados son aceptables según la normativa nacional (de Venezuela, 2007) para turbiedad, color, pH y aluminio residual, con dosis de 25 a 45 ppm.

La comparación entre el polímero de aluminio y el floculante convencional sulfato de aluminio, utilizado en el tratamiento de floculación del agua arrojó mejores resultados para el polímero, con dosis inferiores en 60% y disminución del aluminio residual de 20 por ciento, lo cual favorece su uso como coagulante.

- b) La tesis presentada por José García para optar por el grado de Maestro en Ingeniería ambiental – Agua el año 2010 cuyo título fue “Remoción de arsénico en agua por electrocoagulación” tuvo como objetivo principal “determinar las condiciones electroquímicas, hidráulicas y fisicoquímicas que mejoren la eficiencia de la electrocoagulación a escala semi-piloto, tanto en la producción del coagulante como en su remoción, junto con el arsénico presente en agua”; siendo esta una investigación de tipo experimental. Como conclusión se obtuvo que las mejores condiciones de operación que generaron las mayores eficiencias electroquímicas e hidráulicas del reactor de electrocoagulación incluyen la distancia entre los electrodos de 0.4 cm, conductividades cercanas a 600 $\mu S/cm$, densidades de corriente de 0.015 A/cm^2 , caudales superiores a 5.0 L/min y gradiente de mezcla (Gt) superiores a 9,000.

Además, se halló que la conductividad del agua afecta directamente la eficiencia electroquímica y su incremento mediante la adición de sal eleva los costos de operación

del proceso, además de incrementar la concentración de sólidos disueltos en el agua tratada.

- c) El proyecto de investigación titulado “Reducción de la carga de contaminantes de las aguas residuales de la planta de tratamiento de Totorá –Ayacucho empleando la técnica de electrocoagulación” desarrollado por Gloria Barboza (2011) para optar por el Grado académico de Maestro en ciencias con mención en química. Este trabajo de investigación constó de dos etapas según señala la autora: Determinación de las características del agua a tratar y la aplicación de electrocoagulación. El principal objetivo fue el de reducir la contaminación contenida en las aguas residuales de la planta de tratamiento de Totorá – Ayacucho aplicando electrocoagulación con electrodos de sacrificio de aluminio.

Entonces, los resultados de esta investigación señalan que aplicando 25 minutos de electrocoagulación a las muestras de agua, con una densidad de corriente de $12,5\text{mA/m}^2$ y un voltaje de 21 a 23 V, con pH regulado a 7,33 -7,34 logró remover 94,65% de turbidez.

Barboza indica además que una de las ventajas de esta técnica es que los iones Al^{-3} producidos durante el proceso participan casi íntegramente en la desestabilización de los coloides y simultáneamente en la formación del precipitado de hidróxido de aluminio, quedando únicamente un 1,27 % de aluminio residual en la muestra tratada, lo que ocasionó que la concentración de aluminio residual dentro de los límites permisibles según ENCAA para agua de categoría 3.

Concluyó que la turbidez es removida con más eficiencia a cuanto más densidad de corriente y tiempo de electrocoagulación; además, luego de la aplicación de electrocoagulación, la formación de flóculos fue más evidente tras a aplicación del proceso de floculación.

- d) El artículo publicado por Juan Cogollo Flores el año 2011 titulado “Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio” evidenció las ventajas tanto técnicas como económicas de coagulantes polimerizados (Hidroxiclورو de aluminio) sobre coagulantes convencionales, esto gracias a la totalidad de su capacidad de solubilidad, además del uso adecuado de un ajustador de pH garantizará tales ventajas. Recalcando incluso menores niveles de aluminio residual. Además, facilita las operaciones ulteriores en las plantas de tratamiento.

1.3. Teorías relacionadas al tema

1.6.1. Coagulación química

1.6.1.1. Coagulación con Sulfato de Aluminio

Sal sólida y de color blanco marfil cuya fórmula es $Al_2(SO_4)_3$. Gracias a sus características físico-químicas se usa básicamente como coagulante y floculante primario con el fin de tratar agua para potabilizarla o para aguas residuales.

Agrupar los sólidos suspendidos que contiene agua y sedimentándolos de manera más acelerada, con lo cual disminuye la carga bacteriana y se remueve el color y el sabor. (LABARCES 2007)

Tabla 1 Características del Sulfato de aluminio de grado potable

ÍNDICE	VALOR
Peso molecular (g/mol.)	594.14
Óxido de aluminio (Al_2O_3) % >=	7.8-8.2
Basicidad %>=	0.20
pH (1% de solución acuosa)	1.8-2.3
Insolubilidad en agua % <=	0.10
Densidad (g/ml)	1.30-1.35
Solubilidad en agua	Completamente miscible

Fuente: Hoja de datos de seguridad Sulfato de aluminio en solución tipo A y B

1.6.1.2. Coagulación con Hidroxicloruro de Aluminio

Se trata de una sal inorgánica de aluminio multinuclear (PAC) con la cual se pueden conseguir flóculos más rápidamente y perfeccionados, los cuales sedimentan con más velocidad, lo que conlleva a una capacidad de clarificación muy eficiente. Según Cogollo (2011), se hallan niveles más eficientes en un rango de pH de entre 5.0 y 9.0.

En la presente investigación, la fórmula del Hidroxicloruro de aluminio usado es $Al_2Cl(OH)_5$.

Tabla 2 Características del Hidroxicloruro de aluminio PAC ZB-005

ÍNDICE	LÍQUIDO	SÓLIDO
Peso molecular (g/mol.)	174.4	174.4
Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃) % >=	10-19	30min
Basicidad %	40-60	40-60
pH (1% de solución acuosa)	3.5-5.0	3.5-5.0
Insolubilidad en agua % <=	0.1	0.1
Densidad (g/ml)	1.3-1-4	1.3-1-4

Fuente: Hoja de datos de seguridad

1.6.2. Electrocoagulación

Según Barboza (2011), se trata del proceso electroquímico mediante el cual las partículas de contaminantes suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso se desestabilizan, esto gracias a la inducción de corriente eléctrica en el agua mediante placas metálicas paralelas, las cuales pueden ser de distintos materiales, removiendo paralelamente metales pesados, sólidos suspendidos, compuestos orgánicos suspendidos entre otros varios contaminantes; todo esto reemplazando los reactivos químicos por electricidad.

Esta técnica genera lodos acumulados en la superficie del agua en su mayoría y sólidos sedimentados, los cuales luego son apartados mediante flotación, decantación o filtración.

1.6.2.1. Proceso electroquímico de oxidación

Disolución anódica del metal, es decir, en la transferencia de iones metálicos desde la fase metal a la fase disolución o a la fase producto de reacción. La velocidad del proceso de disolución anódica viene determinada por las leyes de la electrodica. El proceso tiene lugar a potenciales más positivos que el potencial de equilibrio del metal, es decir, se polariza el electrodo. En la mayoría de los casos, la disolución anódica está controlada por la reacción de electrodo y no viene afectada por los cambios de concentración junto al mismo. (AGUILAR 2015)

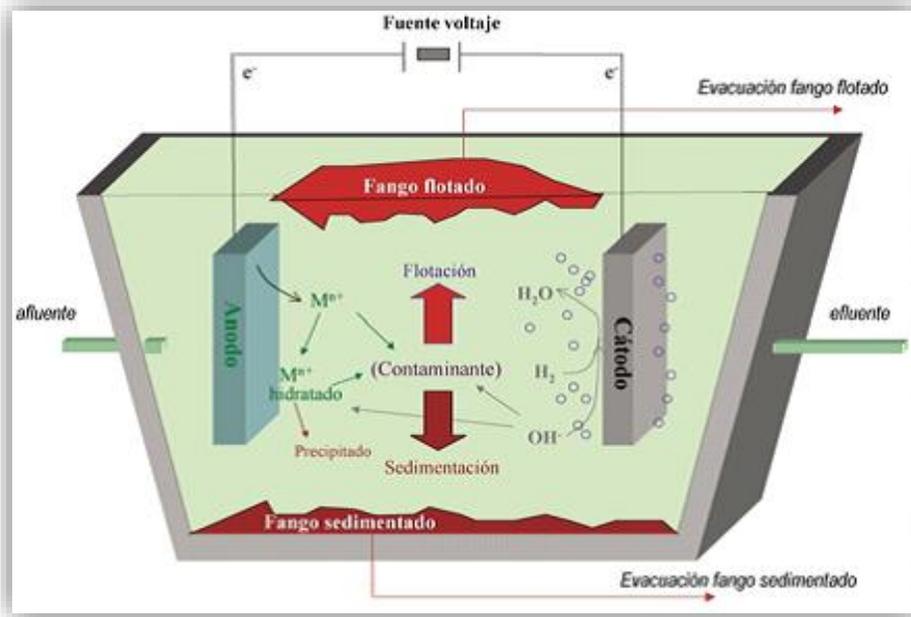


Figura 1 Esquema del proceso de electrocoagulación
Fuente: Quijano (2011)

1.6.3. Masa de Al^{+3} que se produce en la electrocoagulación

La totalidad de iones Al^{+3} que se suministra a la muestra de agua está relacionada directamente con la intensidad de corriente y el tiempo de tratamiento, basado en la 1ra ley de Faraday. (BARBOZA, 2011)

En un experimento de electrocoagulación la cantidad de metal disuelto (ánodo) o depositado (cátodo) depende de la cantidad de densidad de corriente que pasa a través del electrodo en solución. Una relación simple entre densidad de corriente ($A \cdot m^2$) y la masa de sustancia m ($g \cdot m^2$) disuelta puede ser calculada a partir de la ley de Faraday:

$$m_{Al-disuelto} = \frac{M * I * t}{n * F}$$

- $m_{Al-disuelto}$: masa de aluminio disuelto g
- I : Intensidad de corriente (A)
- t : tiempo (s)
- M : masa molecular ($g \cdot mol^{-1}$)
- n : número de electrones transferidos en la reacción oxidación/reducción
- F : Constante de Faraday ($96500 C \cdot mol^{-1}$)

Según Gamero, “se espera que la masa de aluminio disuelto calculado con la ley de Faraday concuerde o presente alguna similitud con la masa disuelta experimentalmente en el proceso de electrocoagulación. Generalmente se obtienen valores parecidos o superiores, sin embargo se pueden presentar algunos errores si no se presta la debida atención a la geometría del electrodo.” (2011).

1.6.4. Turbidez

Como señala Aguilar, es un parámetro originado por las partículas en suspensión o coloides (arcillas, limo, tierra finamente dividida entre otros) y es ocasionado por partículas cuyo tamaño no les permite sedimentar, es decir, se quedan suspendidas, lo cual minimiza la claridad del agua. Las unidades con las que se mide son las unidades nefelométricas de turbidez (NTU). (2015)

1.6.3.1. Naturaleza de la turbidez

Las partículas en suspensión son las principales causantes de la turbidez (siendo normalmente minerales, arcillas, sedimentos, elementos orgánicos e inorgánicos, entre otros), siendo estas coloides o materia insoluble más grandes.

Los elementos más frecuentes en aguas turbias son las arcillas, las cuales, basados en diversos análisis, se componen básicamente de aluminio, sílice y agua; usualmente con álcalis, hierro y tierra alcalina. (DE VARGAS 2004)

1.6.5. Curso bajo del río Rímac

Según datos del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) del años 2015, el agua superficial del río Rímac se caracteriza por bajos niveles de color (<10CU), elevados niveles de turbidez, principalmente en temporada de lluvia (20 a 600 NTU), y moderadas concentraciones de sólidos en solución (300 a 500 mg/L). El agua es alcalina (pH en el rango de 7.4 a 8.4), dura (100 a 260 mg/L como CaCO₃) y contenido de aluminio, trazas de hierro, arsénico y plomo. El contenido relativamente alto de sulfato (88 a 230 mg/L) refleja la descarga de drenajes ácidos de mina hacia el río.

1.4. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuál es el método más eficiente entre la coagulación química y la electrocoagulación en la remoción de turbidez de agua del río Rímac, 2016?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el nivel de correlación entre la dosificación de los coagulantes químicos (sulfato de aluminio e hidroxicloriguro de aluminio) y la eficiencia en la remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016?
- ¿Cuál es el nivel de correlación entre la densidad de corriente aplicada en la técnica de electrocoagulación con placas de aluminio y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016?
- ¿Cuál es el método que genera menor cantidad de aluminio residual en el agua entre la coagulación química y la electrocoagulación en la remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016?

1.5. Justificación del estudio

El principal propósito es partir en la búsqueda de alternativas que permitan llegar más personas y estas se beneficien con nuevos proyectos e innovadoras tecnología, muchas de las cuales son relativamente simples y, sin embargo, no han sido lo suficientemente analizadas e investigadas, por lo cual su potencial beneficiario y de eficiencia no ha podido ser aprovechado como conviniera; más aún con los retos de recursos y energías que enfrentamos y que, inevitablemente, cada vez serán mayores.

Reducir el nivel de coagulantes dosificados para el tratamiento de agua no es básicamente importante por la optimización de costos o de los procesos, sino por las ventajas en afecciones a la salud de las personas que consumen el agua tratada. Específicamente el uso del Sulfato de aluminio ha sido un tema controversial debido a los efectos negativos sobre la salud, Mal de Alzheimer, por citar un ejemplo importante. Por ello ha sido motivación de la investigación como principal objetivo es la reducción de la dosificación de un coagulante (en este caso Sulfato de aluminio).

Por otro lado, tomando como base el aspecto económico, el uso de métodos alternos que se adecúen al tratamiento de aguas podría derivar en ventajas monetarias incluso a mediano plazo.

El proceso de floculación es un método que tradicionalmente se ha empleado para la remoción de contaminantes; sin embargo, deben de ser objeto de estudio para hallar técnicas, que si bien trabajan bajo el mismo principio de funcionamiento, logran la

optimización de su eficiencia reduciendo las áreas y volúmenes requeridos para ejecutarlas. Con esto además se busca incentivar a empresas que puedan invertir en tecnologías que planteen soluciones relativamente simples a grandes retos. Por ejemplo, el año 2015 se concedió una patente internacional al proyecto BLAAT® (Biorreactor Lagunas Anaeróbicas de Alta Tasa), proyecto que contribuye a descontaminar, a bajo costo, las aguas servidas de ciudades o núcleos agroindustriales que se descargan en lagunas, con posibilidad de obtener dos componentes adicionales: producción de biogás para uso energético y biomasa como material de enmienda de suelos.

La dosificación en exceso de coagulantes implica elevar los costos del tratamiento, sin generar mejoras en la calidad del agua producida, por lo que debe evitarse si se pretende una operación adecuada de la planta. Por ello, el número de variables a evaluar y la complejidad del proceso de coagulación, floculación y sedimentación es el motivo por el que sus procedimientos convencionales tienen un consumo significativo de tiempo y un número relativamente elevado de experimentos.

El proyecto de investigación que se propone empleó la metodología estadística de Análisis de Varianza (ANOVA) que permitió definir los factores variables que tienen una mayor incidencia en la variable de respuesta, con las siguientes ventajas: entender las interacciones entre las variables, reducir el número total de experimentos; ahorrando esfuerzo, tiempo, gasto en insumos, componentes químicos, materiales, equipos y fuerza de trabajo.

2.1. Hipótesis

2.3.1. Hipótesis general

Ho = El promedio de las eficiencias de cada uno de los tres métodos analizados no refieren una diferencia significativa en la remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016

Ha = El promedio de las eficiencias de al menos uno de los tres métodos analizados refieren una diferencia significativa en la remoción de turbidez del agua del río Rímac respecto a la(s) otra(s), 2016.

2.3.2. Hipótesis específicas

✓ Hipótesis específica 1

Ho = No existe correlación entre la dosificación de sulfato de aluminio y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016.

Ha = Sí existe correlación entre la dosificación de sulfato de aluminio y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016.

Ho = No existe correlación entre la dosificación de hidroxiclورو de aluminio y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016.

Ha = Sí existe correlación entre la dosificación de hidroxiclورو de aluminio y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016.

✓ **Hipótesis específica 2**

Ho = No existe correlación entre la densidad de corriente aplicada en la técnica de electrocoagulación con placas de aluminio y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016.

Ha = Sí existe correlación entre la densidad de corriente aplicada en la técnica de electrocoagulación con placas de aluminio y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016.

✓ **Hipótesis específica 3**

Ho = La concentración de aluminio residual en el agua es menor usando la coagulación química en lugar de electrocoagulación en la remoción de turbidez de agua del río Rímac, 2016.

Ha = La concentración de aluminio residual en el agua es mayor usando la coagulación química en lugar de electrocoagulación en la remoción de turbidez de agua del río Rímac, 2016.

1.6. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Determinar cuál es el método más eficiente entre la coagulación química y la electrocoagulación en la remoción de turbidez de agua del río Rímac, 2016.

1.5.2. Objetivos específicos

- Determinar si existe correlación entre la dosificación de sulfato de aluminio y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016.
Determinar si existe correlación entre la dosificación de hidroxiclорuro de aluminio y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016.
- Determinar si existe correlación entre la densidad de corriente aplicada en la técnica de electrocoagulación con placas de aluminio y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016.
- Determinar cuál es el método que genera menor cantidad de aluminio residual en el agua entre la coagulación química y la electrocoagulación en la remoción de turbidez de agua del río Rímac, 2016.

II. MÉTODO

2.2. Diseño de investigación

1.2.1. De acuerdo al tipo

Es de tipo cuantitativo puesto que este se busca probar hipótesis basadas en la medición numérica y el análisis estadístico, para posteriormente hallar patrones de comportamiento con lo cual se prueba dichas teorías (Hernández, Fernández y Baptista 2008).

1.2.2. De acuerdo al tiempo

De acuerdo al tiempo es transversal, ya que se recogen datos en una sola ocasión, en un tiempo único. Su propósito es detallar las variables y examinar su incidencia e interrelación en un momento dado (Hernández, R. et al. 2010. P. 151).

La investigación es de tipo descriptiva debido a los diferentes procesos involucrados desde la identificación y selección de las variables en la línea base, para luego pasar a la descripción de cada una de ellas en la generación de conocimientos y finalmente la etapa de la interrelación; lográndose de esta manera la comparación y conclusiones.

2.3. Operacionalización de variable

Con el fin de hallar un factor medible en el marco del método científico usado en los trabajos de investigación se identifican las variables con sus respectivas definiciones. Bajo este principio se desarrolla la operacionalización de variables como se muestra en la Tabla 3.

Las variables identificadas en la presente investigación son:

- Variable Independiente: Métodos de coagulación (química y electrocoagulación).
- Variable Dependiente: Remoción de turbidez.

Tabla 3 Operacionalización de variables

Variable		Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Dependiente	Comparación entre la coagulación química y electrocoagulación	<p>Química: Realizada habitualmente con sales de aluminio y hierro. Radica en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva. (Barrenechea).</p> <p>Electrocoagulación: Sistema de tratamiento alternativo basado en la tecnología electroquímica (García, 2010).</p>	La coagulación se realizará gracias a la dosificación coagulantes químicos y electrocoagulación en muestras de agua del río Rímac.	<p>Dosificación de sulfato de aluminio</p> <p>Dosificación de hidroxiclورو de aluminio</p> <p>Densidad de corriente</p>	<p>Miligramos de sulfato de aluminio por litro de agua</p> <p>Miligramos de hidroxiclورو de aluminio por litro de agua</p> <p>Densidad de corriente aplicada a placas de aluminio</p>	Continua
Independiente	Eficiencia en la remoción de turbidez	Proceso mediante el que se desestabilizan las partículas coloidales gracias a un agente coagulante para luego chocar unas a otras para formar partículas de tamaño mayor (floculación). (Domínguez, 2010)	La remoción de turbidez se medirá mediante un Turbidímetro portátil Oakton T-100 debidamente calibrado.	<p>Turbidez inicial</p> <p>Turbidez final dosificando sulfato de aluminio</p> <p>Turbidez final dosificando hidroxiclورو de aluminio</p> <p>Turbidez final aplicando electrocoagulación</p>	<p>NTU de la muestra de agua bruta</p> <p>NTU de la muestra tratada con sulfato de aluminio</p> <p>NTU de la muestra tratada con hidroxiclورو de aluminio</p> <p>NTU de la muestra tratada por electrocoagulación</p>	Continua

2.4. Población y muestra

2.6.1. Población

Caudal del curso bajo del río Rímac: El caudal de estiaje mensual fluctúa entre 16.90 m³/seg. y 18.19 m³/seg. entre junio y noviembre, tiempo en el que se desarrollará el desarrollo de la investigación. Por lo tanto, la población es un volumen promedio de 17.5m³ de agua.

La muestra tomada fue de 25 litros de agua bruta aproximadamente y almacenada en botellas de 10 litros de volumen (véase Figura 2) y se conservó según los “Requisitos para toma de muestras de agua y preservación” de la Autoridad Nacional del Agua.

2.6.2. Muestreo

El tipo de muestreo es probabilístico de tipo aleatorio simple ya que la muestra fue recogida en un proceso en el cual cada lugar del cauce del río tuvo la misma posibilidad de ser seleccionado.

La muestra fue recogida en 3 botellas de 10 litros de capacidad y conducida directamente al laboratorio de la Universidad César Vallejo para realizar los experimentos.

2.5. Criterios de selección

Se realizaron cinco (5) pruebas de jarra con cada coagulante químico, sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ e hidroxiclorigenato de aluminio $Al_2Cl(OH)_5$; con lo cual se hallará la dosificación más eficiente para cada uno. Además, se harán tres (3) pruebas con el método de electrocoagulación con tres diferentes densidades de corriente, y se tomará también la más eficiente para la muestra de agua del río Rímac.

Luego, se comparará la más eficiente entre las dos pruebas seleccionadas como más eficientes para cada método y, finalmente, se determinará en cuál de las dos se halla menor cantidad de aluminio disuelto.

2.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad

Tabla 4 Etapas del estudio

ETAPA	FUENTE	TÉCNICA	INSTRUMENTO
Recolección de la muestra de agua de río Rímac y análisis de turbidez inicial y otros parámetros	Caudal del río Rímac a la altura de km. 4.5 Autopista Ramiro Prialé Laboratorio Universidad César Vallejo – Lima Norte	Formato de toma de datos Análisis en laboratorio	Ficha de formato de características iniciales de la muestra
Prueba de jarras usando sulfato de aluminio	Laboratorio Universidad César Vallejo – Lima Norte	Equipo de test de jarra	Ficha de formato de evaluación para el proceso de coagulación con Sulfato de aluminio
Prueba de jarras usando hidroxiclورو de aluminio	Laboratorio Universidad César Vallejo – Lima Norte	Equipo de Test de jarras	Ficha de formato de evaluación para el proceso de coagulación con Hidroxiclورو de aluminio
Proceso de electrocoagulación con placas de aluminio	Laboratorio Universidad César Vallejo – Lima Norte	Experimento de electrocoagulación	Ficha de formato de evaluación para el proceso de electrocoagulación con placas de aluminio
Análisis de la turbidez final	Laboratorio Universidad César Vallejo – Lima Norte	Análisis en laboratorio	Ficha de comparación de eficiencias de los resultados experimentales
Análisis del aluminio residual tras el tratamiento	Laboratorio de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Ingeniería.	Análisis en laboratorio	Ficha de evaluación del aluminio residual

2.6.1. Validez y confiabilidad

La validación de los instrumentos la realizaron tres de expertos. Las fichas procedentes de los instrumentos han sido validadas por expertos ingenieros colegiados en el tema de investigación en base a los anexos del 01 al 04.

- Ficha de características iniciales de la muestra,
- Formato de evaluación para el proceso de coagulación con sulfato de aluminio,
- Formato de evaluación para el proceso de coagulación con hidroxiclورو de aluminio,

- Formato de evaluación para el proceso electrocoagulación con placas de aluminio.

La confiabilidad del instrumento se basará en el uso del estadístico de Análisis de varianzas (ANOVA) y el Coeficiente de correlación de Pearson. Respecto a la etapa experimental se desarrolló en el laboratorio de la Universidad César Vallejo - Lima Norte, cuyos instrumentos se encuentran perfectamente calibrados; y los análisis de las muestras para hallar el contenido de aluminio residual fueron determinados por absorción atómica en el laboratorio de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Ingeniería, el cual se encuentra debidamente certificado.



*Figura 2 Muestreo en las aguas del río Rímac
Fuente: Fotografías tomadas en el río Rímac*

2.7. Métodos de análisis de datos

- Gráficos Estadísticos en Excel
- Análisis Descriptivos de SPSS
- Prueba Anova
- Coeficiente de correlación de Pearson

El análisis estadístico se realizó mediante la técnica de Análisis de Varianza (ANOVA) con lo que se determinó cuantitativamente la relación entre los parámetros de los experimentos y sus interacciones, además del error experimental sobre las variables de respuesta.

Como señala García (2010), el análisis ANOVA separa los efectos de cada factor a través la suma de cuadrados (SS) la cual dividida entre los grados de libertad correspondientes determina la media cuadrada (MS) de cada uno, es decir, la varianza asociada a cada factor respecto a la varianza residual (ϵ), lo cual nos permite observar la significancia de los efectos.

El propio García, citando a Villafranca y Zúñiga (2010), indica que para determinar la significancia estadística respecto al efecto residual se debe demostrar que la razón $CM_{\text{efecto}}/CM_{\text{error}}$ (F-Ratio) es demasiado elevada para ser una F de Fisher con los grados de libertad correspondientes, relacionado al estadístico denominado P-value asociado. Entre menor sea este Valor-P a 0.05 más fuerte será la evidencia de un efecto significativo del efecto de los factores asociados.

2.8. Aspectos éticos

Los datos e información conseguida serán lealmente reflejados en la investigación sin alterar ni manipular los registros hallados. Además se constatan las fuentes utilizadas en esta investigación siendo estas debidamente referenciadas.

III. RESULTADOS

3.1. Etapa Nº 01: Recolección de la muestra de agua de río Rímac y análisis de turbidez inicial y otros parámetros

3.1.1. Descripción de la zona de muestreo

La zona de muestreo se ubica a la altura del km. 4.5 Autopista Ramiro Prialé, intersección con Av. Los Cisnes, distrito de Lurigancho, Lima.

Como se aprecia en la Figura 3, es una zona con las siguientes especies vegetales:

- Campanula patula (Campanilla morada)
- Schinus molle (Molle)
- Cordia lutea (Flor de overo)
- Equisetaceae (Cola de caballo)

Las especies animales son muy escasas, habiéndose apreciado durante la visita de campo únicamente dos especies de ave, ningún mamífero y tampoco peces.

Además de contaminación, compuesto básicamente por residuos sólidos como llantas de caucho, bolsas, objetos incinerados, etc.



Figura 3 Zona de muestreo: (A) Vista del río Rímac en dirección al distrito de Huachipa, (B) Vista del río Rímac hacia la Planta de Tratamiento La Atarjea y camino de acceso al costado del mismo, (C) Vegetación en la rivera y contaminación en el caudal, (D) Especies vegetales que crecen en la zona donde se realizó el muestreo.

Fuente: Toma fotográfica del río Rímac.

3.1.2. Materiales utilizados

Reactivos

- Sulfato de aluminio Tipo A
- Hidroxicloruro de aluminio PAC ZB-005

Materiales y equipos

- Turbidímetro portátil Oakton T-100
- Multímetro digital Sanwa CD800a
- Multiparámetro portátil HQ40d
- Balanza digital analítica Ohaus
- Equipo de test de jarras
- Fuente de corriente (0-5 A / 0-30 V)
- Agitador magnético analógico Scilogex
- 1 Pastilla magnética

- 1 Probeta 250mL
- 1 Vaso Beaker 500mL
- 2 Listones de madera de 20cm
- 1m Cable de cobre N°12
- 6 Cocodrilos eléctricos
- 3 Botella de polietileno 500mL
- 2 Placas de aluminio
- 1 Espátula metálica
- Cronómetro
- 6 Pipetas graduadas 25 mL
- 6 Propipetas
- Fiola de 1L



Figura 4 Medición de Conductividad, pH y temperatura de la muestra de agua.
Fuente: Elaboración propia

El pH medido en el laboratorio se mantienen en el rango de los registros de las características del río Rímac en este período del año (mes de julio).

Tabla 5 Características iniciales de la muestra

Parámetro	Valor	Unidad
Turbidez	26.25	NTU
pH	7.85	-
Temperatura	22.3	°C
Conductividad	408	µS/cm
Cantidad	25	Litros

Ubicación	Coordenadas UTM	12°01'12.7"S 76°56'57.1"W
-----------	-----------------	------------------------------

Fuente: Elaboración propia

3.2. Etapa Nº 02: Prueba de jarras usando sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$

El coagulante fue adquirido en la empresa Pflücker e Hijos S.A. ubicada en el distrito de Breña. Especificanete se trata el tipo de sulfato de aluminio llamado de grado potable.



Figura 5 Sulfato de aluminio adquirido para los experimentos

Fuente: Elaboración propia



Figura 6 Pesado del Sulfato de aluminio en las cantidades de 10, 20, 30, 40 y 50 mg.

Fuente: Elaboración propia

Para la evaluación se usaron cinco concentraciones de Sulfato de aluminio tipo A diferentes: 10mg/L, 20mg/L, 30mg/L, 40mg/L y 50mg/L con el objetivo de hallar la dosis más eficiente en la remoción de turbidez de las muestras de agua.

Tabla 6 Resultados del proceso de coagulación con Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$

Evaluación de la coagulación con Sulfato de Aluminio						
Condiciones:		Sedimentación:			Volumen de muestra:	
RPM: 100 Tiempo: 5 minutos		Tiempo de reposo: 30 min.			1 litro por prueba	
Resultados						
# de exp.	Concentración (mg/L)	Turbidez final (NTU)				Eficiencia (%)
		Valores			Prom.	
1	10	8.11	7.84	7.91	7.95	69.71
2	20	7.16	7.10	7.17	7.14	72.80
3	30	7.75	7.75	7.62	7.70	70.67
4	40	8.02	7.98	7.90	8.56	67.39
5	50	8.34	8.29	8.18	8.27	68.49

Fuente: Elaboración propia

Luego de realizar el tratamiento por coagulación con sulfato de aluminio se calculó la eficiencia para cada experimento (ver anexo 10).

3.3. Etapa N° 03: Prueba de jarras usando hidroxiclورو de aluminio $Al_2Cl(OH)_5$

El coagulante Hidroxiclورو de aluminio de tipo PAC ZB-005 fue adquirido en la empresa Procesos y Materiales E.I.R.L. ubicada en el distrito de San Juan de Lurigancho.



Figura 7 Hidroxicloruro de aluminio PAC ZB-005 adquirido para el experimento
Fuente: Elaboración propia



Figura 8 Pesado del Hidroxicloruro de aluminio en las cantidades de 10, 20, 30, 40 y 50 mg
Fuente: Elaboración propia

Para la evaluación se usaron cinco concentraciones diferentes: 10m/L, 20mg/L, 30mg/L, 40mg/L y 50mg/L con el objetivo de hallar la dosis más eficiente en la remoción de turbidez de las muestras de agua al igual que con el primer coagulante.

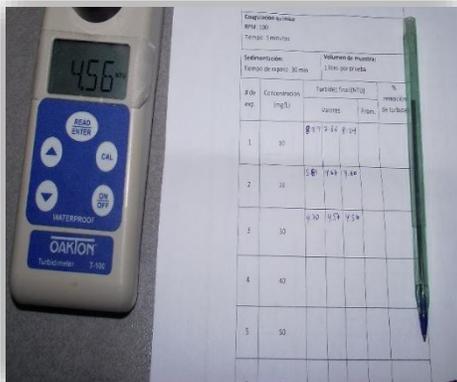


Figura 9 Medición de turbidez para Hidroxicloruro de Aluminio $Al_2Cl(OH)_5$
Fuente: Elaboración propia



Figura 10 Equipo de test de jarras
Fuente: Elaboración propia

Tabla 7 Resultados del proceso de coagulación con Hidroxicloruro de Aluminio $Al_2Cl(OH)_5$

Evaluación de la coagulación con Hidroxicloruro de Aluminio						
Condiciones:		Sedimentación:		Volumen de muestra:		
RPM: 100 Tiempo: 5 minutos		Tiempo de reposo: 30 min.		1 litro por prueba		
Resultados						
# de exp.	Concentración (mg/L)	Turbidez final (NTU)				Eficiencia (%)
		Valores			Prom.	
1	10	6.57	6.00	6.21	6.26	76.15
2	20	5.09	4.48	4.56	4.71	82.06
3	30	4.69	4.44	4.56	4.56	82.63
4	40	4.16	3.94	3.84	3.98	83.84
5	50	4.58	4.46	4.36	4.47	82.97

Fuente: Elaboración propia

Luego de realizar el tratamiento por coagulación con hidroxicluro de aluminio se calculó la eficiencia para cada experimento (ver anexo 11).

3.4. Etapa N° 04: Proceso de electrocoagulación con placas de aluminio

Fueron usadas seis placas de aluminio (dos para cada una de las tres pruebas), las cuales tuvieron un área 40cm^2 ($10\text{cm} \times 4\text{cm}$), de los cuales 24cm^2 ($6\text{cm.} \times 4\text{cm.}$) entraron en contacto con el agua tratada.

Se usó dos pequeños listones de madera con ranuras separas por un centímetro para encajar ambas placas y queden suspendidas de manera fija a esa distancia en el vaso beaker de $\frac{1}{2}$ litro. Este se colocó sobre el agitador magnético con una pastilla electromagnética dentro para ayudar a la mezcla. Este fue graduado para girar a 100 RPM aproximadamente durante 5 minutos.

En este caso, hubo tres experimentos. Básicamente se aplicó tres diferentes densidades de corriente (3.08 mA/m^2 , 6.50 mA/m^2 y 9.86 mA/m^2), correspondientes a las intensidades de corriente 0.74mA , 1.56mA y 2.37mA respectivamente

La fuente de corriente tiene una capacidad de generación de corriente de hasta 30 V, por lo cual se hizo tres experimentos y la máxima eficiencia se registró con el máximo voltaje.

Para guardar la uniformidad de la comparación, se dejó sedimentar después del experimento durante 30 min. (al igual que con el uso de los coagulantes).

Las placas de aluminio son material reciclado de autopartes desechada en un taller mecánico con una pureza del 96%.

Además, cabe resaltar que este tiempo es el óptimo hallado tras unas pruebas preliminares.

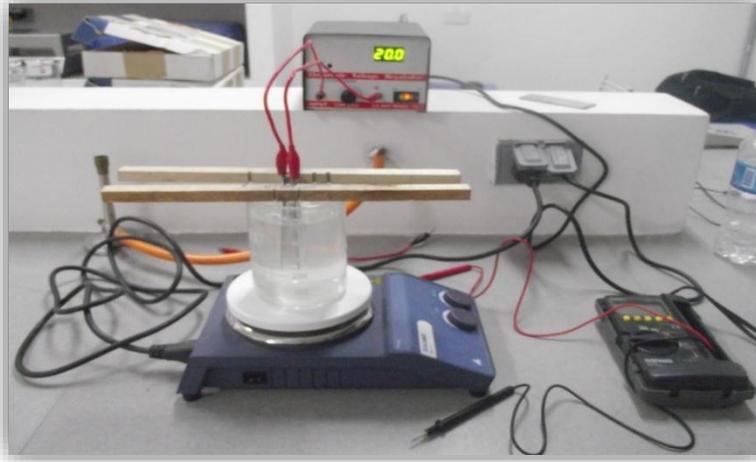


Figura 11 Experimento de electrocoagulación con placas de aluminio
Fuente: Elaboración propia

En el transcurso del experimento se formaron compuestos que desestabilizaron las partículas suspendidas con lo cual estas floccularon; igualmente se desplegó la disolución anódica con lo cual se liberaron elementos que reaccionaron con los contaminantes causando la precipitación.

En las láminas de aluminio se formaron burbujas que colisionan y aglutinan a los flóculos, llevando así a estos hacia la superficie del agua por lo cual se creó espuma en la superficie; otras partículas sedimentaron formando un lodo en el fondo del agua.



Figura 12 Placas de aluminio reciclado
Fuente: Elaboración propia



Figura 13 Vaso Beaker de 500ml luego de haber aplicado la electrocoagulación con ánodos de aluminio
Fuente: Elaboración propia

Se extrajo la muestra de agua tratada suficiente para analizar en el turbidímetro con ayuda de una pipeta de 25mL y una propipeta a una distancia de la base del vaso Beaker de 500ml de 2 cm aproximadamente. Esto para cada una de los tres experimentos realizados.

Tabla 8 Resultados del proceso electrocoagulación con placas de aluminio

Evaluación de la electrocoagulación con placas de aluminio												
Condiciones:			Sedimentación:		Volumen de muestra:			Electrodos (ánodo y cátodo):				
RPM: 100 Tiempo: 5			30 min.		500mL por prueba			Material: Chatarra de aluminio (96% de pureza)				
Resultados												
# de exp.	Voltaje aplicado (V)	Corriente (mA)	Densidad de corriente (mA/m ²)	Ánodo de aluminio				Turbidez final (NTU)				Eficiencia (%)
				Peso (mg)		Área geométrica efectiva (m ²)	Separación (m)	Valores			Prom.	
				Inicial	Final							
1	10	0.74	3.08	11.4301	11.4291	0.24	0.01	4.49	4.27	4.86	4.54	82.70
2	20	1.56	6.50	11.7427	11.7366	0.24	0.01	3.50	3.78	3.88	3.72	85.83
3	30	2.37	9.86	11.5059	11.4858	0.24	0.01	3.27	3.53	3.43	3.41	87.01

Fuente: Elaboración propia

Luego de realizar el tratamiento de electrocoagulación con placas de aluminio se calculó la eficiencia para cada experimento (ver anexo 12).

Tabla 9 Resumen de las eficiencias de los resultados experimentales

Tratamiento	Dosificación (mg/L)				
	10	20	30	40	50
Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$	69.71	72.80	70.67	67.39	68.49
Hidroxiclорuro de aluminio $Al_2Cl(OH)_5$	76.15	82.06	82.63	83.84	82.97
Tratamiento	Densidad de corriente (mA/m ²)				
	3.08	6.50	8.96		
Electrocoagulación con placas de aluminio	82.7	85.83	87.01		

Fuente: Elaboración propia

3.5. Etapa N° 05 Cálculo del aluminio residual

3.5.1. Cálculo de la masa de aluminio teórico

Para el experimento más eficiente dosificando Sulfato de aluminio (Ver anexo 13)

$$m_{Al-disuelto(1)} = 3.158mg$$

Para el experimento más eficiente dosificando Hidroxiclорuro de aluminio (Ver anexo 14)

$$m_{Al-disuelto(2)} = 12.385mg$$

- Para el experimento más eficiente aplicando electrocoagulación con placas de aluminio. (ver anexo 15)

$$m_{Al-disuelto(3)} = 0.276mg$$

3.5.2. Cálculo de la masa de aluminio experimental tras el método de electrocoagulación

- Para el experimento más eficiente aplicando electrocoagulación con placas de aluminio (ver Anexo 16).

$$m_{Al\ experimental(EC)} = 0.021\text{mg}$$

3.5.3. Análisis de la concentración de aluminio soluble de las muestras tratadas con mayor eficiencia

- Para el experimento más eficiente dosificando Sulfato de aluminio (Ver Anexo 17)

$$\text{Concentración}_{Al\ soluble(1)} = 0.092\text{mg/L}$$

- Para el experimento más eficiente dosificando Hidroxicloruro de aluminio (Ver Anexo 17)

$$\text{Concentración}_{Al\ soluble(2)} = 0.098\text{mg/L}$$

- Para el experimento más eficiente aplicando electrocoagulación con placas de aluminio. (Ver Anexo 17)

$$\text{Concentración}_{Al\ soluble(2)} = 1.438\text{mg/L}$$

3.6. Interpretación de los resultados

3.6.1. De la hipótesis general

Ho = El promedio de las eficiencias de cada uno de los tres métodos analizados no refieren una diferencia significativa en la remoción de turbidez del agua del río Rímac, con una confiabilidad de 95%.

Ho = El promedio de las eficiencias de al menos uno de los tres métodos analizados refieren una diferencia significativa en la remoción de turbidez del agua del río Rímac respecto a la(s) otra(s), con una confiabilidad de 95%.

Con el objetivo de cumplir con los supuestos fundamentales (normalidad, homocedasticidad, independencia de las observaciones y debe de ser medido a nivel de intervalo por lo menos) se tomaron los tres resultados de cada experimento que marcan una tendencia y, por supuesto, que incluyen a la máxima eficiencia. En este caso, para los métodos químicos fueron escogidas las eficiencias con las dosificaciones de 20, 30 y 40 mg/L.

Por lo tanto, para el análisis estadístico fueron tomados los datos de la Tabla 10.

Tabla 10 Datos para aplicar el Análisis de varianzas (ANOVA)

Tratamiento	Dosificación (mg/L)		
	20	30	40
Sulfato de aluminio	72.80	70.67	67.39
Hidroxiclорuro de aluminio	82.06	82.63	83.84
Tratamiento	Densidad de corriente (mA/m ²)		
	3.08	6.50	8.96
Electrocoagulación con ánodos de aluminio	82.7	85.83	87.01

Fuente: Elaboración propia

3.6.1.1. Prueba de Shapiro Wilk de normalidad

Ya que únicamente se trabajó con tres datos de cada técnica se aplica la prueba de normalidad Shapiro Wilk; por lo tanto, con un nivel de confianza de 95% se realizó el análisis de los datos en el programa SPSS con las siguientes hipótesis:

Ho: La variable eficiencia en la remoción de turbidez de agua del río Rímac tiene una distribución Normal.

Ha: La variable eficiencia en la remoción de turbidez de agua del río Rímac es distinta a la distribución Normal.

Tabla 11 Prueba de normalidad

Técnicas	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Coagulación con sulfato de aluminio	,985	3	,767
Coagulación con hidroxiclورو de aluminio	,959	3	,609
Electrocoagulación con placas de aluminio	,936	3	,512

Tras el análisis es el programa SPSS aceptamos la hipótesis nula ya que el p-valor es mayor a 0.05 en cada uno de los métodos.

Mediante la prueba de Normalidad Shapiro Wilk, se aceptó la hipótesis nula y comprobó la normalidad de los resultados de cada una de los métodos usados para remover turbidez en agua del río Rímac.

3.6.1.2. Prueba de Levene de Homocedasticidad

Ho = Las varianzas de los tres métodos comparados en la remoción de turbidez del agua del río Rímac son homogéneas, con una confiabilidad de 95%.

Ha = Las varianzas de los tres métodos comparados en la remoción de turbidez del agua del río Rímac no son homogéneas, con una confiabilidad de 95%.

Tabla 12 Prueba de Homocedasticidad

		Prueba de Levene de calidad de varianzas	
		F	Sig.
VAR0000	Se asumen varianzas iguales	2.410	.196
	No se asumen varianzas iguales		

Por lo tanto, p-valor de 0.196 > 0.05; por lo cual se aceptó la hipótesis nula, comprobando así la homogeneidad de las varianzas de los métodos estudiados.

3.6.1.3. Análisis de varianzas (ANOVA)

Tabla 13 Análisis de varianzas (ANOVA)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	P-valor
Factor	384.941	2	192.471	43.696	.000
Error	26.429	6	4.405		
Total	411.370	8			

Fuente: Elaborado por el autor en el programa IBM SPSS.

A continuación, considerando un margen de error de 5% ($\alpha = 0.05$), se buscó en la tabla F de Fisher el valor correspondiente.

Se obtuvo que $F_{2,6}(5\%) = 5.143 < 43.696$ (Ver anexo 9), es decir es mucho menor que el F de ratio obtenido mediante el análisis ANOVA, por lo cual se rechazó la Hipótesis nula (H_0); y, con un nivel de confianza de 95%, se aceptó la Hipótesis alterna (H_a), la que señala que el promedio de las eficiencias de al menos uno de los tres métodos analizados refiere una diferencia significativa en la remoción de turbidez del agua del río Rímac respecto a la(s) otra(s).

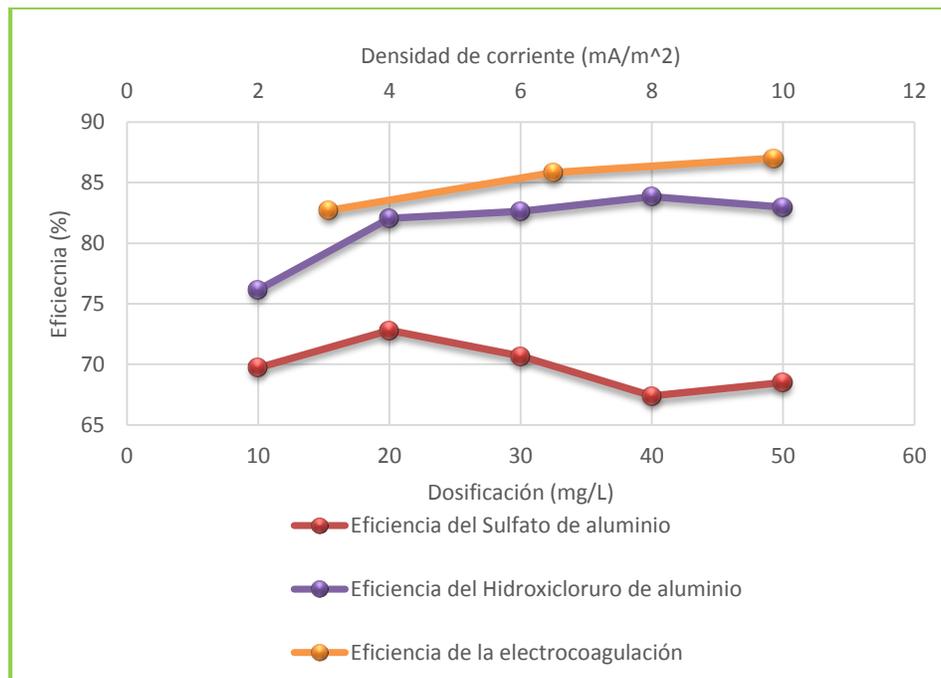


Figura 14 Comparación de los resultados de los tres experimentos

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los tres distintos experimentos nos muestran una clara diferencia en la eficiencia de cada una respecto a las otras, siendo, como ya se ha demostrado en experiencias anteriores, el hidroxiclорuro de aluminio más eficiencia que el sulfato de aluminio; sin embargo, menos eficiente que la electrocoagulación con placas de aluminio.

Cabe recalcar que las condiciones de pH, alcalinidad, conductividad, temperatura y turbidez iniciales han sido las mismas para todos los experimentos; y todas han estado en los rangos adecuados para la realización de cada una de ellas. Sin embargo, es fundamental reconocer que, si bien es cierto los rangos son adecuados, un experimento puede estar condicionado al pH, alcalinidad, temperatura iniciales.

3.6.1.4. De la hipótesis específicas

✓ **Hipótesis específica 1:**

a) Respecto a la dosificación con sulfato de aluminio

Ho = No existe correlación entre la dosificación de sulfato de aluminio y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016.

Ha = Sí existe correlación entre la dosificación de sulfato de aluminio y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016.

Tabla 14 Coeficiente de correlación de Pearson respecto al tratamiento con sulfato de aluminio

Correlaciones		
	VAR00001	VAR00002
Correlación de Pearson	1	-,597
Sig. (bilateral)		,288
N	5	5
Correlación de Pearson	-,597	1
Sig. (bilateral)	,288	
N	5	5

Por lo tanto, p-valor de $0.288 > 0.05$; por lo cual se aceptó la hipótesis nula, acepta de esta manera la hipótesis nula y, con un nivel de confianza de 95 %, se acepta que no existe correlación entre la dosificación de sulfato de aluminio y la eficiencia en la remoción de turbidez de agua del río Rímac, 2016.

Tabla 15 Análisis descriptivo de la dosificación de sulfato de aluminio

		Estadístico	Error estándar	
Dosificación con sulfato de aluminio	Media	69,8120	,92974	
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	67,2306	
		Límite superior	72,3934	
	Media recortada al 5%	69,7806		
	Mediana	69,7100		
	Varianza	4,322		
	Desviación estándar	2,07897		
	Mínimo	67,39		
	Máximo	72,80		
	Rango	5,41		
	Rango intercuartil	3,80		
	Asimetría	,500	,913	
	Curtosis	-,123	2,000	

La media de eficiencia en la remoción de turbidez de agua del río Rímac usando sulfato de aluminio es de 69.81 %, con eficiencias máximo y mínimo de 72.80 % y 67.39 % respectivamente.

De esta forma, se tiene la siguiente figura:

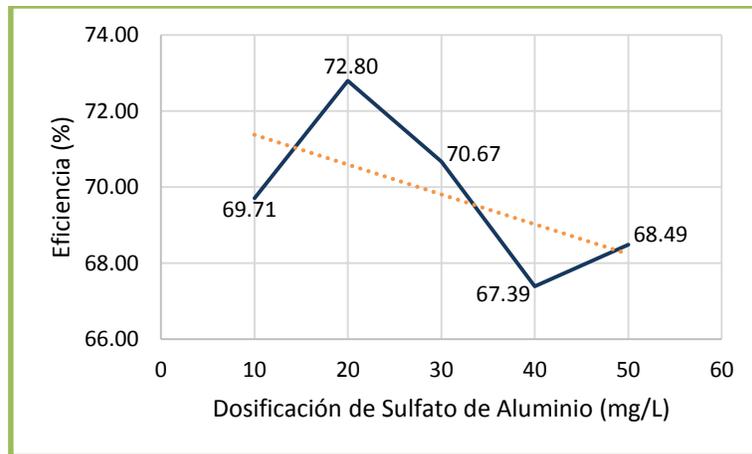


Figura 15 Eficiencia de remoción de turbidez respecto a la concentración del Sulfato de Aluminio $Al_2(SO_4)_3$
Fuente: Elaboración propia

La relación de la dosificación de Sulfato de aluminio es inversamente proporcional en el rango de 20 a 40 mg/L; y precisamente la máxima eficiencia se da usando 20 mg/L con una eficiencia de 72.80 % de remoción de turbidez. Por otro lado, en los espacios de 10 a 20 mg/L y 40 a 50 mg/L la tendencia es directamente proporcional.

b) Respecto a la dosificación con hidroxiclورو de aluminio

Ho = No existe correlación entre la dosificación de hidroxiclورو de aluminio y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016.

Ha = Sí existe correlación entre la dosificación de hidroxiclورو de aluminio y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016.

Tabla 16 Coeficiente de correlación de Pearson respecto al tratamiento con hidroxiclورو de aluminio

Correlaciones		
	VAR00006	VAR00007
Correlación de Pearson	1	,793
Sig. (bilateral)		,110
N	5	5
Correlación de Pearson	,793	1
Sig. (bilateral)	,110	
N	5	5

Por lo tanto, p-valor de $0.110 > 0.05$; por lo cual se aceptó la hipótesis nula, acepta de esta manera la hipótesis nula y, con un nivel de confianza de 95 %, se acepta que no existe correlación entre la dosificación de hidroxiclورو de aluminio y la eficiencia en la remoción de turbidez de agua del río Rímac, 2016.

Tabla 17 Análisis descriptivo de la dosificación de hidroxiclورو de aluminio

		Estadístico	Error estándar	
Dosificación con hidroxiclورو de aluminio	Media	81,5300	1,37559	
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	77,7107	
		Límite superior	85,3493	
	Media recortada al 5%	81,7006		
	Mediana	82,6300		
	Varianza	9,461		
	Desviación estándar	3,07591		
	Mínimo	76,15		
	Máximo	83,84		
	Rango	7,69		
	Rango intercuartil	4,30		
	Asimetría	-1,989	,913	
	Curtosis	4,178	2,000	

La media de eficiencia en la remoción de turbidez de agua del río Rímac usando sulfato de aluminio es de 81.53 %, con eficiencias máximo y mínimo de 83.84 % y 76.15 % respectivamente.

De esta forma, se tiene la siguiente figura:

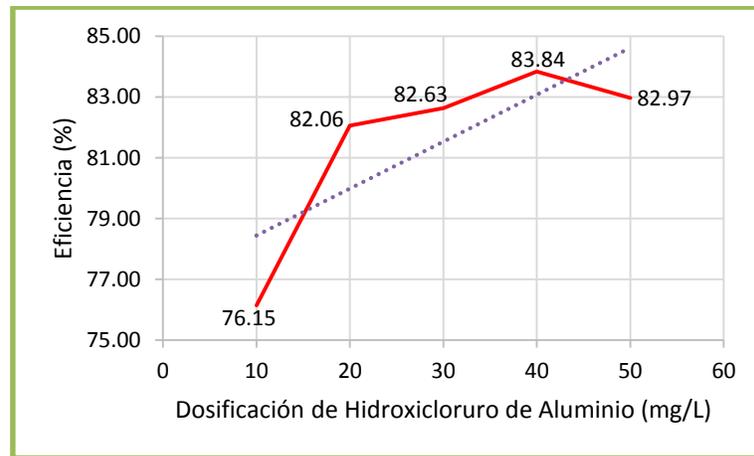


Figura 16 Eficiencia de remoción de turbidez respecto a la concentración de Hidroxicloruro de aluminio $Al_2Cl(OH)_5$
Fuente: Elaboración propia

La relación de la dosificación de Hidroxicloruro de aluminio es directamente proporcional en el rango de 10 a 40 mg/L; y precisamente la máxima eficiencia se da usando 40 mg/L con una eficiencia de 83.84 % de remoción de turbidez. Por otro lado, en el espacio de 40 a 50 mg/L la tendencia es inversamente proporcional.

✓ **Hipótesis específica 2:**

Ho = No existe correlación entre la densidad de corriente aplicada en la técnica de electrocoagulación con placas de aluminio y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016.

Ha = Sí existe correlación entre la densidad de corriente aplicada en la técnica de electrocoagulación con placas de aluminio y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016.

Tabla 18 Coeficiente de correlación de Pearson respecto al tratamiento con electrocoagulación con placas de aluminio.

Correlaciones		
	VAR00009	VAR00010
Correlación de Pearson	1	,987
Sig. (bilateral)		,103
N	3	3
Correlación de Pearson	,987	1
Sig. (bilateral)	,103	
N	3	3

Por lo tanto, p-valor de $0.110 > 0.05$; por lo cual se aceptó la hipótesis nula, acepta de esta manera la hipótesis nula y, con un nivel de confianza de 95 %, se acepta que no existe correlación entre la densidad de corriente aplicada en la electrocoagulación con placas de aluminio y la eficiencia en la remoción de turbidez de agua del río Rímac, 2016.

Tabla 19 Análisis descriptivo de la electrocoagulación con ánodos de aluminio

		Estadístico	Error estándar	
Electrocoagulación con placas de aluminio	Media	85,1800	1,28594	
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	79,6471	
		Límite superior	90,7129	
	Media recortada al 5%	.		
	Mediana	85,8300		
	Varianza	4,961		
	Desviación estándar	2,22731		
	Mínimo	82,70		
	Máximo	87,01		
	Rango	4,31		
	Rango intercuartil	.		
	Asimetría	-1,201	1,225	
	Curtosis	.	.	

La media de eficiencia en la remoción de turbidez de agua del río Rímac usando sulfato de aluminio es de 85.18 %, con eficiencias máximo y mínimo de 87.01 % y 82.70 % respectivamente.

De esta forma, se tiene la siguiente figura:

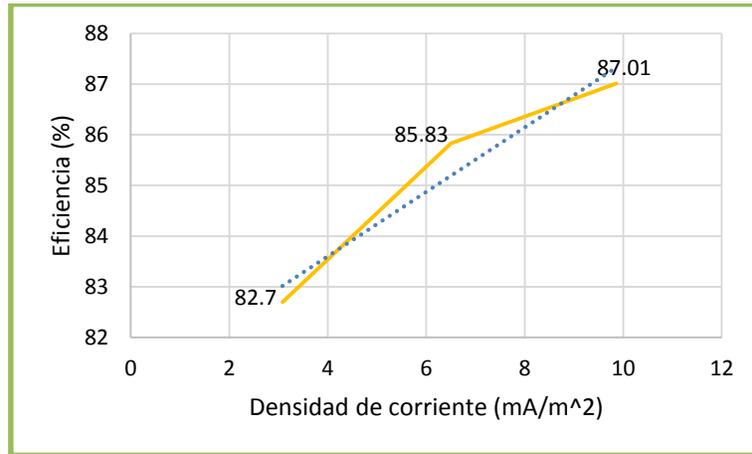


Figura 17 Eficiencia de remoción de turbidez respecto a la densidad de corriente aplicada mediante electrocoagulación con placas de aluminio
Fuente: Elaboración propia

La relación de la eficiencia del experimento de electrocoagulación es directamente proporcional a la densidad de corriente aplicada como muestra claramente la Figura 18. Además, es con una densidad de corriente de 9.86 mA/m² donde se ha dado la máxima eficiencia, siendo esta 87.01 %. Cabe resaltar que la tendencia directamente proporcional entre ambas medidas se mantiene, por lo que es probable que con un voltaje mayor se haya podido lograr una eficiencia aun mayor. La fuente de poder utilizada es de rango de voltaje de 0 - 30V. Sin embargo, en próximas experiencias se podría llegar a eficiencias mayores con una fuente de mayor potencia.

✓ **Hipótesis específica 3:**

Ho = La concentración de aluminio residual en el agua es menor usando la coagulación química en lugar de electrocoagulación en la remoción de turbidez de agua del río Rímac, 2016.

Ha = La concentración de aluminio residual en el agua es mayor usando la coagulación química en lugar de electrocoagulación en la remoción de turbidez de agua del río Rímac, 2016.

Tabla 20 Resumen de los resultados de aluminio residual

# de exp.	Muestra	Masa de aluminio teórico (mg)	Masa de aluminio experimental (mg)	Concentración de aluminio soluble (mg/L)
1	Muestra más eficiente usando Sulfato de Aluminio	3.158	N.C.	0.092
2	Muestra más eficiente usando Hidroxicloruro de Aluminio	12.385	N.C.	0.098
3	Muestra más eficiente aplicando electrocoagulación	0.276	0.021	1.438

*N.C. No calculado

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de concentración de aluminio soluble resultaron muy diferentes, siendo las muestras tratadas mediante coagulación química las de mucho menor concentración (0.092mg/L con sulfato de aluminio y 0.098 con hidroxocloruro de aluminio), respecto a la tratada mediante electrocoagulación (1.438mg/L), representado esta 15.6 veces la concentración del Sulfato de aluminio y 14.7 veces la del policloruro de aluminio.

Respecto a la masa de aluminio teórico tenemos una gran diferencia entre los tres métodos, sobre todo con la aplicación de electrocoagulación, únicamente contiene 0.276g; el siguiente en contenido es la muestra tratada con sulfato de aluminio con 3.158g; y la muestra con mayor contenido es la tratada con el Hidroxocloruro de aluminio (11.147g), representando 3.5 veces más que la muestra tratada con sulfato de aluminio y 40.4 veces más que la tratada mediante electrocoagulación.

IV. DISCUSIÓN

- a) Respecto a lo hallado por Romero (2007), se concuerda con la eficiencia mayor del policloruro de aluminio frente al coagulante convencional (Sulfato de aluminio). Entre las máximas eficiencias de los dos métodos hay una diferencia, siendo la diferencia de medias de 11.72 % y de las eficiencias más altas de 11.04 %.

Sin embargo, se discrepa en la eficiencia del contenido de aluminio residual o disuelto. Romero señala que la diferencia de disminución del aluminio residual ha favorecido al policloruro en un 20 %; y respecto a esto este estudio ha obtenido resultados diferentes, ya que los resultados obtenidos, tanto la masa de aluminio teórico como la concentración de aluminio disuelto, han favorecido al sulfato de aluminio.

Sin embargo, es fundamental recordar que para alcanzar la máxima eficiencia de remoción de turbidez de agua del río Rímac con hidroxiclورو de aluminio se usó 11.04mg más de dosificación. Y, además, la diferencia de concentración de aluminio soluble determinado por absorción atómica es de apenas 0.006 mg/L; por lo cual, es muy probable que si se usan las mismas cantidades para ambos coagulantes químicos, la diferencia en este parámetro favorezca al policloruro de aluminio, y como consecuencia, reafirmando la conclusión de Romero. Por último, cabe recalcar con respecto a la masa de aluminio residual, el uso del coagulante convencional tiene mucha más ventaja, por lo que es necesario realizar más experimentos de laboratorio para ofrecer resultados más certeros.

- b) Respecto a lo concluido por García (2010) en su investigación a escala piloto, se tiene que, a pesar que la distancia entre las placas del experimentos de electrocoagulación de este estudio que ha sido de 1 cm., diferente a la que el señala como más eficiente (0.4 cm.), se obtuvo muy buenos resultados como ya se ha señalado. Además, el agua bruta tratada (caudal del río Rímac a la altura del km 4.5 de la Autopista Ramiro Prialé) ofrece condiciones adecuadas para aplicar este método según otras biografías observadas. La densidad de corriente también ha sido diferente a la que señala el autor, la conductividad es parecida. Ambos parámetros son sumamente importantes en la aplicación de esta técnica por lo que para hacer una comparación más justa es necesario también compatibilizarlos.

c) Se reafirma lo señalado ahora por Barboza, que a mayor densidad de corriente mayor en la remoción de turbidez, llegando a remover incluso 94,65 % de turbidez en 25 minutos aplicando electrocoagulación. Se recalca que en el presente estudio solo se ha experimentado con un tiempo estándar de 30 minutos y la máxima eficiencia alcanzada fue de 8,41. Si bien es cierto no se puede discutir lo que la autora afirma señalando que a más tiempo de aplicación mejoran los resultados, sí se puede comparar su tiempo de 25 minutos con el de este estudio de 30 minutos, y lo resaltante es que aun si logró alcanzar un nivel de eficiencia más alto, aclarando además que el pH de las muestras de ambos estudios no difiere significativamente, a pesar de que en este caso no se ha estabilizado el mismo. Como dato adicional las áreas efectivas de las placas utilizadas fueron de 8 cm^2 en el experimento de Barboza y $24,8 \text{ cm}^2$ es este. Como observación en el experimento desarrollado, se observó la generación de precipitados y, sobre todo, material flotante; pero, como ya se ha señalado, no se le aplicó ningún tipo de tratamiento posterior a esta agua. Se aclara esto ya que, según señala Barboza, además la electrocoagulación facilita una floculación posterior.

Respecto a lo último señalado, Barboza señala que después de culminado el experimento únicamente un 1.27 % de los iones Al^{+3} tanto sedimentados como flotados quedan en el agua tratada. Esto significa que los datos obtenidos de concentración de aluminio disuelto (Ver anexo 17) son relativos a un tratamiento posterior que reduzca significativamente el 1.438 mg/L, lo que significa que, si aplicamos esta alentadora reducción, el experimento podría haber arrojado un valor cercano a una concentración de 0.018 mg/L, resultando una cifra sumamente alentadora respecto al uso de coagulantes químicos.

d) Respecto a lo concluido por Juan Flores en su artículo, señalando las ventajas del hidroxloruro de aluminio sobre el sulfato de aluminio, reafirmamos ello; y más aún, la mayor eficiencia de la electrocoagulación sobre ambos métodos en la remoción de turbidez. Sin embargo, respecto al contenido aluminio residual no ha sido más alentador, ya que tanto en aluminio teórico como en aluminio disuelto analizado por absorción atómica, el sulfato de aluminio ha sido más eficiente. Se obtuvo 3.158g respecto a 12.358 de masa de aluminio teórico y 0.092 mg/L respecto a 0.098 mg/L, ambos favoreciendo al sulfato sobre la sal.

Como ya se señaló, las condiciones del experimento realizado en este estudio fueron estándar, sin adecuar ningún escenario; es decir, no se reguló el pH, conductividad, alcalinidad, etc. Es probable que gracias a ello, como señalan otros autores, se logren

cifras más eficientes respecto al aluminio residual luego de la aplicación del Hidroxicloruro de aluminio.

V. CONCLUSIONES

Respecto a la eficiencia en remoción de turbidez, la electrocoagulación ha sido el mejor método; incluso la menor densidad de corriente tuvo casi la misma eficiencia que la máxima eficiencia del Hidroxicloruro de aluminio y mucho más que la del coagulante convencional. Así mismo, en las muestras tratadas por coagulación química se halló una eficiencia máxima respecto a una dosificación, luego los niveles de remoción de turbidez empezaron a disminuir; sin embargo, no se halló tal resultado con la electrocoagulación. Es necesario realizar más pruebas y en diferentes condiciones (por ejemplo otros niveles de pH, conductividad y alcalinidad) para saber con qué condiciones se podría un mejor resultado, como señalan otros resultados.

Comparando los coagulantes químicos, el hidroxiclóruo de aluminio ha demostrado ser una opción más viable respecto al sulfato de aluminio. Únicamente en la determinación del aluminio teórico ha significado una ventaja este último, resultando 3.158g en comparación con los 12.385g del policloruro de aluminio.

El coeficiente de Pearson señala que no existe correlación tanto en el uso del sulfato de aluminio como del hidroxiclóruo de aluminio en la eficiencia de remoción de turbidez de agua del río Rímac. Esto debido a que no necesariamente una mayor cantidad de dosificación significa una mayor eficiencia, por lo cual es necesario usar la más eficiente.

Tras los resultados y discusión, se reafirman las bondades de la electrocoagulación con ánodos de aluminio.

Varios autores que han estudiado en este método en diferentes experiencias señalan la relación entre la densidad de corriente y la eficiencia de remoción de turbidez de agua. Sin embargo, el presente trabajo en base al coeficiente de correlación de Pearson rechaza una correlación entre estas variables respecto a la electrocoagulación y la eficiencia en la remoción de turbidez con un nivel de confianza del 95 %, esto probablemente a que solo hubo tres datos para analizar; sin embargo, como se puede observar en la figura 18, sí hay una tendencia apreciable.

Respecto al contenido de aluminio disuelto, por el contrario ha sido mucho mayor la muestra tratada con electrocoagulación que en los tratados con los coagulantes químicos. Ello implica consecuencias delicadas tanto técnicas como económicas.

Por lo cual, según los resultados de los análisis, el uso de la electrocoagulación representa grandes ventajas respecto a la coagulación química en el tratamiento de agua potable; sin embargo, es necesario un desarrollo técnico relativamente sencilla como regulación de pH, de alcalinidad, de conductividad; además de hallar la distancia adecuada entre las placas con lo cual generar menor cantidad de aluminio. Por otro lado, el tratamiento los lodos generados, tanto precipitados como flotados también implica una etapa esencial respecto al contenido de aluminio residual tras el tratamiento.

Es necesario contrastar con otro aspecto sumamente importante que es la economía ya que, como señalan otros autores, este tipo de tecnologías tienen ventajas competitivas respecto a otros métodos. Así que, si comparamos este aspecto, es necesario estudiar cada detalle necesario para desarrollar los métodos con los mejores resultados y luego compararlos.

VI. RECOMENDACIONES

Realizar más pruebas para hallar diferentes resultados bajo otras condiciones u otros escenarios con lo cual se obtenga una base experimental para estudios y aplicaciones del método futuras. Además calcular las consecuencias económicas del uso de cada método para contrastar con cada ventaja y desventaja de los métodos de coagulación, esto incluyendo los efectos sobre la salud y efectos sociales que puedan devenir de enfermedades causadas por el contenido de aluminio residual.

Empezar a dejar de lado gradualmente el uso del sulfato de aluminio como coagulante de agua potable debido su ineficiencia y contenido de aluminio dejado en el agua tratada. Se podría empezar combinar técnicas o potenciarlas con tecnologías alternativas tanto químicas como mecánicas, físicas, etc; todo ello con el fin de usar menos este coagulante típico y empezar a reemplazarlo.

Empezar a implementar la tecnología de electrocoagulación en el tratamiento de agua potable en pequeñas plantas piloto.

Se recomienda evaluar posibles ventajas económicas y operativas de esta tecnología respecto a otras para incentivar su investigación, difusión y tentativa puesta en marcha.

Como señala Restrepo [Et al.], la electrocoagulación ya ha sido probada en la potabilización de aguas. Es fundamental recalcar que el paso de la corriente eléctrica a través del agua tratada funciona como desinfectante, y en ese orden, elimina por encima del 99% los microorganismos que se encuentran en el agua. (2006)

Por otro lado, como en otros países, es fundamental remover, si es posible, la totalidad de contenido de aluminio en el agua. Como hemos visto en los resultados obtenidos, los niveles de aluminio hallado en el agua son considerables, a pesar de haber hallado las dosificaciones más eficientes. Incluso, cabe recalcar que en este estudio la electrocoagulación desprendió más aluminio disuelto respecto al tratamiento químico; pero queda claro que con un tratamiento posterior este nivel se reducirá considerablemente.

Por ello, se recomienda calcular el contenido de aluminio del lodo acumulado por flotación en la superficie del agua y del sedimento en el fondo, los cuales, significan un elevado contenido de tal elemento, por lo cual, este se vería reducido. En programas piloto

implementados se logran extraer el material señalado, lo cual implican costos no mencionados en este trabajo.

VII. REFERENCIAS

AGUILAR, Edwar. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua (Magíster en Ciencias Ambientales con Mención en Control de la Contaminación y Ordenamiento Ambiental). Lima, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2015. 90pp.

ARBOLEDA, Jorge. Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua [en línea]. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 1973 [05 de abril de 2015]

Disponible en:

<<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/002320/002320.htm>>

BARBOZA, Inés. Reducción de la carga de contaminantes de las aguas residuales de la Planta de Tratamiento de Totorá–Ayacucho empleando la técnica de electrocoagulación [en línea]. Lima, Perú: Universidad Nacional de ingeniería, 2011 [22 de abril de 2015].

Disponible en:

<http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/338/1/barboza_pg.pdf>

COGOLLO Flores, Juan Miguel. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: Caso del hidroxiclورو de aluminio. Dyna Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Sistema de Información Científica, vol. 78, núm. 165 (2011): 18-27.

DE VARGAS, Lidia. Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida [en línea]. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2004 [02 de abril de 2015]

Disponible en:

<<http://bibliotecavirtual.minam.gob.pe/biam/bitstream/id/5676/BIV00014.pdf>>

ESCOBAR, Juan. Tratamiento primario avanzado (TPA) de aguas residuales –diagramas de coagulación – floculación y variables operativas [en línea]. Cali, Colombia: Colciencias - U. del Valle – EMCALI, 2005 [07 de abril de 2015] Diponible en:

<<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/puertorico29/escobar.pdf>>

GAMERO Quijano, Daniel Alonso. Remoción de microorganismos patógenos de las aguas mediante Electrocoagulación empleando ánodos de Aluminio (Licenciado en Química). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, 2011. 112pp.

GARCÍA Espinoza, José Edy. Remoción de Arsénico en agua por electrocoagulación (Maestro en Ingeniería Ambiental – Agua). Morelos: Universidad Nacional Autónoma de México, 2010. 166pp.

LABARCES, Eulfo. Evaluación del proceso coagulación-floculación a partir de sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ preparado utilizando envases reciclados de metal y aluminio modificado en la potabilización de aguas [en línea]. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2007 [17 de abril de 2015]. Disponible en:
<<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7053/2/124931.pdf>>

MATIZ Correa, Leonardo Fabio. Optimización del proceso de coagulación en la Planta de Tratamiento de Agua Potable el Dorado de Bogotá (Ingeniero Civil y Ambiental). Bogotá: Universidad de Los Andes, 2008. 52pp.

MENDOZA, Iván [et. al]. Eficiencia de *Hylocereus lemairei* como coagulante - floculante en aguas para consumo humano [en línea]. Venezuela: Impacto científico, Revista arbitrada venezolana, junio, 2008 [17 de abril de 2015]. Vol.3 N° 1, pp. 53-69.
ISSN: 1836-5042.

Disponible en:

<http://www.revistavirtualpro.com/biblioteca/eficiencia-de-hylocereus-lemairei-como-coagulante-floculante-en-aguas-para-consumo-humano>

RESTREPO Osorno, Hernán Alonso. Evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de tratamiento de agua potable (Ingeniero de Minas). Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2009. 112pp.

RESTREPO, Ana. La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas [en línea]. Venezuela: Revista Lasallista de Investigación, junio, 2006 [12 de junio de 2015]. Vol. 1 N° 2, pp58-71.

Disponible en:

http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/RevistaLimpia/vol1n2/pl_v1n2_5877_electrocoagulation.pdf

ROMERO, Carlos [Et al.]. Síntesis de un polímero inorgánico de aluminio y su uso para clarificación de agua [en línea]. Valencia, Venezuela. Universidad de Carabobo. 2007 [22 de abril de 2015].

Disponible en:

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70711260003>

SAMPIERI, Roberto [Et al.]. Metodología de la investigación. Cuarta edición. México, 2006. 850 pp.

ISBN: 970-10-5753-8

ANEXOS

Anexo 1 Formato de características iniciales de la muestra

Parámetro	Unidad	Valor
Turbidez	NTU	
pH	-	
Temperatura	°C	
Conductividad	μS/cm	
Cantidad	Litros	

Ubicación	Coordenadas UTM	
-----------	-----------------	--

Anexo 2 Formato de evaluación para el proceso de coagulación con Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$

Evaluación de la coagulación con Sulfato de Aluminio						
Coagulación química: RPM: 100 Tiempo: 5 minutos		Sedimentación: Tiempo de reposo: 30 min		Volumen de muestra: 1 litro por prueba		
Resultados						
# de exp.	Concentración (mg/L)	Turbidez final (NTU)			Eficiencia (%)	
		Valores		Prom.		
1	10					
2	20					
3	30					
4	40					
5	50					

*Alto estándar y
Verificación Kello No
986603*

Juan Peracca
JUAN PERACCA
 56071.

Irwin Ganem Mendola
IRWIN GANEM MENDOLA
 164032

Anexo 3 Formato de evaluación para el proceso de coagulación con Hidroxicloruro de Aluminio $Al_2Cl(OH)_5$

Evaluación de la coagulación con Hidroxicloruro de Aluminio						
Coagulación química: RPM: 100 Tiempo: 5 minutos		Sedimentación: Tiempo de reposo: 30 min		Volumen de muestra: 1 litro por prueba		
Resultados						
# de exp.	Concentración (mg/L)	Turbidez final (NTU)			Eficiencia (%)	
		Valores		Prom.		
1	10					
2	20					
3	30					
4	40					
5	50					

Anexo 4 Formato de evaluación para el proceso de electrocoagulación con placas de aluminio

Datos experimentales											
Electrocoagulación:			Sedimentación:			Volumen de muestra:			Electrodos:		
RPM: 100 Tiempo: 5			30 min.						Material:		
Resultados											
# de exp.	E aplicado (V)	Corriente (mA)	Densidad de corriente (mA/m ²)	Ánodo de aluminio				Turbidez final (NTU)		Eficiencia (%)	
				Peso (mg)		Área geométrica (m ²)	Separación (m)	Valores			
				Inicial	Final			Valores	Prom.		
1	10										
2	20										
3	30										

Alto
Verónica Kelso R
986603

Juan Peraza
JUAN PERAZA
56071.

Irwin Gansens Mendola
IRWIN GANSENS MENDEOLA
164032

Anexo 5 Límites máximos permisible de los parámetros involucrados

PARÁMETRO	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
Turbiedad	UNT	5
Aluminio	Mg/L	0,2
pH	Valor de pH	6,5 a 8,5

Fuente: Reglamento de la calidad del agua para consumo humano DS N° 031-2010-SA (Ministerio de Salud – MINSA)

Anexo 6 Requisitos para toma de muestras de agua y preservación

RECOMENDACIONES PARA EL MUESTREO Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS DE ACUERDO CON LAS MEDICIONES					
Parámetro	Recipiente 2	Volumen mínimo de muestra, mL	Tipo de muestra	Preservación	Almacenamiento máximo recomendado ⁵
Alcalinidad	P, V	200	S	Refrigerar	14 d
pH	P, V	50	S	Análisis inmediato	--
Turbidez	P, V	100	s, c	Analizar el mismo día; para más de 24h guardar en oscuridad, refrigerar	48

Fuente: Protocolo de monitoreo de la calidad de los recursos hídricos Autoridad Nacional del Agua DGCRH (2011)

Anexo 7 Ubicación de la zona de muestreo: Autopista Ramiro Prialé 4.5 con Av. Los Cisnes



Fuente: Google Maps

Anexo 8 Matriz de consistencia

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES			METODOLOGÍA
			VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	
¿Cuál es el método más eficiente entre la coagulación química y la electrocoagulación en la remoción de turbidez de agua del río Rímac, 2016?	Determinar cuál es el método más eficiente entre la coagulación química y la electrocoagulación en la remoción de turbidez de agua del río Rímac, 2016.	El promedio de las eficiencias de cada uno de los tres métodos analizados no refieren una diferencia significativa en la remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016	INDEPENDIENTE Remoción de turbidez	Turbidez	NTU de la muestra de agua bruta	Tipo de Estudio: Aplicativo Diseño de Investigación: Experimental, Transversal
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS				
¿Cuál es el nivel de correlación entre la dosificación de los coagulantes químicos (sulfato de aluminio e hidroxiclورو de aluminio) y la eficiencia en la remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016?	Determinar si existe correlación entre la dosificación de coagulante químico (sulfato de aluminio e hidroxiclورو de aluminio) y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016.	No existe correlación entre la dosificación de coagulante químico (sulfato de aluminio e hidroxiclورو de aluminio) y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016.	DEPENDIENTE Métodos de coagulación (química y electrocoagulación)	Dosificación de coagulante químico	Miligramos de sulfato de aluminio por litro de agua	POBLACIÓN: Caudal del río Rímac
¿Cuál es el nivel de correlación entre la densidad de corriente aplicada en la técnica de electrocoagulación con placas de aluminio y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016?	Determinar si existe correlación entre la densidad de corriente aplicada en la técnica de electrocoagulación con placas de aluminio y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016.	No existe correlación entre la densidad de corriente aplicada en la técnica de electrocoagulación con placas de aluminio y la eficiencia de remoción de turbidez del agua del río Rímac, 2016.				
¿Cuál es el método que genera menor cantidad de aluminio residual en el agua entre la coagulación química y la electrocoagulación en la remoción de turbidez de agua del río Rímac, 2016?	Determinar cuál es el método que genera menor cantidad de aluminio residual en el agua entre la coagulación química y la electrocoagulación en la remoción de turbidez de agua del río Rímac, 2016.	La concentración de aluminio residual en el agua es menor usando la coagulación química en lugar de electrocoagulación en la remoción de turbidez de agua del río Rímac, 2016.				
				Densidad de corriente	mA/m ²	MUESTRA: 25 Litros de agua

Anexo 9 Valores F de la distribución de Fisher

$$1 - \alpha = 0.95$$

v_1 = grados de libertad del numerador

$$1 - \alpha = P(F \leq f_{\alpha, v_1, v_2})$$

v_2 = grados de libertad del denominador

$v_2 \backslash v_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	161.446	199.499	219.707	234.593	250.160	263.980	276.767	288.694	299.943	310.602	320.761	330.500	339.899	348.938	357.600	365.866	373.727	381.175	388.202	394.800
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.329	19.353	19.371	19.385	19.396	19.405	19.412	19.419	19.424	19.429	19.433	19.437	19.440	19.443	19.446
3	10.120	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.785	8.763	8.745	8.730	8.715	8.703	8.692	8.683	8.675	8.667	8.660
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964	5.936	5.912	5.891	5.873	5.858	5.844	5.832	5.821	5.811	5.803
5	6.608	5.786	5.469	5.192	5.050	4.920	4.816	4.731	4.672	4.625	4.589	4.560	4.535	4.513	4.494	4.478	4.464	4.451	4.439	4.429
6	5.907	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060	4.027	4.000	3.976	3.956	3.938	3.922	3.908	3.895	3.884	3.874
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.865	3.787	3.726	3.677	3.637	3.603	3.575	3.550	3.529	3.511	3.494	3.480	3.467	3.455	3.445
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.688	3.581	3.503	3.442	3.393	3.353	3.319	3.291	3.266	3.244	3.226	3.210	3.202	3.187	3.173	3.161
9	5.117	4.256	3.863	3.635	3.485	3.378	3.299	3.238	3.189	3.149	3.115	3.087	3.062	3.040	3.022	3.006	2.989	2.974	2.960	2.948
10	4.985	4.103	3.709	3.481	3.331	3.224	3.145	3.084	3.035	2.995	2.961	2.933	2.908	2.886	2.868	2.852	2.835	2.820	2.806	2.794
11	4.844	3.962	3.567	3.339	3.189	3.082	3.003	2.942	2.893	2.853	2.819	2.791	2.766	2.744	2.726	2.710	2.693	2.678	2.664	2.652
12	4.747	3.865	3.470	3.242	3.092	2.985	2.906	2.845	2.796	2.756	2.722	2.694	2.669	2.647	2.629	2.613	2.596	2.581	2.567	2.555
13	4.667	3.785	3.390	3.162	3.012	2.905	2.826	2.765	2.716	2.676	2.642	2.614	2.589	2.567	2.550	2.534	2.517	2.502	2.488	2.476
14	4.600	3.718	3.323	3.095	2.945	2.838	2.759	2.698	2.649	2.609	2.575	2.547	2.522	2.500	2.483	2.467	2.450	2.435	2.421	2.409
15	4.543	3.661	3.266	3.038	2.888	2.781	2.702	2.641	2.592	2.552	2.518	2.490	2.465	2.443	2.426	2.410	2.393	2.378	2.364	2.352
16	4.494	3.612	3.217	2.989	2.839	2.732	2.653	2.592	2.543	2.503	2.469	2.441	2.416	2.394	2.377	2.361	2.344	2.329	2.315	2.303
17	4.451	3.569	3.174	2.946	2.796	2.689	2.610	2.549	2.499	2.459	2.425	2.397	2.372	2.350	2.333	2.317	2.300	2.285	2.271	2.259
18	4.414	3.532	3.137	2.909	2.759	2.652	2.573	2.512	2.462	2.422	2.388	2.360	2.335	2.313	2.296	2.280	2.263	2.248	2.234	2.222
19	4.381	3.500	3.105	2.877	2.727	2.620	2.541	2.480	2.430	2.390	2.356	2.328	2.303	2.281	2.264	2.248	2.231	2.216	2.202	2.190
20	4.351	3.470	3.075	2.847	2.697	2.590	2.511	2.450	2.400	2.360	2.326	2.298	2.273	2.251	2.234	2.218	2.201	2.186	2.172	2.160
21	4.325	3.444	3.049	2.821	2.671	2.564	2.485	2.424	2.374	2.334	2.300	2.272	2.247	2.225	2.208	2.192	2.175	2.160	2.146	2.134
22	4.301	3.440	3.045	2.817	2.667	2.560	2.481	2.420	2.370	2.330	2.296	2.268	2.243	2.221	2.204	2.188	2.171	2.156	2.142	2.130
23	4.279	3.422	3.027	2.799	2.649	2.542	2.463	2.402	2.352	2.312	2.278	2.250	2.225	2.203	2.186	2.170	2.153	2.138	2.124	2.112
24	4.260	3.403	3.009	2.781	2.631	2.524	2.445	2.384	2.334	2.294	2.260	2.232	2.207	2.185	2.168	2.152	2.135	2.120	2.106	2.094
25	4.242	3.385	2.991	2.763	2.613	2.506	2.427	2.366	2.316	2.276	2.242	2.214	2.189	2.167	2.150	2.134	2.117	2.102	2.088	2.076
26	4.225	3.369	2.975	2.745	2.595	2.488	2.409	2.348	2.298	2.258	2.224	2.196	2.171	2.149	2.132	2.116	2.100	2.085	2.071	2.059
27	4.210	3.354	2.960	2.728	2.578	2.471	2.392	2.331	2.281	2.241	2.207	2.179	2.154	2.132	2.115	2.099	2.083	2.068	2.054	2.042
28	4.196	3.340	2.947	2.714	2.564	2.457	2.378	2.317	2.267	2.227	2.193	2.165	2.140	2.118	2.101	2.085	2.069	2.054	2.040	2.028
29	4.183	3.328	2.934	2.701	2.551	2.444	2.365	2.304	2.254	2.214	2.180	2.152	2.127	2.105	2.088	2.072	2.056	2.041	2.027	2.015
30	4.171	3.316	2.922	2.689	2.539	2.432	2.353	2.292	2.242	2.202	2.168	2.140	2.115	2.093	2.076	2.060	2.044	2.029	2.015	2.003
40	4.085	3.232	2.839	2.606	2.456	2.349	2.270	2.209	2.159	2.119	2.085	2.057	2.032	2.010	1.993	1.977	1.961	1.946	1.932	1.920
50	4.034	3.183	2.790	2.557	2.407	2.299	2.220	2.159	2.109	2.069	2.035	2.007	1.982	1.960	1.943	1.927	1.911	1.896	1.882	1.870
60	4.001	3.150	2.758	2.525	2.375	2.267	2.188	2.127	2.077	2.037	2.003	1.975	1.950	1.928	1.911	1.895	1.879	1.864	1.850	1.838
70	3.978	3.128	2.736	2.503	2.353	2.245	2.166	2.105	2.055	2.015	1.981	1.953	1.928	1.906	1.889	1.873	1.857	1.842	1.828	1.816
80	3.960	3.111	2.719	2.486	2.336	2.228	2.149	2.088	2.038	1.998	1.964	1.936	1.911	1.889	1.872	1.856	1.841	1.826	1.812	1.800
90	3.947	3.098	2.706	2.473	2.323	2.215	2.136	2.075	2.025	1.985	1.951	1.923	1.898	1.876	1.859	1.843	1.828	1.813	1.800	1.788
100	3.936	3.087	2.696	2.463	2.313	2.205	2.126	2.065	2.015	1.975	1.941	1.913	1.888	1.866	1.849	1.833	1.818	1.803	1.790	1.778
200	3.888	3.041	2.650	2.417	2.267	2.149	2.070	2.009	1.959	1.919	1.885	1.857	1.832	1.810	1.793	1.777	1.762	1.747	1.733	1.721
500	3.860	3.014	2.623	2.390	2.240	2.122	2.043	1.982	1.932	1.892	1.858	1.830	1.805	1.783	1.766	1.750	1.735	1.720	1.706	1.694
1000	3.851	3.005	2.614	2.381	2.231	2.113	2.034	1.973	1.923	1.883	1.849	1.821	1.796	1.774	1.757	1.741	1.726	1.711	1.697	1.685

Anexo 10 Cálculo de la eficiencia de cada dosificación con sulfato de aluminio

$$\% \text{ Remoción de turbidez} = \frac{NTU_i - NTU_{f1}}{NTU_i} * 100 \%$$

- $\% \text{ Remoción de turbidez} = \frac{26.25 - 7.95}{26.25} * 100 \% = 69.71 \%$
- $\% \text{ Remoción de turbidez} = \frac{26.25 - 7.14}{26.25} * 100 \% = 72.80 \%$
- $\% \text{ Remoción de turbidez} = \frac{26.25 - 7.70}{26.25} * 100 \% = 70.67 \%$
- $\% \text{ Remoción de turbidez} = \frac{26.25 - 8.56}{26.25} * 100 \% = 67.39 \%$
- $\% \text{ Remoción de turbidez} = \frac{26.25 - 8.27}{26.25} * 100 \% = 68.49 \%$

Anexo 11 Cálculo de la eficiencia de cada dosificación con hidroxicloriguro de aluminio.

$$\% \text{ Remoción de turbidez} = \frac{NTU_i - NTU_{f2}}{NTU_i} * 100 \%$$

- $\% \text{ Remoción de turbidez} = \frac{26.25 - 6.26}{26.25} * 100 \% = 76.15 \%$
- $\% \text{ Remoción de turbidez} = \frac{26.25 - 4.71}{26.25} * 100 \% = 82.06 \%$
- $\% \text{ Remoción de turbidez} = \frac{26.25 - 4.56}{26.25} * 100 \% = 82.63 \%$
- $\% \text{ Remoción de turbidez} = \frac{26.25 - 3.98}{26.25} * 100 \% = 83.84 \%$
- $\% \text{ Remoción de turbidez} = \frac{26.25 - 4.47}{26.25} * 100 \% = 82.97 \%$

Anexo 12 Cálculo de la eficiencia de cada experimento de electrocoagulación

$$\% \text{ Remoción de turbidez} = \frac{NTU_i - NTU_{f3}}{NTU_i} * 100 \%$$

- % Remoción de turbidez = $\frac{26.25 - 4.54}{26.25} * 100 \% = 82.70 \%$
- % Remoción de turbidez = $\frac{26.25 - 3.72}{26.25} * 100 \% = 85.83 \%$
- % Remoción de turbidez = $\frac{26.25 - 3.41}{26.25} * 100 \% = 87.01 \%$

Anexo 13 Cálculo de la masa de aluminio teórico del agua tratada con la dosificación de sulfato de aluminio más eficiente.



Dosificación más eficiente $m_{\text{Al-disuelto}(1)}$

$$m_{\text{Al-disuelto}(1)} = \text{Dosificación más eficiente}_{(1)} * \frac{54}{342}$$

$$m_{\text{Al-disuelto}(1)} = 20\text{mg}(\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3) * \frac{54}{342}$$

$$m_{\text{Al-disuelto}(1)} = 3.158\text{mg}$$

Anexo 14 Cálculo de la masa de aluminio teórico del agua tratada con la dosificación de hidroxloruro de aluminio más eficiente.



Dosificación más eficiente $m_{\text{Al-disuelto}(2)}$

$$m_{\text{Al-disuelto}(2)} = \frac{\text{Dosificación más eficiente}_{(2)} * 54}{174.4}$$

$$m_{\text{Al-disuelto}(2)} = 40\text{mg}(\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}) * \frac{54}{174.4}$$

$$m_{\text{Al-disuelto}(2)} = 12.385\text{mg}$$

Anexo 15 Cálculo de la masa de aluminio teórico del experimento de electrocoagulación más eficiente según la 1º ley de Faraday.

$$m_{\text{Al disuelto}} = \frac{M * I * t}{n * F}$$

$$m_{\text{Al disuelto(3)}} = \frac{27\text{g.mol}^{-1} * 9.86\text{A} * 300\text{s}}{3 * 96500 \text{ C.mol}^{-1}}$$

$$m_{\text{Al disuelto(3)}} = 0.276\text{mg}$$

Anexo 16. Cálculo de la masa de aluminio perdido tras el experimento de electrocoagulación

Experimento	Masa inicial	Masa final	Masa de aluminio perdido
1º	11.4301	11.4291	0.001
2º	11.7427	11.7366	0.0061
3º	11.5059	11.4858	0.0201*

*De la muestra más eficiente en la remoción de turbidez

Anexo 17 Resultado del aluminio soluble contenido en las muestras de agua tratadas en el experimento más eficiente de cada técnica.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA
LABORATORIO DE ESPECTROMETRÍA

ANÁLISIS DE TRES MUESTRAS DE AGUAS TRATADAS

SOLICITADO POR : JOSE VERA RAMIREZ
RECEPCIÓN DE MUESTRA : Lima, 07 de Junio del 2016

RESULTADO DEL ANÁLISIS ALUMINIO SOLUBLE EN TRES MUESTRAS DE AGUAS TRATADAS

Muestra	Al (mg/L)
1 Sulfato de aluminio	0.092
2 Hidroxicloruro de aluminio	0.098
3 Electrocoagulación con placas de aluminio	1.438

Lima, 16 de Junio del 2016


MSc. Atilio Mendoza A.
Jefe Lab. Espectrometría

Av. Túpac Amará N° 210, Lima 25, Apartado 1301-Perú
Teléfono: (511) 4824427, Central Telefónica (511) 4811070, Anexo 386
e-mail: labespectro@uni.edu.pe



**ACTA DE APROBACIÓN DE ORIGINALIDAD
DE TESIS**

Código : F06-PP-PR-02.02
Versión : 09
Fecha : 23-03-2018
Página : 1 de 1

Yo, Elmer Benites Alfaro., docente de la Facultad de INGENIERÍA y Escuela Profesional de ING. AMBIENTAL de la Universidad César Vallejo - LN revisor (a) de la tesis titulada:

Comparación de la coagulación química y la electrocoagulación en la eficiencia de remoción de turbidez de agua del Rio Piura, 2016.

del (la) estudiante... *VEGA BARRERA, José José*..., constato que la investigación tiene un índice de similitud de *17* % verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin.

El/la suscrito (a) analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

Los Olivos, *11 de diciembre del 2018*


Firma Docente
DNI: *087867259*

Elaboró	Dirección de Investigación	Revisó	Representante de la Dirección / Vicerectorado de Investigación y Calidad	Aprobó	Rectorado
---------	----------------------------	--------	--	--------	-----------



AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE TESIS EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL UCV

Código : F08-PP-PR-02.02
 Versión : 09
 Fecha : 23-03-2018
 Página : 1 de 1

Yo VERA RAMÍREZ, José José

 identificado con DNI N° 73192844, Egresado(a) de la Escuela Profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL, de la Universidad César Vallejo, autorizo (X), No autorizo () la divulgación y comunicación pública de mi trabajo de investigación titulado: "Comparación de la coagulación química y la electrocoagulación en la eficiencia de remoción de turbidez de agua del río Rimac, 2016"
";
 en el Repositorio Institucional de la UCV (<http://repositorio.ucv.edu.pe/>), según lo estipulado en el Decreto Legislativo 822, Ley sobre Derechos de Autor, Art. 23 y Art. 33

Fundamentación en caso de no autorización:

.....

FIRMA

DNI: 73192844

FECHA: Los Olivos M. de Diciembre del 2018

Elaboró	Dirección de Investigación	Revisó	Responsable de SGC	Aprobó	Vicerrectorado de Investigación
---------	----------------------------	--------	--------------------	--------	---------------------------------

UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
COMPARACIÓN DE LA COAGULACIÓN QUÍMICA Y LA
ELECTROCOAGULACIÓN EN LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE
TURBIDEZ DE AGUA DEL RÍO RÍMAC, 2016

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO AMBIENTAL.

AUTOR
JOSÉ JOSÉ VERA RAMIREZ

ASESOR
DR. LUIS ROJO VALDIVIEZO GONZALES

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
SISTEMA DE GESTIÓN AMBIENTAL

LIMA - PILO
2016



Resumen de coincidencias

17%

Se están viendo fuentes estándar

Ver fuentes en inglés (Beta)

Coincidencias

1	repositorio.ucv.edu.pe	4%
2	Entregado a Universidad...	4%
3	cyberbasis.uni.edu.pe	2%
4	www.mimem.gob.pe	1%
5	oa.upm.es	1%
6	Jhon Jairo Feria Díaz, J.	1%



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

AUTORIZACIÓN DE LA VERSIÓN FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTE POR EL PRESENTE EL VISTO BUENO QUE OTORGA EL ENCARGADO DE INVESTIGACIÓN DE
LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

A LA VERSIÓN FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN QUE PRESENTA:

JOSE JOSE VERA RAMIREZ

INFORME TÍTULADO:

COMPARACIÓN DE LA COAGULACIÓN QUÍMICA Y LA ELECTROCOAGULACIÓN EN
LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE TURBIDEZ DE AGUA DEL RÍO RÍMAC, 2016

PARA OBTENER EL TÍTULO O GRADO DE:

INGENIERO AMBIENTAL

SUSTENTADO EN FECHA: 08/07/2016

NOTA O MENCIÓN: H




FIRMA DEL ENCARGADO DE INVESTIGACIÓN
Dr. Elmer Benites Alfaro