



**UNIVERSIDAD ESTATAL
PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL**

“APLICACIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA LA
OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DEL
AGUA EN LA EMPRESA AGUAPEN-EP, SANTA ELENA-
ECUADOR”

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO INDUSTRIAL

AUTOR:

DOMÍNGUEZ PIZARRO ALBERTO LEONARDO

TUTOR:

ING. BALÓN RAMOS ISABEL DEL ROCÍO M.Sc.

La Libertad, Ecuador

2023

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA
ELENA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL**

TEMA:

**“APLICACIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA LA
OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DEL
AGUA EN LA EMPRESA AGUAPEN-EP, SANTA ELENA-
ECUADOR”**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTOR:

DOMÍNGUEZ PIZARRO ALBERTO LEONARDO

TUTOR:

ING. BALÓN RAMOS ISABEL, M. Sc.


UPSE
LA LIBERTAD - ECUADOR

2023

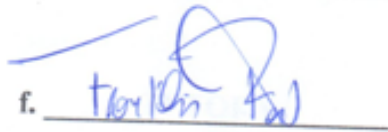
CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **DOMÍNGUEZ PIZARRO ALBERTO LEONARDO**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Industrial**.

TUTORA


Ing. Balón Ramos Isabel del Rocío M.Sc.

DIRECTOR DE LA CARRERA


Ing. Reyes Soriano Franklin Enrique Mgtr.

La Libertad, a los 13 días del mes de diciembre del año 2023.

APROBACIÓN DEL TUTOR

Ing.


Balón Ramos Isabel M.Sc.

TUTOR (A) DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Universidad Estatal Península de Santa Elena.

En mi calidad de Tutor (a) del Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación “APLICACIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA EN LA EMPRESA AGUAPEN-EP, SANTA ELENA-ECUADOR”, elaborado por el Sr. Domínguez Pizarro Alberto Leonardo, estudiante de la carrera de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingeniero Industrial, me permito declarar que luego de haberla dirigido, estudiado y revisado, la apruebo en su totalidad.

TUTORA


Ing. Balón Ramos Isabel del Rocío M.Sc.

La Libertad, 13 días del mes de diciembre del año 2023.

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Domínguez Pizarro Alberto Leonardo

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, “**APLICACIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA EN LA EMPRESA AGUAPEN-EP, SANTA ELENA-ECUADOR**” previo a la obtención del título de **Ingeniero Industrial**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi/nuestra total autoría.

En virtud de esta declaración, me/nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

La Libertad, a los 13 días del mes de diciembre del año 2023.

AUTOR

f. 
Domínguez Pizarro Alberto Leonardo

AUTORIZACIÓN

Yo, **Domínguez Pizarro Alberto Leonardo**

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena la **publicación** en la biblioteca de la Institución del Trabajo de Titulación, “**APLICACIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA EN LA EMPRESA AGUAPEN-EP, SANTA ELENA-ECUADOR**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

La Libertad, a los 13 días del mes de diciembre del año 2023.

AUTOR

f. 
Domínguez Pizarro Alberto Leonardo

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En calidad de Tutor (a) del Trabajo de Integración Curricular con tema “APLICACIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA EN LA EMPRESA AGUAPEN-EP, SANTA ELENA-ECUADOR” elaborado por el Sr. DOMÍNGUEZ PIZARRO ALBERTO LEONARDO, egresado de la carrera de Ingeniería de Industrial, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, previo a la obtención del Título de Ingeniero Industrial me permito declarar que una vez analizado en el Software antiplagio: Compilatio Magister, luego de haber cumplido con los requerimientos exigidos de valoración, el presente trabajo de titulación, se encuentra con un 1% de similitud, siendo esta valoración permitida, por consiguiente, se procede a emitir el presente informe.

INFORME DE ANÁLISIS
magister

Tesis Domínguez Pizarro Alberto

< 1%
Textos sospechosos

< 1% Similitudes
0% similitudes entre comillas
0% Idioma no reconocido
0% Textos potencialmente generados por la IA

Nombre del documento: Tesis Domínguez Pizarro Alberto.docx
ID del documento: d9a9f4cc922fc3708d80c9498d960895ce38bf83
Tamaño del documento original: 8.04 MB

Depositante: ISABEL DEL ROCIO BALON RAMOS
Fecha de depósito: 9/12/2023
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 9/12/2023

Número de palabras: 21.952
Número de caracteres: 138.350

Ubicación de las similitudes en el documento:

☰ Fuentes de similitudes

Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	Documento de otro usuario #7f52bc El documento proviene de otro grupo 2 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (28 palabras)
2	sitedoc.com POTABILIZACION DEL AGUA Operaciones unitarias involucradas Tr... https://sitedoc.com/potabilizacion-del-agua-operaciones-unitarias-involucradas-transporte-de-l-...	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (22 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	www.ose.com.uy Etapas del Proceso de Potabilización http://www.ose.com.uy/permalink/84	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (40 palabras)
2	Documento de otro usuario #9c7048 El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (15 palabras)
3	Documento de otro usuario #d913c3 El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (15 palabras)
4	Documento de otro usuario #4c29c9 El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (11 palabras)
5	www.scielo.org.co Uso integral de simulación, diseño de experimentos y KANBA... http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672019000200009	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (11 palabras)

TUTORA


Ing. Balón Ramos Isabel del Rocío M.Sc.

CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA

CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA

Ing. Ángela Analía Rivas Gavilánez MSc.
Celular: 0959492074
Correo: rivasangela461@gmail.com

CERTIFICADO GRAMATICAL Y ORTOGRÁFICA

Yo, Ángela Analía Rivas Gavilánez, en mi calidad de Magister en Gerencia de Innovaciones Educativas, por medio de la presente tengo a bien CERTIFICAR: Que he revisado la redacción, estilo y ortografía del contenido del trabajo de titulación con el tema **“APLICACIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA EN LA EMPRESA AGUAPEN-EP, SANTA ELENA-ECUADOR”** elaborado por el Sr. **DOMÍNGUEZ PIZARRO ALBERTO LEONARDO** con cédula de identidad No. 0918020173 previo a la obtención del título de Ingeniero Industrial de la Universidad Estatal Península de Santa Elena de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la carrera de Ingeniería Industrial.

El presente trabajo investigativo de titulación ha sido escrito de acuerdo a las normas gramaticales y de sintaxis vigente de la lengua española. Debo indicar, además, que es de exclusiva responsabilidad que el autor cumpla con las sugerencias y recomendaciones dadas en la corrección de la tesis impresa

Sin otro particular.

ATENTAMENTE,


Ing. Ángela Rivas Gavilánez MSc.

C.10923562177

Celular: 0959492074

Registro SENESCYT No. 1014-12-749713

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a DIOS por la vida, la salud, las bendiciones y en quien he puesto mi fe, para el cumplimiento de mis metas propuestas.

Agradezco a todo el personal docente que desde el inicio de la carrera compartieron todos sus conocimientos, enseñanzas, consejos teóricos prácticos y morales para aplicarlos en mi etapa de profesional.

A las autoridades de la empresa AGUAPEN-EP y a su personal técnico de la Planta Potabilizadora Atahualpa por el apoyo brindado, las consultas y practicas realizadas para el desarrollo de este trabajo investigativo.

A mi tutora por su valioso tiempo dedicado en impartirme sus sugerencias y a todos mis compañeros de aula por su amistad incondicional.

Alberto Leonardo Domínguez Pizarro

DEDICATORIA


El presente trabajo investigativo va dedicado a la memoria de padres, quien en vida me enseñaron a con sus buenos consejos y modales a seguir adelante.

A mi esposa por todo su apoyo moral en todo momento de mi carrera cuando las cosas se ponían difíciles y a mis hijos se lo dedico como un ejemplo de superación.

A todos mis hermanos y amistades gracias por todo su apoyo.

Alberto Leonardo Domínguez Pizarro

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 

Ing. REYES SORIANO FRANKLIN ENRIQUE Mgtr.
DIRECTOR DE CARRERA

f. 

Ing. BUENAÑO BUENAÑO EDISON NOÉ Mgtr.
DOCENTE ESPECIALISTA

f. 

Ing. BALÓN RAMOS ISABEL DEL ROCÍO M.Sc.
DOCENTE TUTOR

f. 

Ing. MUYULEMA ALLATA JUAN CARLOS MEng
DOCENTE DE LA UIC

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN	iii
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	iv
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	v
AUTORIZACIÓN.....	vi
CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO.....	vii
CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA	viii
AGRADECIMIENTOS	ix
DEDICATORIA	x
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	xi
ÍNDICE GENERAL.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xix
LISTA DE ABREVIATURAS Y TABLA DE SÍMBOLOS	xx
RESUMEN.....	xxi
ABSTRACT.....	xxii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	10
MARCO TEÓRICO.....	10
1.1 Antecedentes investigativos.....	10
1.2 Estado del arte.....	12

1.2.1 Variable independiente: Diseño de Experimentos.....	19
1.2.2 Variable dependiente: Potabilización del agua – Definiciones.....	21
1.2.3 Relación y resultados entre el DOE y el proceso de potabilización del agua. .	25
1.3 Empresa Pública Municipal Mancomunada AGUAPEN-EP.	25
CAPÍTULO II	38
MARCO METODOLÓGICO	38
2.1 Enfoque de investigación.	38
2.2 Diseño de investigación.	39
2.3 Procedimiento metodológico.....	40
2.4 Población y muestra.....	41
2.4.1 Población (cuando el estudio lo requiera).	41
2.4.2 Muestra.	41
2.5 Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de los datos.	41
2.5.1 Métodos de recolección de los datos.	41
2.5.2 Técnicas de recolección de los datos.	42
2.5.3 Instrumentos de recolección de los datos.	42
2.6 Variables de estudio.....	43
2.7 Procedimiento para la recolección de los datos.....	45
2.8 Plan de análisis e interpretación de resultados.....	45
CAPÍTULO III	47
MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
3.1 Marco de resultados.....	47
3.1.1 Resultados de la observación.....	47
3.1.2 Resultados de los experimentos.	49
3.1.3 Resultados de la revisión documental.....	57
3.2 Validación y confiabilidad de los instrumentos.....	58
3.3 Verificación de hipótesis.	68

<i>3.4 Proceso de potabilización de la Planta Atahualpa utilizando sulfato de aluminio tipo B sólido como coagulante.....</i>	<i>70</i>
<i>3.5 Proceso de potabilización del agua de la PTAP Atahualpa utilizando policloruro de aluminio como coagulante.</i>	<i>73</i>
<i>3.6 Presupuesto.....</i>	<i>83</i>
<i>3.7 Marco de discusión.</i>	<i>84</i>
RECOMENDACIONES	89
BIBLIOGRAFÍA.....	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dosificación mensual con sulfato de aluminio.	3
Tabla 2. Dosificación mensual con policloruro de aluminio.	4
Tabla 3. Turbiedad promedio embalse El Azúcar año 2022.	4
Tabla 4. Ecuaciones de búsqueda.....	12
Tabla 5. Matriz referencial de artículos científicos.....	15
Tabla 6. Clasificación por temas de los artículos.....	19
Tabla 7. Especificaciones técnicas de las bombas.	35
Tabla 8. Enfoque cuantitativo de la investigación.	38
Tabla 9. Operacionalización de variables.	44
Tabla 10. Plan de análisis e interpretación de resultados.....	46
Tabla 11. Resumen de resultados de las cuatro muestras coagulantes.....	57
Tabla 12. Datos del experimento factorial 4 x 3 para el porcentaje de remoción.	60
Tabla 13. ANOVA para el diseño factorial a x b.	61
Tabla 14. ANOVA Análisis de varianza del ejemplo.	63
Tabla 15. Análisis de varianza ANOVA del ejemplo. Minitab.	63
Tabla 16. Datos del experimento factorial 4 x 3 para el potencial de hidrogeno pH.66	
Tabla 17. Análisis de varianza ANOVA del ejemplo. Minitab.	66
Tabla 18. Datos del experimento factorial 4 x 3 para el color en unidades CoPt.	67
Tabla 19. Análisis de varianza ANOVA del ejemplo. Minitab.	67
Tabla 20. Datos del experimento factorial 4 x 3 para la temperatura en °C	67

Tabla 21. Análisis de varianza ANOVA del ejemplo. Minitab.	68
Tabla 22. Principales diferencias entre los coagulantes.....	82
Tabla 23. Presupuesto.	83
Tabla 24. Valores para cálculos de índices financieros.	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Diagrama de Pareto. Turbiedad embalse El Azúcar.	5
Fig. 2. Diagrama de causa efecto 6M.	5
Fig. 3. Diagrama de flujo sobre la problemática de investigación.	8
Fig. 4. Listado de palabras claves ordenadas.	13
Fig. 5. Red de palabras claves.	14
Fig. 6. Lista de autores citados en los artículos.	14
Fig. 7. Visualización de la densidad de los autores más citados.	15
Fig. 8. Variables de un proceso.	20
Fig. 9. Clasificación de los diseños de experimentos.	21
Fig. 10. Diagrama de flujo de una PTAP.	23
Fig. 11. Traslase Daule Santa Elena.	26
<i>Fig. 12.</i> Estación de bombeo de agua cruda.	27
Fig. 13. Ubicación Planta Potabilizadora Atahualpa.	28
<i>Fig. 14.</i> Diagrama de flujo. Proceso de potabilización del agua.	29
Fig. 15. Cámara de medición y mezcla Canaleta Parshall.	30
Fig. 16. Módulos de potabilización MPA.	31
Fig. 17. Cámara de reunión y contacto.	33
Fig. 18. Reservorio de agua tratada.	34
Fig. 19. Casa bomba.	34

Fig. 20. Procedimiento metodológico.	40
Fig. 21. Plan para la obtención de datos.	41
Fig. 22. Guía de Observación del Test de Jarras.	48
Fig. 23. Resultados Test de Jarras del sulfato de aluminio tipo A.	49
Fig. 24. Resultados Test de Jarras del sulfato de aluminio tipo B.....	50
Fig. 25. Resultados Test de Jarras del policloruro de aluminio PAC sólido.....	51
Fig. 26. Resultados Test de Jarras del policloruro de aluminio PAC líquido.....	52
Fig. 27. Resultados Test de Jarras del sulfato de aluminio tipo A.	53
Fig. 28. Resultados Test de Jarras del sulfato de aluminio tipo B.....	54
Fig. 29. Resultados Test de Jarras del policloruro de aluminio PAC sólido.....	55
Fig. 30. Resultados Test de Jarras del policloruro de aluminio PAC líquido.....	56
Fig. 31. Gráfica de los efectos principales.	64
Fig. 32. Gráfica de interacción.	65
Fig. 33. Gráfica de residuos para rendimiento.	65
Fig. 34. Optimización de respuesta.....	78
Fig 35. Resultados Test de Jarras del policloruro de aluminio PAC sólido y adición de polímero.....	79

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Requisitos físicos y químicos del agua para consumo humano.	95
Anexo B. Diagrama de flujo Test de jarras.....	96
Anexo C. Modelo de Guía de Observación.	97
Anexo D. Data de información con el porcentaje de remoción del agua cruda.....	98
Anexo E. Análisis de elementos y Alfa de Cronbach.....	99
Anexo F. Creación de diseño factorial en software Minitab Statistical.	100
Anexo G. Evidencia del desarrollo del ensayo de jarras.	101
Anexo H. Solicitud de autorización para realización de Tesis de grado.	106
Anexo I. Solicitud autorizada.	107
Anexo J. Certificado de análisis de control de calidad del sulfato de aluminio tipo B.	108
Anexo K. Certificado de análisis de control de calidad del sulfato de aluminio tipo A.	109
Anexo L. Certificado de análisis de control de calidad del policloruro de aluminio líquido.	110
Anexo M. Producción mensual con sulfato de aluminio tipo B sólido.	111

LISTA DE ABREVIATURAS Y TABLA DE SÍMBOLOS

ANOVA: Análisis de varianza.

ARCA: Agencia de regulación y control del agua.

CoPt: Platino cobalto.

DOE: Diseño de experimentos.

FeCl₃: Cloruro de hierro.

GMB: Grupo motor bomba.

MPA: Módulos de potabilización de agua.

NTE INEN: Norma técnica ecuatoriana Instituto Ecuatoriano de Normalización.

NTU: Unidad nefelométrica de turbidez.

PAC: Policloruro de aluminio.

pH: Potencial de hidrógeno.

ppm: Partes por millón.

PR: Periodo de recuperación.

PTAP: Plantas de tratamiento de agua potable.

PVC: Cloruro de polivinilo.

TIR: Tasa interna de retorno.

VAN: Valor actual neto.

“APLICACIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA EN LA EMPRESA AGUAPEN-EP, SANTA ELENA-ECUADOR”

Autor: Domínguez Pizarro Alberto Leonardo

Tutor (a): Ing. Balón Ramos Isabel M.Sc.

RESUMEN

A nivel mundial el 0.007% del agua es apta para el consumo humano por lo que su necesidad crece con el pasar de los días, por tal motivo se ha optado por instalar Plantas de Tratamiento con estándares de calidad, pero a pesar de aquellas algunas de ellas no cumplen adecuadamente con el proceso de coagulación, en cuanto a remoción de sólidos se refiere. Es por aquello que la implementación del método de diseño de experimentos permitirá la optimización del proceso de potabilización del agua en la Planta Atahualpa de AGUAPEN-EP, elaborando un marco teórico de fuentes confiables, estableciendo una metodología adecuada para llegar a los resultados esperados. El trabajo investigativo correspondió a un enfoque cuantitativo experimental desarrollado en cuatro fases, la fase I con las visitas al sitio para la recopilación de la información, la fase II comprende la simulación del proceso de coagulación, la fase III es la aplicación del diseño de experimentos por medio del Minitab Statistical Software y la fase IV la presentación de los resultados. Se realizaron nueve ensayos en total con los coagulantes sulfato de aluminio A, sulfato de aluminio B, policloruro de aluminio sólido, policloruro de aluminio líquido y un polímero para el mejoramiento de la consistencia de las masas de lodo. El coagulante con la mejor efectividad para la clarificación del agua fue el policloruro de aluminio con una dosis óptima de 16 ppm a nivel de laboratorio y a nivel de Plantas de Tratamiento por factor costo beneficio 12 ppm, obteniéndose agua de calidad en cada una de las etapas del proceso. En el estado del arte se revisaron 31 artículos científicos durante los últimos cinco años para la base teórica, la metodología de las cuatro fases fue la más acorde para el desarrollo del trabajo investigativo, mientras que el presupuesto invertido se recuperaría en un periodo de dos años y medio.

Palabras claves: diseño de experimentos, optimización, potabilización, coagulantes, remoción, sólidos suspendidos.

“APPLICATION OF THE DESIGN OF EXPERIMENTS FOR THE OPTIMIZATION OF THE WATER POTABILIZATION PROCESS IN THE AGUAPEN-EP COMPANY, SANTA ELENA-ECUADOR”

Author: Domínguez Pizarro Alberto Leonardo

Tutor: Ing. Balón Ramos Isabel M.Sc.

ABSTRACT

On planet Earth, 0.007% of water is drinkable and its demand increases day after day, which is why Treatment Plants have been implemented to meet quality standards, however, in terms of removing suspended solids, several of them They do not adequately cover the treatability of contaminants. In this sense, the need arose to apply the design of experiments to optimize the water purification process at the AGUAPEN-EP Atahualpa Plant, developing a theoretical framework from reliable sources, establishing an appropriate methodology to achieve the expected results. The investigative work corresponded to an experimental quantitative approach developed in four phases, phase I with visits to the site for the collection of information, phase II includes the simulation of the coagulation process, phase III is the application of the design of experiments through Minitab Statistical Software and phase IV the presentation of the results. Nine tests in total were carried out on the coagulants aluminum sulfate type A, aluminum sulfate type B, solid aluminum polychloride, liquid aluminum polychloride and a polymer to improve the consistency of the sludge masses. The coagulant with the best effectiveness for water clarification was polyaluminum chloride with an optimal dose of 16 ppm at the laboratory level and at the Treatment Plant level by cost-benefit factor 12 ppm, obtaining quality water in each of the stages. of process. In the state of the art, 31 scientific articles were reviewed during the last five years for the theoretical basis, the methodology of the four phases was the most appropriate for the development of the investigative work, while the invested budget would be recovered in a period of two years and a half.

Keywords: design of experiments, optimization, purification, coagulants, removal, suspended solids.

INTRODUCCIÓN

Las industrias realizan diariamente pruebas de sus procesos productivos en marcha, con la finalidad de innovarlos acorde a la era moderna enfrentando los acontecimientos para la búsqueda de una determinada solución al problema. Es por aquello que una buena toma de decisiones implicará la aplicación de técnicas, métodos y procedimientos laborales que permitan mejorar los niveles de productividad, optimizando así los insumos empleados en la obtención del producto final (Gómez & Espín, 2022).

En el planeta Tierra el 90% del agua existente es dulce y se localiza en el hemisferio Sur, específicamente en la Antártida, de este porcentaje el 70% es agua congelada y el 30% se ubica en la superficie. El 0,025% de esta totalidad es agua potable, lo que significa que el 0,007% del agua del tercer planeta es potable. Este pequeño porcentaje de agua potable, origina escases y hace crecer la demanda debido al incremento poblacional y el día a día, por lo que, se hace necesario la instalación de nuevas Plantas Potabilizadoras de última tecnología para cumplir con la calidad de cada uno de los procesos, especialmente en cuanto a la coagulación se refiere (Camilo et al., 2022).

A nivel mundial, se encuentra el líquido vital de manera natural con diferentes características para su tratamiento, especialmente aguas con altos niveles de color en zonas altas que para mejorarla implicarían altos costos, como por ejemplo mejorar el parámetro del color del agua en proceso requerirá de insumos químicos donde los costos de inversión sino se elige el adecuado podría afectar la calidad del agua, inclusive la eficiencia del proceso de producción (Yanza-López et al., 2019).

Años atrás se vienen realizando pruebas con ensayos de diferentes tipos de coagulantes, entre los que principalmente se encuentran las sales de hierro y aluminio, no obstante, de acuerdo a la calidad del agua cruda, las sustancias químicas con alto contenido de hierro son más eficaces en la eliminación del parámetro del color, aglomerando flóculos de gran tamaño y peso para facilitar su sedimentación (Yanza-López et al., 2019).

Latinoamérica y especialmente Colombia poseen aguas naturales con alto contenido de materia orgánica, por lo que para su procesamiento se requiere que la etapa de coagulación sea muy eficiente. Esta situación originó realizar estudios para comparar

las características de funcionamiento de los sedimentadores de una Planta de Tratamiento con diferentes muestras de sustancias químicas para mejorar las condiciones de la decantación de las partículas con alto índice de color y bajo porcentaje de turbiedad (Fernández et al., 2021)

Una empresa prestadora de servicio para la estatal Petroecuador, realizó los estudios y la implementación de una PTAP mediante un método experimental para poder establecer la dosis adecuada de policloruro de aluminio PAC más la adición de un polímero para reducir la turbiedad presente en el agua cruda. (León-Chimbolema et al., 2022).

En la provincia de Santa Elena la empresa AGUAPEN-EP, se encarga principalmente de la distribución de los servicios básicos de agua potable y depuración de aguas residuales. Para el procesamiento del agua dispone de la Planta Potabilizadora ubicada en la zona de Atahualpa, cuya producción actual supera su capacidad nominal y los costos operativos en la adquisición de sustancias químicas para el tratamiento del agua resultan altos, por lo que el presente trabajo investigativo pretende en base a una buena sustentación teórica aplicando el diseño de experimentos, optimizar la producción de agua potable de la PTAP Atahualpa incrementando el caudal de producción, en función de los insumos químicos en el tratamiento.

En ese sentido, el presente trabajo investigativo, se compone de los siguientes capítulos:

El capítulo I contiene la recopilación de datos y el análisis bibliográfico de las variables de estudio, utilizando el software VOSviewer, el capítulo II establece la metodología de ensayos de laboratorio aplicando el diseño de experimentos DOE y finalmente en el capítulo III se exponen los resultados que nos permiten mejorar la producción de agua potable, cumpliendo así con los objetivos propuestos.

Planteamiento del Problema.

El agua es vital para los seres humanos y tiene su impacto en la industria a nivel mundial, en donde la reducción de sus existencias se debe a la acelerada acción del crecimiento poblacional económico. A más de esto, alrededor de 2200 millones de personas aproximadamente en todo el mundo, no cuentan con el servicio de agua potable de manera segura (Camilo et al., 2022).

En el año 2015, se efectuó en Colombia un estudio para analizar y evaluar la calidad del agua distribuida a sus poblaciones, debido a los inconvenientes encontrados en cuanto a la calidad del agua suministrada a los usuarios (Camilo et al., 2022).

Un estudio del agua efectuado para analizar el comportamiento de tres coagulantes: sulfato de aluminio A, sulfato de aluminio B y cloruro férrico, determinó el porcentaje para remover la materia coloidal en el agua cruda utilizando el método de los coeficientes de San en 1989 (Pulgarín et al., 2019).

La PTAP Atahualpa de AGUAPEN-EP, se abastece de la fuente natural del embalse El Azúcar, donde el factor turbiedad del agua se encuentra entre 2,84 – 7,92 NTU, mientras que su caudal de procesamiento es de hasta 800 l/s. Para el proceso de coagulación del agua cruda, puede emplear el sulfato de aluminio sólido B sólido o el policloruro de aluminio PAC como coagulantes, según el inventario y los recursos económicos.

No obstante, en ciertas ocasiones, la coagulación no resulta ser tan eficiente, debido a que los coágulos (flóculos) formados, los cuales se desvanecen en el proceso, esto es debido al incremento de los caudales de producción; por tal motivo es considerable utilizar agentes de floculación, entre los que se destacan los polímeros orgánicos. Los polímeros aniónicos y no iónicos son sustancias que se utilizan para reforzar los flóculos y se recomienda aplicarlo después de la adición de los coagulantes para lograr la desestabilización de las partículas

En ese sentido, en base a los registros históricos, a continuación, se detalla una información comparativa utilizando sulfato de aluminio y policloruro de aluminio como coagulantes de la materia prima en el proceso de potabilización de la PTAP de AGUAPEN-EP, considerando un caudal de 800 l/s. y una concentración de 2,5%.

Tabla 1. Dosificación mensual con sulfato de aluminio.

Sulfato de aluminio tipo B sólido							
Sacos	Kg	Turbiedad inicial promedio NTU	Dosis Ppm	Turbiedad final promedio NTU	% de remoción	Lavado de filtros	Costo total de sulfato de aluminio
1.800	45.000	3,67	20	1,26	65,67	24	USD \$ 27.000

Tabla 2. Dosificación mensual con policloruro de aluminio.

Policloruro de aluminio PAC							
Sacos	Kg	Turbiedad inicial promedio NTU	Dosis Ppm	Turbiedad final promedio NTU	% de remoción	Lavado de filtros	Costo total de PAC
900	22.500	3,67	8	1,09	70,30	12	USD \$ 20.250

Nota: Fuente AGUAPEN-EP.

Con los datos expuestos, se puede observar que, utilizando el PAC, se disminuye la cantidad de coagulante, la cantidad de dosis es menor, el porcentaje de remoción incrementa y se desperdicia menos cantidad de agua al disminuir los lavados de filtros. También se puede observar una disminución considerable en el factor económico del coagulante químico.

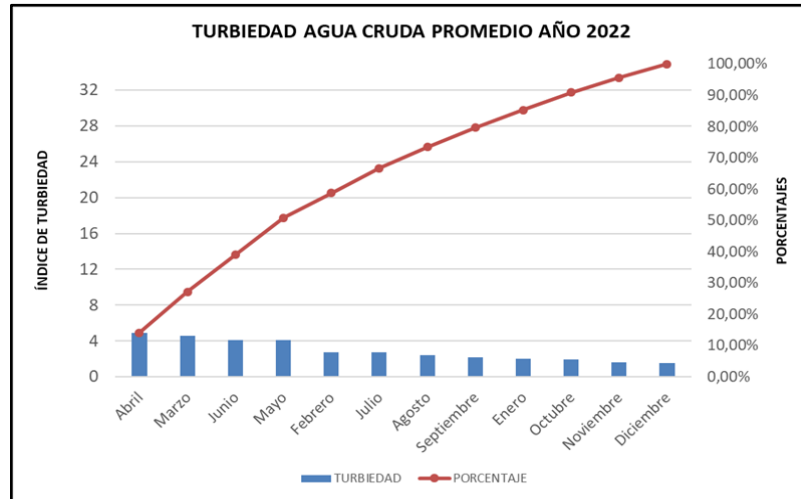
Es necesario tener en cuenta los datos de la turbiedad del agua, por lo que, mediante un diagrama de Pareto, a continuación, se muestran los datos promedios de los meses del año 2022, para evaluar el comportamiento de este parámetro físico del líquido vital.

Tabla 3. Turbiedad promedio embalse El Azúcar año 2022.

Mes 2022	Turbiedad	%	Turbiedad acumulada	% Acumulado
Abril	4,93	14,12%	4,93	14,12%
Marzo	4,55	13,03%	9,48	27,16%
Junio	4,13	11,83%	13,61	38,99%
Mayo	4,13	11,83%	17,74	50,82%
Febrero	2,77	7,93%	20,51	58,75%
Julio	2,76	7,91%	23,27	66,66%
Agosto	2,38	6,82%	25,65	73,47%
Septiembre	2,14	6,13%	27,79	79,60%
Enero	2,00	5,73%	29,79	85,33%
Octubre	1,95	5,59%	31,74	90,92%
Noviembre	1,64	4,70%	33,38	95,62%
Diciembre	1,53	4,38%	34,91	100,00%
	34,91	100,00%		

Nota: Fuente AGUAPEN-EP.

Fig. 1. Diagrama de Pareto. Turbiedad embalse El Azúcar.

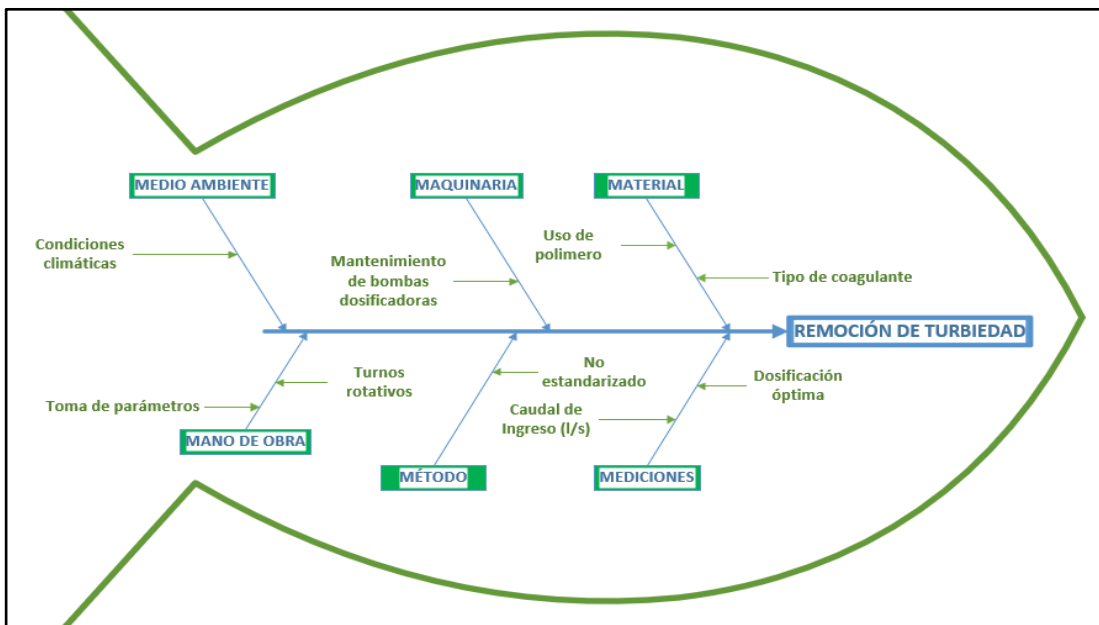


Nota: Elaborado por autor.

Este diagrama, nos muestra que en los meses de abril, marzo, junio y mayo se genera el 50,82% de valores altos de turbiedad del agua cruda del embalse El Azúcar.

El diagrama de causa – efecto o de Ishikawa tipo 6M, detalla las causas que influyen en el efecto remoción de la turbiedad en el proceso de potabilización del agua.

Fig. 2. Diagrama de causa efecto 6M.



Nota: Elaborado por el autor.

El diagrama de causa – efecto de la figura, demuestra que la remoción de la turbiedad del agua influye considerablemente en la calidad del agua en proceso.

En base a la aplicación de estas herramientas y a la información existente en la PTAP Atahualpa las características físicas químico del agua se deben a varios factores entre los cuales se encuentran:

- ✓ Flujo de ingreso: depende de las bombas, el factor clima y las estaciones del año.
- ✓ Crecimiento de la población.
- ✓ Elegir el tipo de coagulante.
- ✓ Remoción de los sólidos en suspensión.
- ✓ Disminución de lodos de los decantadores.
- ✓ Ajustes de pH.
- ✓ Aumento del tiempo de carrera de los filtros.
- ✓ Influencia de los costos económicos (Pachacama-Llumiyinga, 2020).

Formulación del problema de investigación.

¿Cómo la aplicación del diseño de experimentos, permitirá mejorar el proceso de potabilización del agua en la empresa AGUAPEN-EP, Santa Elena-Ecuador?

Justificación de la investigación.

Desde 1980 hasta la época actual, se viene destacando el diseño de experimentos como un método importante para la solución de problemas que se originan en los procesos industriales, su ejecución consiste en la realización de varias pruebas con el objetivo de obtener resultados para un análisis estadístico y de esta manera llegar a las respuestas de las interrogantes planteadas (Mendoza-Gallardo et al., 2021).

Un proceso de producción puede optimizarse de varias maneras, una de ellas es mejorando la productividad, para lo cual se puede reducir la entrada de la materia prima mientras la salida puede permanecer constante. Otra forma es mantener constante el ingreso para aumentar las salidas (Fúquene & Yate, 2018).

La optimización de los procesos productivos resulta relevante y frecuentemente su estudio se realiza con la aplicación del diseño de experimentos (DOE) o los métodos de superficie de respuesta. Este último requiere de la selección y configuración de un diseño de experimentos, ajustar un modelo estadístico con las variables de estudio para

finalmente presentar los resultados en un rango máximo o mínimo en las regiones de estudio (Barrios et al., 2020).

En ese sentido con la Aplicación del Diseño de Experimentos para la Optimización del Proceso de Potabilización del Agua en la empresa AGUAPEN-EP, Santa Elena – Ecuador, se pretende mejorar la producción de agua potable realizando ensayos de laboratorio a la muestra de agua cruda con diferentes coagulantes químicos y con la aplicación del DOE encontrar la dosis óptima que permita incrementar el caudal de ingreso para obtener más productividad manteniendo la calidad del agua en cumplimiento de la normativa NTE INEN 1108 sexta revisión 2020-04.

Alcance de la Investigación.

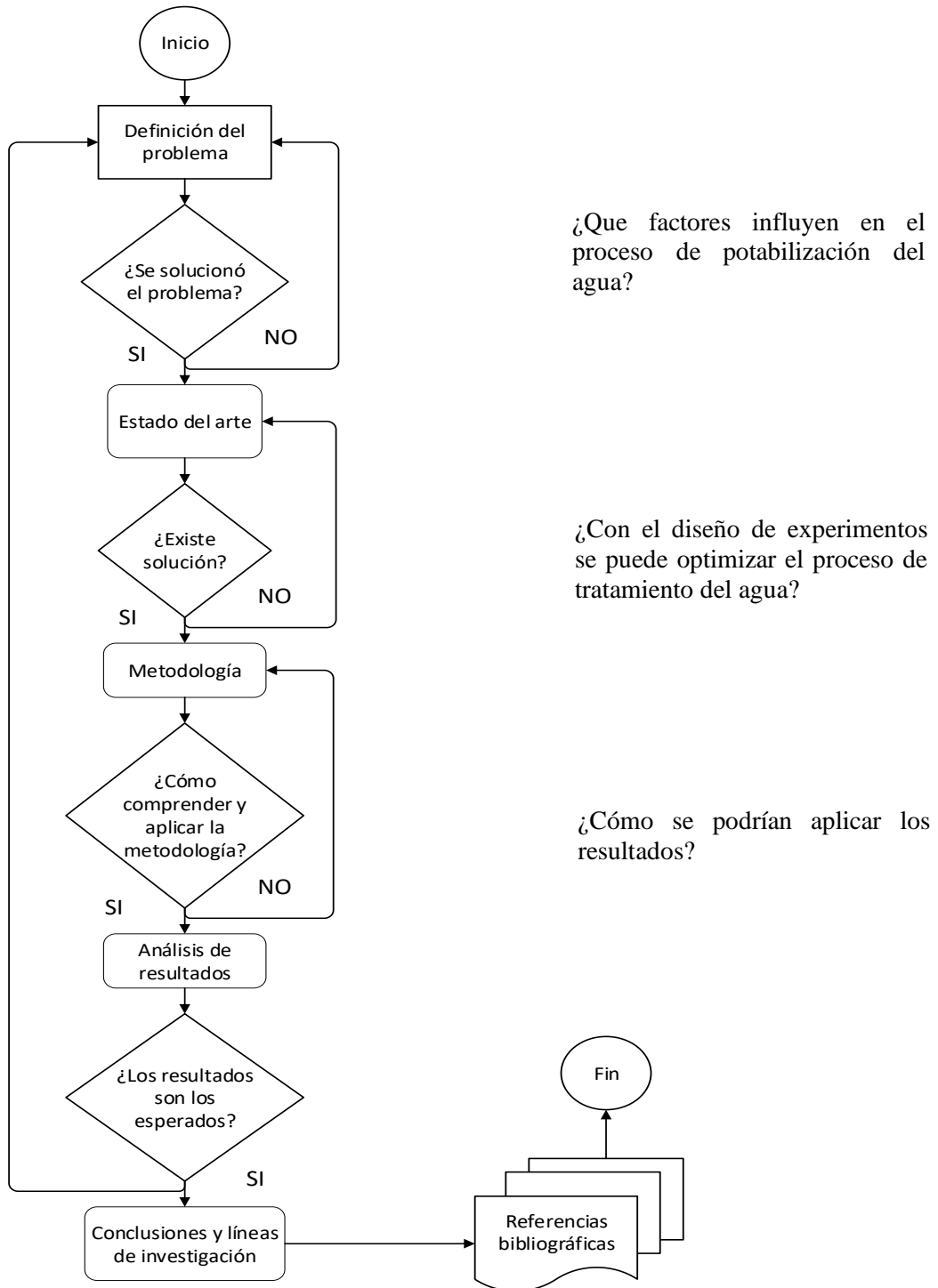
Seleccionar el coagulante ideal y la dosis adecuada para la clarificación del agua, es de vital importancia para lograr optimizar el proceso de potabilización, pues uno de los factores que influyen determinadamente es el costo beneficio de los productos químicos utilizados en el tratamiento.

El presente estudio Aplicación del Diseño de Experimentos para la Optimización del Proceso de Potabilización del Agua en la Planta Atahualpa de la empresa AGUAPEN-EP, ubicada en el cantón Santa Elena – Ecuador, permitirá la manera de agregar la dosis ideal del químico coagulante en el tratamiento del agua para minimizar el uso de los químicos, reducir la retención de los sólidos suspendidos, incrementar el porcentaje de remoción de las partículas coloidales, mejorar el periodo de colmatación de los filtros e incrementar la producción de agua potable con la alternabilidad del uso de las bombas de agua cruda.

Los análisis físicos químicos y bacteriológicos del agua cruda son diferentes de acuerdo al lugar de origen, lo que quiere decir que el agua de fuentes naturales de la región costa tiene parámetros diferentes al agua cruda de los páramos de la región sierra, lo que origina que no todos los procesos de tratamiento de agua sean iguales.

Los resultados obtenidos servirán como base para considerar el mejoramiento de los procesos efectuados en las Plantas de Tratamiento que requieran de materia prima de iguales condiciones, tanto para plantas asentadas en la costa, no así para plantas ubicadas en la sierra porque difieren en las características de agua cruda.

Fig. 3. Diagrama de flujo sobre la problemática de investigación.



Nota: Elaborado por el autor.

Objetivos.

Objetivo General

Aplicar el diseño de experimentos para optimizar el proceso de potabilización del agua en la Planta Atahualpa de AGUAPEN-EP.

Objetivos Específicos

- ✓ Elaborar un estado de arte mediante la revisión de fuentes literarias para proporcionar la información necesaria para la optimización del proceso de potabilización del agua.
- ✓ Establecer una metodología mediante ensayos de laboratorio aplicando el diseño factorial para la optimización de los insumos químicos utilizados en el procesamiento de la materia prima.
- ✓ Plantear con los resultados obtenidos las mejoras para la optimización del proceso de potabilización del agua en la Planta Atahualpa de AGUAPEN-EP.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes investigativos.

El diseño de experimentos influye en la toma de decisiones de los altos niveles jerárquicos de una empresa, como, por ejemplo, en los proveedores, la compra de materia prima, entre otros casos, son fundamentales para la toma de decisiones que en cierta manera son planeadas sin ningún tipo de criterio o análisis. (Delgado, 2020).

Un diseño de experimentos factorial se aplica en las ramas de la ingeniería para variar intencionalmente los factores de estudio de distinta manera, realizando la combinación de todos los tratamientos para obtener los valores de las variables de respuesta en cada uno de los ensayos (Bravo et al., 2020).

Una de las soluciones para descifrar los problemas de optimización fue la de Khuri y Conlon en 1981, quienes crearon un algoritmo las funciones de respuesta de las variables representadas por los modelos de regresión polinómica (Barrios et al., 2020).

Un estudio realizado en el agua del río Palacé en Colombia, en el año 2016 indicó que para tener eficiencias mayores al 85% en los decantadores se requieren velocidades para sedimentación de los flóculos en un rango de 9,2 m/d a 14,4 m/d utilizando PAC como ayudante de coagulación (Fernández et al., 2021).

En una PTAP la etapa de coagulación es en donde se elimina la turbiedad del agua. El sulfato de aluminio es el coagulante más empleado en el tratamiento de agua en donde un pH de 6,5 a 7,0 remueve el 60 a 80% de sólidos suspendidos y con un pH mayor a 9,5 el porcentaje de remoción se incrementa a un 90%, tal es así que, en la evaluación de la eficiencia de una Planta Municipal en Colombia, se obtuvo un porcentaje de remoción de turbiedad de 98,7 % con este compuesto químico (Martínez-Orjuela et al., 2020).

Un estudio realizado en Riobamba Ecuador en el año 2020, acerca de la medición de los parámetros físico químicos del agua cruda, utilizó un diseño de experimentos de factorial 2 x 3 empleando el análisis de varianza y los gráficos factoriales para

determinar la diferencia significativa en las muestras de agua de dos localidades en la provincia de Chimborazo (Carrera-Oña et al., 2020).

La dosis óptima de coagulante utilizado en una PTAP se determina mediante un test de jarras. Para el ensayo de jarras se requiere conocer los valores del pH, turbiedad y color, para lo cual se utilizan varias dosis del coagulante permitiendo la reducción de los sólidos en suspensión y materia orgánica, simulándose así los procesos a gran escala en las PTAP, permitiendo así ajustar el valor de pH de cada muestra hasta llegar a los mejores donde la coagulación alcanza los mejores resultados y dependiendo también del tipo de reactivo químico a emplear (Fúquene & Yate, 2018).

En la actualidad existen softwares estadísticos para realizar análisis de varianza a los diferentes factores de estudio de un caso de estudio, para conocer la incidencia en las variables de respuesta. El uso del software Minitab permitirá el análisis de varianza, considerando los grados de libertad, la suma ajustada de cuadrados, cuadrados medios ajustados, valor de F y valor p . El valor p indica la significancia de la variable de respuesta, en donde si p es menor que 0.05 significa que el nivel de confianza es del 95% (Arellano & Peña, 2020).

Los resultados de un ensayo a una muestra de agua del sector Popayán en Colombia, determina que el valor promedio de turbiedad fue de 6,5 NTU y los porcentajes obtenidos fueron FeCl₃ (80,7%), FeCl+PAC como ayudante de coagulación (80,2%), FeCl₃+PAC como ayudante de floculación (78,1%) y PAC (47,1%), lo que quiere decir que los tratamientos con hierro en esta prueba tienen el mejor rendimiento que el PAC (Yanza-López et al., 2019).

Los resultados en laboratorio permiten aplicarlos a gran escala en los Módulos de Potabilización MPA, en donde se refleja el comportamiento de las sustancias coagulantes en cada una de las etapas del proceso de potabilización, lo cual implica el caudal de captación, la remoción de sólidos en suspensión, la generación de lodos para la decantación, el tiempo de colmatación de los filtros, la cantidad de químico empleado y la cantidad de agua potable producida.

La falta de información de datos históricos, la complejidad en el procesamiento de datos, el desconocimiento de la metodología y la falta de conocimiento para aplicar

los métodos son causas que no permiten la implementación del diseño de experimentos en la industria (Delgado, 2020).

Con estos antecedentes resulta necesario aplicar el diseño de experimentos para optimizar principalmente los insumos químicos utilizados en el proceso de potabilización del agua en la Planta Atahualpa de tal manera que se obtengan un factor costo beneficio favorable para la empresa.

1.2 Estado del arte.

El estado del arte es una propuesta metodológica donde se realiza el estudio del trabajo investigativo en función del aprendizaje (Guevara, 2016). También se puede decir que un estado del arte es la revisión sistemática de la bibliografía de un determinado objeto de estudio y sirve como una guía didáctica para la ejecución de trabajos de investigación (Vargas et al., 2015).

La elaboración del estado de arte de este trabajo de investigación, se estructuró de los siguientes componentes: planteamiento del problema, análisis en base de datos, revisión de los artículos, presentación de los datos y el análisis de las estadísticas (Moreno et al., 2018).

Se definió como tema “diseño de experimentos para la optimización del proceso de potabilización”. En base al tema de investigación, se aplicaron las siguientes ecuaciones de búsqueda y palabras claves:

Tabla 4. Ecuaciones de búsqueda.

Ecuación de búsqueda	Scopus	Dimensions	Sciencedirect	Redalyc	Dialnet	SciELO
“Experiment desing and optimization”	186					
“Drinking wáter”		142				
“Diseño de experimentos”			24	9	493	157
“Agua potable”				29	1772	674
“Policloruro de aluminio”				4	19	9
Sulfato de aluminio				41	86	29
Total				3517		

Nota: Elaborado por el autor.

Los 3517 documentos encontrados fueron revisados aplicando criterios de selectividad. Se incluyó trabajos que contengan estudios de la aplicación del diseño de experimentos en el tratamiento de agua, que los insumos químicos optimicen el proceso de potabilización, que la información sea redactada en español e inglés. Como criterios de exclusión se tomó en cuenta estudios no realizados en un periodo de los últimos cinco años, las fuentes no confiables e información no relacionada con la temática.

Los artículos encontrados en las bases Scopus y Dimensions se sometieron a una revisión sistemática para por medio del software VOSviewer, procesar los registros bibliográficos para seleccionar todos los que presenten similitudes relacionadas al tema de estudio (Galdo, 2021).

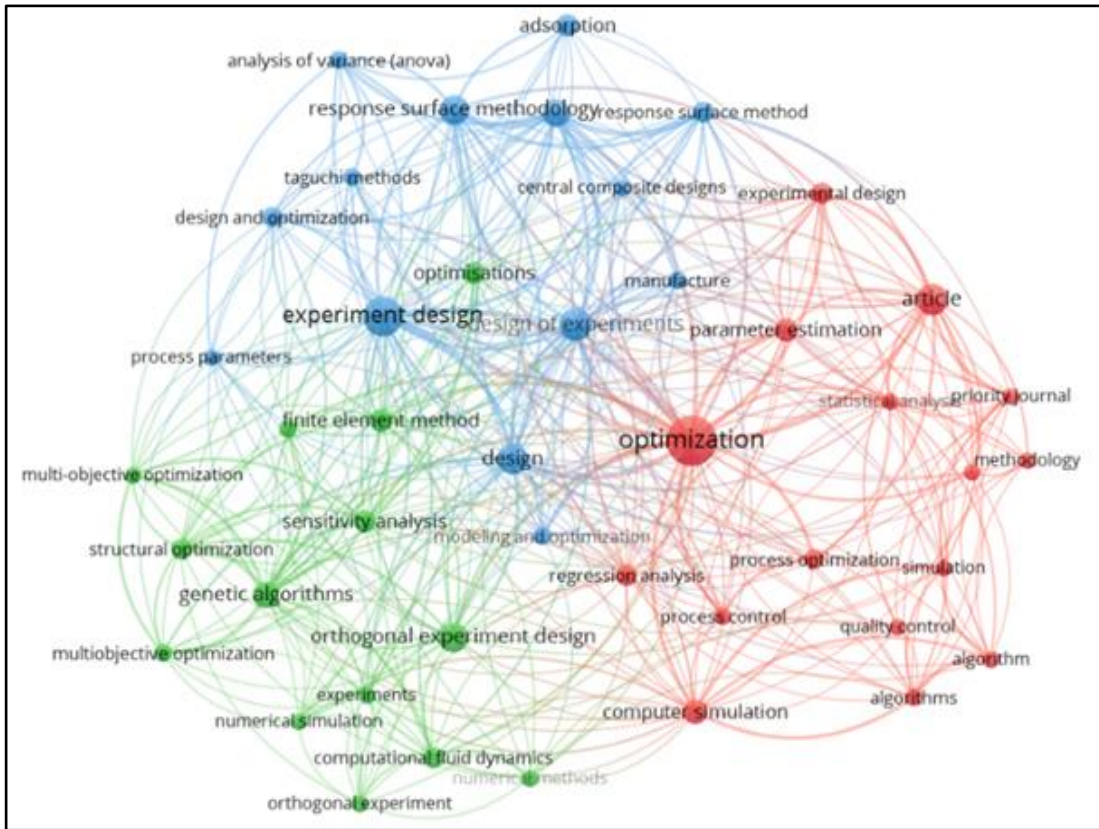
El mapa a continuación muestra las palabras claves más citadas en los artículos científicos encontrados en la base de Scopus. La red está compuesta por tres cluster, en donde se observa que los términos optimization y experiment design, son los más citados.

Fig. 4. Listado de palabras claves ordenadas.

Selected	Keyword	Occurrences	Total link strength
<input checked="" type="checkbox"/>	optimization	50	124
<input checked="" type="checkbox"/>	experiment design	31	76
<input checked="" type="checkbox"/>	design	17	72
<input checked="" type="checkbox"/>	design of experiments	20	72
<input checked="" type="checkbox"/>	surface properties	14	66
<input checked="" type="checkbox"/>	response surface methodology	16	59
<input checked="" type="checkbox"/>	genetic algorithms	13	54
<input checked="" type="checkbox"/>	article	18	51
<input checked="" type="checkbox"/>	computer simulation	11	43
<input checked="" type="checkbox"/>	response surface method	8	41
<input checked="" type="checkbox"/>	finite element method	10	40
<input checked="" type="checkbox"/>	orthogonal experiment design	16	39
<input checked="" type="checkbox"/>	experimental design	8	37
<input checked="" type="checkbox"/>	sensitivity analysis	9	35
<input checked="" type="checkbox"/>	structural optimization	8	30
<input checked="" type="checkbox"/>	regression analysis	8	29
<input checked="" type="checkbox"/>	statistical analysis	5	29
<input checked="" type="checkbox"/>	parameter estimation	10	28
<input checked="" type="checkbox"/>	algorithms	6	26

Nota: Software VOSviewer.


Fig. 5. Red de palabras claves.



Nota: Elaborado por el autor.

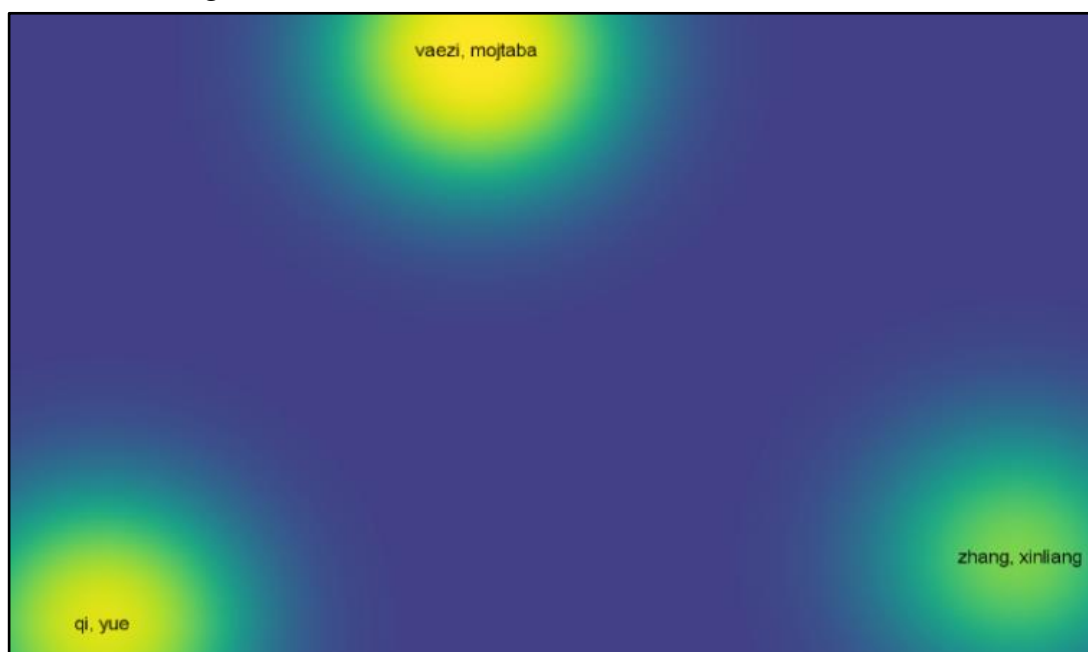
El siguiente cuadro obtenido de la base de documentos de Dimensions muestra la red con los autores que tienen más cita en los artículos. La red se compone de tres cluster, en donde se observa que los autores Vaezi Mojtaba, Qi Yue y Zhang Xinliang son los más referenciados.

Fig. 6. Lista de autores citados en los artículos.

Selected	Author	Documents	Citations	Total link strength 
<input checked="" type="checkbox"/>	vaezi, mojtaba	12	43	12
<input checked="" type="checkbox"/>	qi, yue	8	20	10
<input checked="" type="checkbox"/>	zhang, xinliang	4	35	6

Nota: Software VOSviewer.

Fig. 7. Visualización de la densidad de los autores más citados.



Nota: Elaborado por el autor.

Analizada toda la información, se obtienen 149 artículos de mayor interés para finalmente, realizando un análisis y una lectura detallada se escogieron 31 artículos científicos para la elaboración del estado del arte.

Tabla 5. Matriz referencial de artículos científicos.

N.º	Autor	Propuesta	Método	Resultados
1	(Araque, 2022)	Planta de tratamiento de agua potable	Descripción de los principales procesos de potabilización	Conocimiento de las etapas de potabilización
2	(Arellano eat al., 2018)	Los consumos de agua potable en poblaciones ecuatorianas.	Uso del software estadístico R con criterio de correlación.	Los estratos socioeconómicos muestran diferencias significativas de consumo de agua potable en el sector residencial.
3	(Arellano-Peña,2020)	Modelos de regresión para el consumo de agua potable.	Validación a través de pruebas de normalidad y homocedasticidad.	Los datos de consumo per cápita de agua potable cumplen con la prueba de normalidad y sus valores están distribuidos de forma aleatoria y balanceada.
4	(Barrios-Córdoba eat al., 2020)	Estudio comparativo de técnicas de optimización con diseños experimentales.	Estudios de optimización utilizando los métodos de diseño experimental y superficie de respuesta.	Aplicación de los diferentes métodos.
5	(Basantes-Mendoza &	Modelo de costeo ABC para la producción de	Aplicación de los campos exploratorios -	Se realizó un mapeo de todos los inductores de costo inmersos en cada etapa.

	Mendoza-Vera 2022)	agua potable de una empresa.	descriptivos debido a la falta de estudios de similares al tema.	
6	(Bejarano eat al., 2022)	Optimización del tratamiento de agua potable para consumo humano.	Investigación cuantitativa y cualitativa con diseño metodológico descriptivo y exploratorio.	Aplicación del test de jarras.
7	(Carrera-Oña et al., 2020)	Diseño de experimentos en el análisis de concentración de nitratos y niveles de pH en las muestras de agua.	Análisis con varias técnicas instrumentales y analíticas.	Desarrollo de los análisis de varianza para la concentración de nitratos y nivel de pH
8	(Correa et al., 2017)	Determinación de la dosis de policloruro de aluminio en una Planta de Tratamiento.	Establecer dosis para cada concentración con el fin de identificar la concentración e intervalo para la dosis óptima.	Se muestran los resultados de los ensayos con las diferentes dosis.
9	(Delgado, 2020)	Uso del diseño de experimentos para la innovación de una empresa.	Mostrar la utilidad del diseño experimental con especial énfasis en el enfoque de procesos y su aplicabilidad en la innovación.	Se muestra el modelo matemático del diseño de experimentos, el análisis de los datos y la interpretación de los resultados.
10	(Fernández et al., 2020)	Sedimentabilidad de partículas en aguas con alto contenido de color y baja turbiedad.	Uso de equipo de prueba de jarras y agua cruda de una PTAP.	Generación de costos menores en la aplicación de productos químicos y disminución del agua en proceso.
11	(Fernández et al., 2020)	Uso integral de herramientas para evaluar y mejorar el rendimiento de la producción.	Mejoramiento de la línea de producción con la implementación del diseño de experimentos, simulación discreta y técnica Kanban.	Al unir las metodologías como el DOE, simulación discreta y herramientas Lean se pueden identificar los factores que inciden en los retrasos de los procesos.
12	(Huamán eat al., 2020)	Mejoramiento de la cantidad de químicos para la producción de agua potable.	Algoritmos genéticos como técnicas de optimización de búsqueda y aprendizaje del proceso de evolución natural y genética.	Se muestra la caracterización del agua
13	(León-Chimbolema et al., 2022)	Rediseño de una planta potabilizadora de	Toma de muestra de agua cruda para la caracterización fisicoquímica	Se detalla los resultados de la caracterización fisicoquímica y bacteriológica.

		agua para consumo humano.	microbiológica utilizando el método experimental.	
14	(Lozano, 2019)	Recomendaciones de optimización de plantas de agua potable, en base a su funcionalidad y durabilidad.	Recolección, clasificación y análisis de información de campo de trabajos de optimización de plantas de agua potable.	Descripción de diferentes situaciones encontradas en el trabajo de campo.
15	(Lugo-Lugo, 2020)	Beneficios socio ambientales por potabilización del agua.	Uso de encuesta para diagnosticar la problemática de la gestión del agua.	Uso de encuesta para diagnosticar la problemática de la gestión del agua.
16	(Martínez-Orjuela et al., 2020)	Evaluación de la turbiedad como indicador de una Planta Potabilizadora de agua.	Evaluación de la correlación de los parámetros de calidad del agua.	Existencia de una correlación lineal positiva de media a fuerte entre la turbidez y otros parámetros.
17	(Mendoza-Gallardo et al., 2021)	Comparación de métodos de optimización con múltiples variables de respuesta.	Definición de las diferentes técnicas para la optimización de múltiples variables de respuesta.	Se empleó un diseño de para las variables controlables con cuatro réplicas de la respuesta bivariado.
18	(Moreno-Cabrera eat al., 2021)	Tratamiento de aguas almacenadas en depósitos mediante la aplicación de coagulantes.	Mediante el test de jarras se procedió a determinar el tratamiento del coagulante óptimo.	Una combinación entre coagulantes de origen químico y vegetal proporcionan la mayor eficacia en términos de remoción de partículas suspendidas.
19	(Ortega-Sánchez, 2021)	Tratamientos para la potabilización de aguas residuales.	Definición de los diferentes métodos.	Implementación de tratamientos terciarios en poblaciones de bajos recursos.
20	(Pabón eat al., 2020)	Contaminación del agua por metales y aplicación de tecnologías para la remoción.	Aplicación de técnicas como alternativas para ayudar en la determinación del contenido de metales en el agua.	Estudio de técnicas de post tratamiento de agua.
21	(Pachacama, 2020)	Aplicación de productos para potabilización de agua.	Definiciones de términos.	Motivación de estudio e investigación a los procesos de tratamiento.
22	(Pérez eat al., 2019)	Diseño de experimentos factoriales 2^n para su análisis.	Representación de los tratamientos por la combinación de los niveles de dos o más factores.	Análisis de varianza usando el método estadístico general y una comparación de medias.
23	(Pulgarín eat al., 2019)	Determinación de los coeficientes del modelo de San, el cálculo del porcentaje de	Pruebas de laboratorio para comprender el estudio del problema.	Se elabora una tabla de isoconcentración y se realiza una regresión lineal múltiple para determinar los

		remoción de partículas en el agua.		coeficientes del modelo de San.
24	(Rodríguez-Díaz et al., 2019)	Eficiencia de la aplicación de policloruro de aluminio en una Planta Industrial.	Uso del método de ensayo test de jarras.	La remoción en los parámetros evaluados hace del PAC una excelente opción para el postratamiento de aguas de efluentes biológicos.
25	(Ruiz et al., 2020)	Propuesta de solución a sistemas de tratamiento de aguas.	Aplicación de métodos y técnicas de corte científico.	Se expone el enfoque del proyecto.
26	(Samaniego et al., 2020)	Optimización de coagulantes para la producción de agua potable.	Uso de algoritmos genéticos como técnicas de optimización.	Buena aproximación a los datos reales obtenidos de las pruebas experimentales.
27	(Torres-Lozada et al., 2022)	Aplicación de modelos de predicción en los lodos originados por las plantas potabilizadoras de agua.	Análisis del modelo en la generación de lodos del agua en proceso.	Análisis de las variables de turbiedad y color aparente del agua cruda, clarificada y filtrada.
28	(Torres-Silva et al., 2020)	Análisis físico químico e influencia de los minerales en el agua potable de una Planta de Tratamiento.	Muestro y análisis del agua de la EPMAPS - Quito.	La concentración de los parámetros de calidad influye en la calidad del agua.
29	(Torres-Sosa et al., 2020)	Diseño de experimentos para optimizar la resistencia de un fusible.	Implementación del diseño de experimentos de manera secuencial.	Verificación de nuevos parámetros óptimos sugeridos por el diseño de experimentos.
30	(Yanza-López et al., 2019)	Evaluación del FeCl ₃ y PAC en la potabilización del agua con alto grado de turbiedad.	Recolección de muestras de agua cruda y análisis de cada una de ellas.	Se evidencia a la combinación FeCl ₃ +PAC como ayudante de coagulación con el mejor rendimiento.
31	(Zúñiga et al., 2022)	Métodos de remoción de metales en agua para el consumo humano.	Técnicas empleadas para la remoción de sustancias.	Se exponen las técnicas químicas y/o físicas para la remoción de metales pesados.

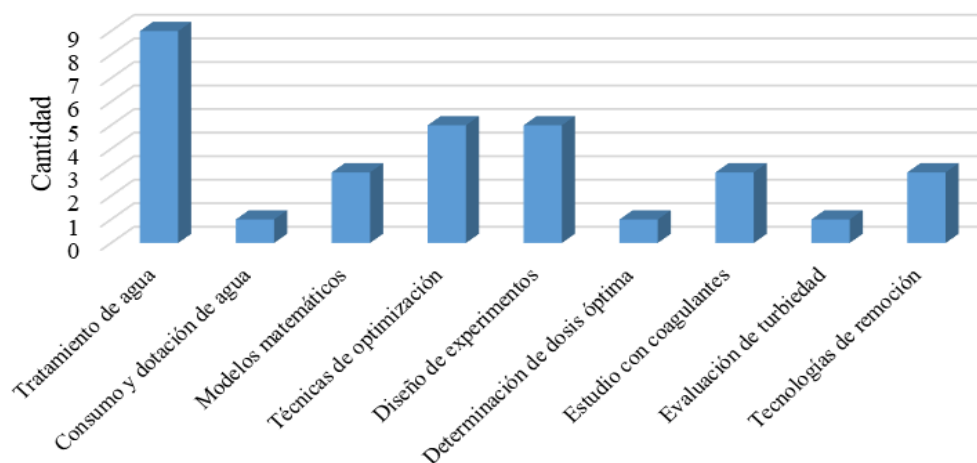
Nota: Elaborado por el autor.

Los 31 artículos científicos seleccionados para la elaboración del estado del arte se clasifican en los siguientes temas:

Tabla 6. Clasificación por temas de los artículos.

Temas	Cantidad
Tratamiento de agua	9
Consumo y dotación de agua	1
Modelos matemáticos	3
Técnicas de optimización	5
Diseño de experimentos	5
Determinación de dosis óptima	1
Estudio con coagulantes	3
Evaluación de turbiedad	1
Tecnologías de remoción	3
Total	31

Temas de los artículos científicos



Nota: Elaborado por el autor.

1.2.1 Variable independiente: Diseño de Experimentos.

El diseño de experimentos se emplea para conocer los procesos realizando ensayos adecuados en cantidades necesarias, no obstante, es necesario identificar primeramente el tipo de diseño a emplear. Ejemplo un diseño factorial de 2^k con $N=2^k$ tratamientos determina todas las combinaciones posibles de los factores, tal es así, un factor de potencial de hidrogeno pH se puede registrar en un nivel alto y un nivel bajo, 8 y 6 respectivamente. (Torres-Sosa et al., 2020).

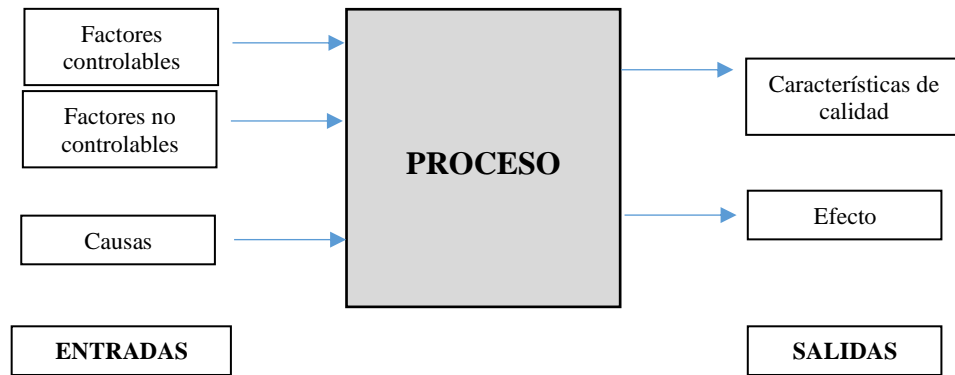
Algunos problemas donde se puede aplicar el análisis y el diseño de experimentos son:

- ✓ Comparación de dos o más materiales para elegir el de mejor rendimiento.
- ✓ Determinar los factores de un proceso que influyen sobre el producto final.
- ✓ Encontrar las características de operación que mejoren el desempeño de los procesos.

- ✓ Apoyar el diseño de nuevos procesos (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

En todo proceso intervienen diferentes tipos de variables, por medio de las cuales se conoce los resultados de cada prueba experimental.

Fig. 8. Variables de un proceso.



Nota: Elaborado por el autor.

Los aspectos más importantes que se deben tomar en cuenta para la selección de un diseño de experimentos, son: el objetivo del experimento, el número de factores, el número de niveles, los efectos que se pretende investigar y el costo del experimento.

En el campo industrial se requieren estudiar ciertos factores sobre la probabilidad de que los efectos de algún componente se modifiquen según el nivel de los otros, generándose así una correlación. Adicionalmente en la práctica suelen presentarse varias situaciones que afectan a la productividad, es así donde se originan la existencia de diferentes clases de diseños de experimentos, por lo que resulta necesario seleccionar el método adecuado que se adapte a las condiciones de la situación (Mendoza-Gallardo et al., 2021).

Fig. 9. Clasificación de los diseños de experimentos.

1.- Diseños para comparar dos o más tratamientos.	Diseño completamente al azar. Diseño de bloques al azar. Diseño cuadro latino y grecolatino.
2.- Diseños para estudiar el efecto de los factores sobre la variable de respuesta.	Diseños factoriales 2^k . Diseños factoriales 3^k . Diseños factoriales fraccionados 2^{k-p} .
3.- Diseños para la optimización de procesos.	Diseños para el modelo de primer orden. Diseños factoriales 2^k y 2^{k-p} . Diseño de Plaket-Burman. Diseño simplex.
	Diseños para el modelo de segundo orden. Diseño de composición central. Diseño de Box-Behnken. Diseños factoriales 3^k y 3^{k-p} .
4.- Diseños robustos.	Arreglos ortogonales (diseños factoriales). Diseños con arreglos interno y externo.
5.- Diseños de mezclas.	Diseño simplex-reticular. Diseño simplex con centroide. Diseño con restricciones. Diseño axial.

Nota: Fuente Análisis y diseño de experimentos (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

1.2.2 Variable dependiente: Potabilización del agua – Definiciones.

El agua es un compuesto químico que se encuentra en la naturaleza formada por los elementos hidrogeno (dos átomos) y oxígeno (un átomo), el cual es vital para los seres humano.

En términos generales, se destacan los siguientes tipos de agua:

Agua cruda. - Es el agua que se encuentra en la naturaleza sin recibir ningún tipo de tratamiento para alterar sus características físicas, químicas y bacteriológicas (NTE INEN 1108, 2014).

Según el tipo de contaminante presente en el agua natural, estos pueden ser:

- Contaminante físico: determinado por todo tipo de partícula que originan turbiedad, color, sabor y olor al agua.
- Contaminante químico: es la presencia de todo elemento y compuesto químico como el plomo, aluminio, cobre, cloro, nitritos, sulfatos hidróxidos, entre otros, que en altas concentraciones pueden causar problemas a la salud.

- **Contaminante biológico:** son los microorganismos patógenos como las bacterias, virus, hongos, algas y protozoos presentes en el agua (Carreño et al., 2019).

Tratamiento. – Es el proceso donde se efectúan las acciones para mejorar las características físicas, químicas y bacteriológicas del agua volviéndola apta para el consumo humano (Carreño et al., 2019).

Agua para consumo humano. – Independientemente de su origen y distribución, es el agua utilizada para beber, preparar los alimentos u otras aplicaciones domésticas; cuyas características físicas, químicas y bacteriológicas garantizan su aceptabilidad para su uso diario (NTE INEN 1108, 2020).

NTE INEN 1108.- Norma Técnica Ecuatoriana que contiene los requisitos que debe cumplir el agua para consumo humano, suministrada por medio de redes de distribución (ARCA, 2022).

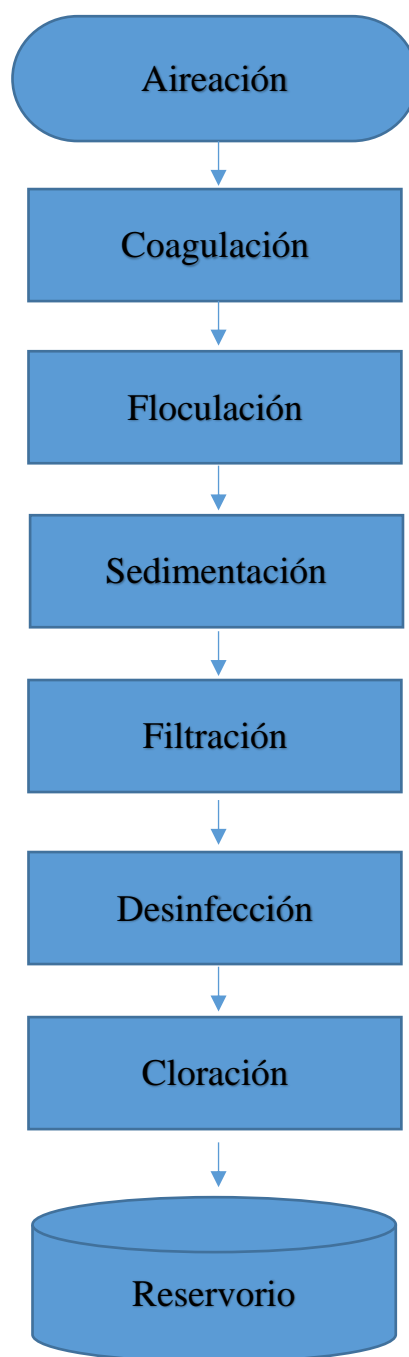
Parámetros. – Características físicas, químicas y microbiológicas que son medibles para determinar las condiciones de la inocuidad del agua (ARCA, 2022).

Límite permitido. – Valor de un requisito dentro de un ámbito científico y tecnológico que no ocasiona riesgo para la salud humana (NTE INEN 1108, 2020).

En base a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1108, sexta revisión 2020-04; el agua para consumo humano debe cumplir con los requisitos indicados en la Tabla 1. Ver Anexo A.

Dependiendo las características físicas químicas y bacteriológicas del agua, las fuentes de captación y el lugar de asentamiento, las PTAP varían su diseño, estructura, procesos y funcionamiento, no obstante, generalmente se componen de las siguientes unidades de tratamiento:

Fig. 10. Diagrama de flujo de una PTAP.



Nota: Elaborado por el autor.

Aireación.

Básicamente consiste en la remoción de gases de la masa de agua a tratar. Entre ellos se encuentran: el gas carbónico, el gas sulfhídrico, cloro en exceso, sustancias oleaginosas y la descomposición de materia orgánica (Araque, 2022).

Coagulación.

Es el método mediante el cual se logra la desestabilización de un coloide para facilitar su aglomeración (Pabón et al., 2020). Para este efecto se emplean sustancias químicas denominadas coagulantes, siendo los más comunes los compuestos de aluminio. La adición del coagulante se realiza en los resaltos hidráulicos, cámaras y mezcladores mecánicos (Araque, 2022).

Floculación.

En la floculación las partículas coloidales ya desestabilizadas en la coagulación, se aglomeran para formar flocs de mayor tamaño y peso para que fácilmente se puedan decantar (Koutoudjian, 2019).

Sedimentación.

La sedimentación es la etapa en donde los sólidos suspendidos en el agua son separados por efecto de la gravedad, lo que quiere decir que los flóculos más densos se precipitaran al fondo de los decantadores, para posteriormente ser evacuados. (Castellanos, 2017).

Filtración.

Es la etapa en donde se remueven las partículas pequeñas aún presentes en el agua, transportándola por medio de un material poroso. La capa del lecho filtrante puede estar formada por los siguientes materiales: antracita, arena, carbón activado, grava, entre otros (Pachacama-Llumiquinga, 2020).

Desinfección.

Parte del proceso de potabilización del agua en donde se añade cloro al agua para conseguir su desinfección. Se puede utilizar cloro líquido, gas cloro e hipoclorito de calcio (Araque, 2022).

Tanque de almacenamiento.

Los reservorios son lugares en donde se deposita el agua potable lista para su distribución a los consumidores. Su tamaño está en función de la capacidad de la Planta, la población y las redes de distribución (Araque, 2022).

1.2.3 Relación y resultados entre el DOE y el proceso de potabilización del agua.

Con mucha frecuencia en la industria y en las áreas científicas se obtienen información sobre múltiples variables de respuesta para un conjunto de variables controlables, por tal motivo es necesario encontrar métodos que permitan optimizar los procesos cuyo producto final consista en más de una característica de la calidad (Mendoza-Gallardo et al., 2021).

El consumo de agua potable aumenta cuando crece el número de personas por familia, es por ello que la categorización de las variables, así como los modelos matemáticos proporcionan herramientas para la estabilidad y optimización del agua potable (Arellano & Peña, 2020).

El diseño de experimentos factoriales empleando paquetes estadísticos simplifica el tiempo, los cálculos y permite el análisis de varianza del conjunto individual o de varios factores estableciendo los modelos lineales y los procedimientos que resultan de los cálculos en los tratamientos (Pérez et al., 2021).

Los resultados que se obtienen en el área de Control de Calidad son procesados en el software Minitab para obtener las respuestas del diseño de experimentos planteado o ajustado al modelo matemático requerido (Ulibarrie et al., 2019).

La situación planteada en el presente trabajo investigativo es considerada para su aplicación a nivel industrial, pues con la recopilación de la información se puede lograr mejorar las condiciones y reducir la variación de los procesos, por lo que el diseño de experimentos se hace importante dentro de la rama de la ingeniería industrial. (Mendoza-Gallardo et al., 2021)

1.3 Empresa Pública Municipal Mancomunada AGUAPEN-EP.

La Empresa Pública AGUAPEN-EP, es la encargada de los servicios públicos de agua potable y de alcantarillado sanitario en la provincia de Santa Elena.

Misión.

Distribuir agua potable de calidad y en cantidad, así como también el mantenimiento del sistema de alcantarillado sanitario y pluvial de la provincia de Santa Elena, satisfaciendo las necesidades vitales del ser humano preservando el entorno ambiental.

Visión.

Ser una empresa pública moderna de tecnología de punta a nivel local y nacional brindando los servicios públicos con alta responsabilidad a los consumidores, mejorando el Talento Humano y asegurando la calidad de vida de los usuarios.

Sistema de abastecimiento de agua potable.

Un sistema de distribución de agua potable está formado por estructuras de hormigón o metálicas y consta de los procesos de la captación, conducción, procesamiento, almacenamiento y distribución del agua (NTE INEN 1108, 2020).

La materia prima, es decir el agua cruda para el procesamiento en la PTAP Atahualpa de AGUAPEN-EP, proviene desde el embalse Chongón impulsada por grupos de bombeo a través del canal de conducción Chongón Sube y Baja hasta la descarga en los cauces de los ríos que alimentan la presa de El Azúcar en el cantón Santa Elena, la cual tiene una capacidad de 80 Hm³. Este canal es de cielo abierto con revestimiento de una membrana de polietileno de alta densidad, de sección trapezoidal revestido de hormigón con una pendiente, dimensionado para la conducción de un caudal de 9,2 m³/seg.

El agua del embalse El Azúcar se transporta por medio del canal de conducción abierto Azúcar – Rio Verde hasta el sifón Guayacán y de aquí hasta la Estación de Bombeo de AGUAPEN-EP, ubicada en el sector San Rafael. En este canal de conducción, existen compuertas que permiten regular el nivel de agua permanentemente.

Fig. 11. Trasvase Daule Santa Elena.



Nota: Fuente Cedege.

Estación de bombeo de agua cruda. Sector San Rafael.

El agua cruda ingresa a un lago artificial de 42000 m³ de capacidad total. Este reservorio tiene forma de “L” y está constituido por muros de terraplenado, con fondo y paredes recubiertas de película de polietileno de alta densidad. El nivel máximo de la laguna de agua cruda es de 35,41 m y el nivel mínimo es de 35,10 m.

En este sector se encuentran cinco bombas verticales, tres antiguas de origen brasileño y dos nuevas de origen americano, las cuales son accionadas por motores verticales superficiales. Cada bomba está conectada a una tubería de descarga individual, dotada de válvula de retención, dos válvulas de mariposa y una ventosa.

El agua cruda del sector San Rafael es transportada hacia la PTAP Atahualpa por medio de un acueducto de hierro dúctil de 900 mm. de diámetro y 9,11 Km. de longitud. Esta provista de válvulas de aire de triple función de 200 mm. de diámetro, válvulas de mariposa y válvulas de drenaje. Su profundidad media es de 2,5 m. la cual reduce su vulnerabilidad a eventos naturales.

Fig. 12. Estación de bombeo de agua cruda.



Nota: Fuente AGUAPEN-EP.

La Planta de Tratamiento de agua potable PTAP Atahualpa.

La Planta es de tipo convencional o ciclo completo y presenta una flexibilidad operativa para alternar caudales en función de la variación horaria, el clima y la demanda temporal de población turística que llega a la provincia de Santa Elena.

Siendo la capacidad nominal actual de la Planta un caudal de 800 l/s, el caudal mínimo que se puede tratar es de 200 l/s y el caudal máximo de 880 l/s. La producción diaria promedio es 69.120 m³.

Las operaciones unitarias que se realizan en la PTAP Atahualpa, corresponden básicamente a lo siguiente:

- ✓ Pre cloración, aplicación de químicos.
- ✓ Coagulación.
- ✓ Floculación.
- ✓ Sedimentación.
- ✓ Filtración.
- ✓ Post cloración.
- ✓ Almacenamiento.

Para cada una de las etapas del proceso de producción de agua potable, la PTAP dispone de las siguientes estructuras:

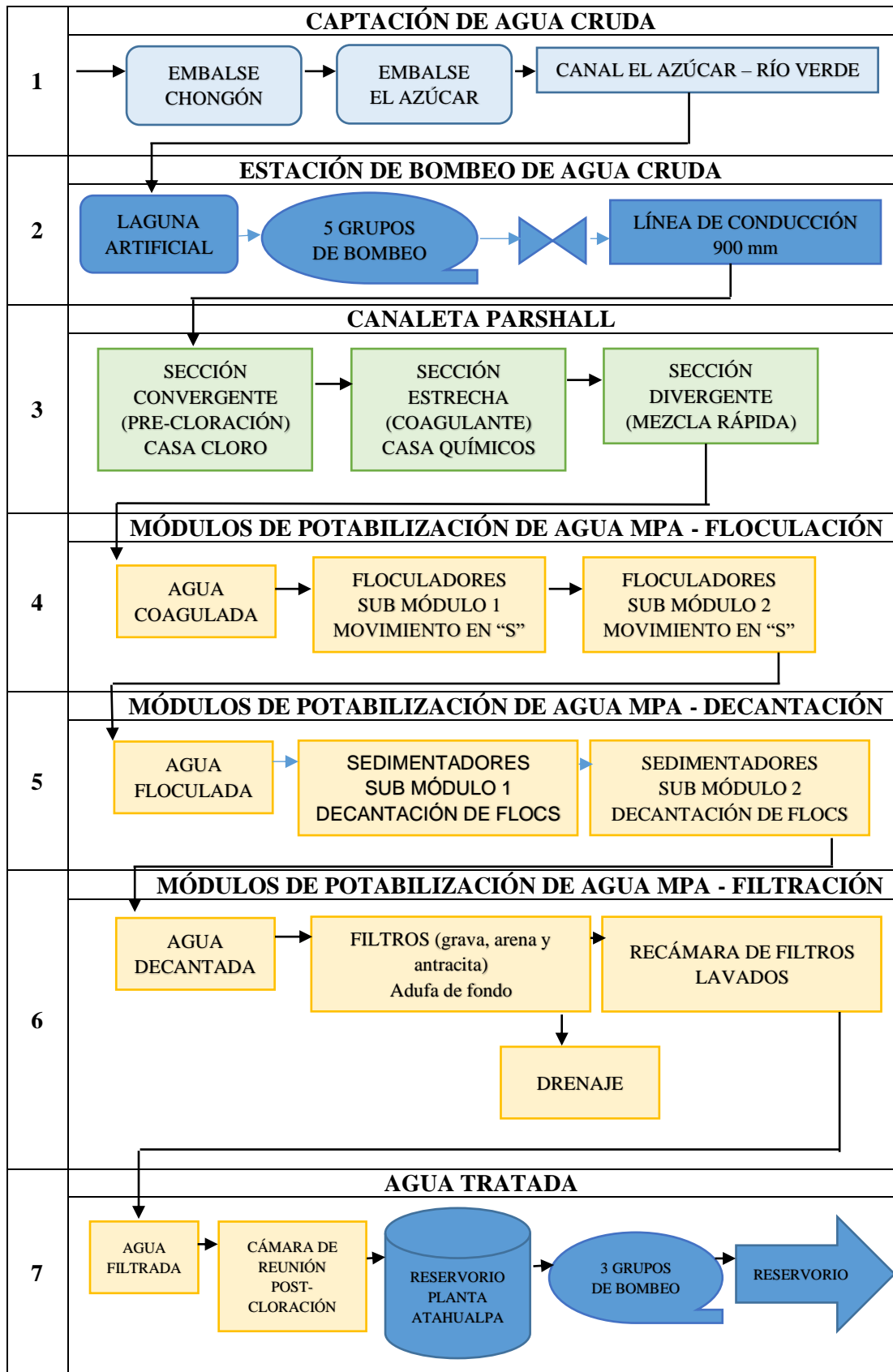
- ✓ Cámara de entrada medición y mezcla. (Canaleta Parshall).
- ✓ Módulos de Potabilización MPA 1 y 2.
- ✓ Casa químicos.
- ✓ Casa Cloro.
- ✓ Cámara de reunión.
- ✓ Reservorio de agua potable.
- ✓ Casa bomba.
- ✓ Laboratorio de Control de Calidad.

Fig. 13. Ubicación Planta Potabilizadora Atahualpa.



Nota: Fuente Google Maps.

Fig. 14. Diagrama de flujo. Proceso de potabilización del agua.



Nota: Fuente AGUAPEN-EP.

Descripción de las etapas del proceso de potabilización de la PTAP Atahualpa.

Cámara de entrada medición y mezcla (Canaleta Parshall).

Es una estructura hidráulica de hormigón, construida en una superficie aproximada de 115 m², donde ingresa el agua proveniente de la estación de bombeo de agua cruda. Está provisto de un aforador Parshall, un cajón de distribución y una salida a los MPA con dos ramas de tubería de 500 mm de diámetro y vertederos de rebose.

Dependiendo de la operatividad de los grupos de bombeo en la estación de agua cruda, el agua puede ingresar con un caudal de 440 l/seg. hasta 800 l/seg.

En esta estructura se realiza la mezcla del agua cruda con el coagulante y el cloro gas como desinfectante, químicos que ingresan por tuberías de PVC en cuyo interior circulan las sustancias químicas aplicadas al proceso.

Los químicos agregados, se mezclan rápidamente con la agitación vigorosa y la turbulencia hidráulica del resalto del flujo en la Canaleta Parshall para lograr el efecto de coagulación esperado.

Fig. 15. Cámara de medición y mezcla Canaleta Parshall.



Nota: Fuente AGUAPEN-EP.

Coagulación.

La coagulación consiste en la neutralización de las partículas o sólidos suspendidos, mediante la adición de un producto químico denominado coagulante con iones

positivos. Esta acción es rápida y ocurre en fracción de segundos pues la turbulencia del caudal del agua es fuerte para que la mezcla agua coagulante tenga su efecto en el menor tiempo posible para pasar a la etapa de floculación.

El agua mezclada con el coagulante, se deriva por gravedad a los MPA para que ingresen a los floculadores.

Módulos de potabilización de agua MPA 1 y MPA 2.

Son estructuras hidráulicas de hormigón armado, que ocupan un área aproximada de 940 m² por cada uno. Los MPA son piscinas superficiales sin cubierta, formadas por altos muros construidos con hormigón de alta resistencia, sobre una cimentación especial, dotada de drenaje de fondo.

Cada MPA está constituido por dos sub – módulos simétricos, los cuales comprenden de: un floculador hidráulico de pantallas verticales de flujo vertical, un decantador laminar de flujo ascendente y dos filtros de flujo descendente de lechos mixtos auto lavables tasa declinante.

Los módulos existentes, numerados como 1 y 2, tienen capacidad para procesar 400 l/s cada uno, a su vez, cada uno cuenta con dos sub módulos, con capacidad para tratar 200 l/s; 160 l/s como capacidad mínima y 240 l/s capacidad máxima.

Fig. 16. Módulos de potabilización MPA.



Nota: Fuente AGUAPEN-EP.

Cada MPA, está equipado con los siguientes dispositivos electromecánicos:

- ✓ Dos válvulas de mariposa motorizadas regulables Ø 500 mm. en la entrada de cada floculador que constituyen los elementos de seccionamiento del flujo a cada sub – módulo.
- ✓ Cuatro válvulas de fondo en la entrada de cada filtro.
- ✓ Cuatro válvulas de mariposa motorizadas Ø 500 mm. en el desagüe de cada filtro.
- ✓ Válvulas de desagüe de floculadores, decantadores y filtros.
- ✓ Un tablero eléctrico de mando y control de lavado de filtro.

Los MPA están equipados además con canaletas de recolección de agua de lavado de filtros, tuberías de acero de recolección de agua decantada y elementos de decantación. Una red de agua de alta presión alimenta los hidrantes de lavado de paredes de la planta.

Floculación.

Es la etapa donde se unen las partículas coaguladas y desestabilizadas (microflocs) para formar mayores masas o flóculos, de tamaño y densidad adecuados para posibilitar su sedimentación. Es sin duda, el proceso más utilizado para la remoción de sustancias que producen color y turbiedad en el agua.

Para que los flóculos adquieran peso adecuado para su sedimentación, el agua en proceso requiere de una agitación lenta (gradiente de velocidad) en los floculadores durante un tiempo preestablecido que dure entre 30 y 60 minutos.

Este proceso debe estar en monitoreo constante, pues un caudal y una dosis de químicos no apropiadas afectarían la formación de flóculos, sin embargo, si se tiene una suave agitación se podrían originar masas de lodo esponjosas y débiles, difíciles de sedimentar.

Decantación.

Los decantadores de la PTAP Atahualpa son de flujo ascendente, de placas paralelas inclinadas y poseen su respectivo canal de ingreso y tuberías de recolección de agua sedimentada.

La recolección del agua clarificada ascendente se hace a través de tuberías de recolección que descarga en una canaleta-vertedero central superior, que lleva el agua al canal de salida a los filtros. Los flóculos que se escurren por las placas se recolectan en las tolvas de lodos y mediante tuberías se descargan al sistema de drenaje de los MPA.

Filtración.

La filtración es la etapa en donde se separa las impurezas del agua, por medio de un lecho filtrante, formado por grava, arena y antracita. Los filtros son unidades de filtrado rápido a gravedad, de tasa declinante, en los cuales es posible disminuir la velocidad de filtración a medida que el lecho filtrante se va obstruyendo. Para ello, las unidades de filtración actúan como vasos comunicantes en tal forma que la que esté limpia trabaje con la máxima velocidad, mientras que la que está sucia lo haga con la mínima.

Cámara de reunión y contacto.

Es una estructura de hormigón armado de forma rectangular internamente provisto de pantallas que imparten un flujo hidráulico, de manera que se pueda producir el tiempo de contacto del agua filtrada, con el cloro, para los parámetros de cloro residual y pH, antes de enviar el agua al reservorio de agua tratada y finalmente en los centros de consumo.

Fig. 17. Cámara de reunión y contacto.



Nota: Fuente AGUAPEN-EP.

Reservorio.

Es un tanque superficial de hormigón armado, construido en un área aproximada de 750 m², con cuatro metros de altura de agua, donde se almacena el producto final del proceso hasta un volumen máximo de 3.000 m³. Posee un sistema de ventilación en la losa superior con codos y neplios de hierro dúctil que permiten el contacto del agua con la presión atmosférica y libera probables gases excedentes.

Fig. 18. Reservorio de agua tratada.



Nota: Fuente AGUAPEN-EP.

Estación de bombeo de agua tratada.

Comprende dos bloques con distintas funciones. En el bloque mayor se alojan los grupos de electrobombas que sirven a las ciudades mayores ubicadas al oeste de la PTAP y al Reservorio Central y el bloque menor que alojan las bombas que sirven a las localidades menores ubicadas al sur de PTAP, las bombas de servicio y las bombas de cloración para el proceso de producción.

Fig. 19. Casa bomba.



Nota: Fuente AGUAPEN-EP.

Tabla 7. Especificaciones técnicas de las bombas.

Estación de bombeo de agua cruda		
Cantidad	Descripción	Características
3	Motor potencia	500 Hp
	Rotación	1775 Rpm
	Voltaje	4160 Voltios
	Corriente	61,8 Amperios
	Frecuencia	60 Hz
	Protección	JP56
	Peso neto	3600 Kgt
	Marca	GEVISA
	Bomba tipo	56GN1
	Caudal m ³ /h	1440
	AMT	58.9
	Rpm	1740
	Altura de succión	5,45 m
Estación de bombeo de agua tratada		
Cantidad	Descripción	Características
3	Modelo	5K280 S/M3060804
	Carcasa	280 S/M
	P	W55
	Potencia	120
	RPM	1185
	Voltios	440
	AMP	140
	Fase	3
	Frecuencia	60 Hz
	Motor de inducción	
	NS	UPH 232000051
	FP	87.6
	AI SL	F At 80e RES
	SERV	CONT A 40 C
	ALT	1000M lq/ln 65
		IEC 34
		COJ LA 63182/C3
		COJ LOA 6314Z/C3
		PESO 850 KGF
	Bomba tipo	
	Marca	ALSTOM
Tipo	400390B	
Serie	35505	
RPM	1160	
AMT (m)	13.7	
Ø rotor	350	
Bombas agitadoras		
Cantidad	Descripción	Características
3	Motor	
	WEG	
	NBR	7094
		3100 L 11/90 FL 10203
	Hz	60
	Hp	2.2 (3.0)

	RPM	1150
	FS SF	1.15
	lp/ln	5.5
	220/380 V	10.5/6.08 A
	COJ 6206-ZZ	30.0 Kg
Bombas de coagulantes		
3	Motor	
	WEG	
	NBR	7094
		3100 L 11/99 FL 10203
	Hz	60
	Hp	2.2 (3.0)
	RPM	1150
	FS SF	1.15
	lp/ln	5.5
	220/380 V	10.5/6.08 A
	COJ 6206-ZZ	30.0 Kg
	Bomba	
	CP 1608701	
	B31580 No Maq	
	Tipo	2 NE 30A
Año	1999	
Tag	BDS-02	

Nota: Fuente AGUAPEN-EP.

Casa químicos.

Es una edificación cubierta con estructura de hormigón armado, paredes de bloques y cubierta de fibrocemento de forma rectangular donde se encuentran las bombas dosificadoras y los paneles de control.

Existen tres tanques mezcladores de sustancias químicas de 38.50 m² c/u. Cada tolva tiene un agitador vertical con motor de 3 HP, 220 V, 1.150 RPM, las hélices del tipo naval con tres aspas de DN: 245 mm, eje de 42 mm de acero inoxidable AISI 304.

El sistema de dosificación de químicos está compuesto por tres bombas dosificadoras de la marca NETZ NEMO de procedencia brasileña. Cada bomba tiene un caudal mínimo de 650 l/h y un caudal máximo de 2 000 l/h. El rotor de la bomba es de acero inoxidable AISI 304 cromado, el estator de caucho sintético y la carcasa de fundición. El motor acoplado es de inducción trifásico de 3 HP a 220 V y grado de protección IP-55.

Casa cloro.

En la PTAP Atahualpa se emplea la desinfección por cloro-gas en presentación de cilindros. La cloración a gas tiene la ventaja de ser muy económica, pero exige una capacitación específica a los operadores. Esta unidad es una edificación cubierta y cumple las funciones de bodega, mezcla con agua y dosificación del cloro gas. Su capacidad máxima de almacenamiento es de 80 cilindros de gas cloro de una tonelada corta (907 Kg).

El edificio cuenta con dos salas de dosificación, una para pre cloración y otra para post cloración. En cada sala existen tres cloradores marca Wallace & Tiernan, modelo V-10 K, cada uno con capacidad de 500 lbs/24 h.

En la parte exterior de estas dos salas, se encuentra el tablero eléctrico de la casa cloro, el cual alimenta a cada uno de los equipos tales como: dosificadores, extractores de aire, balanzas electrónicas, detectores de fuga de cloro, iluminación y toma corrientes de servicios generales.

Existen dos extractores de aire por cada sala, los mismos que funcionan automáticamente cuando se produce una fuga de gas cloro o manualmente desde los pulsadores ubicados en el tablero de control.

Laboratorio de Control de Calidad.

Es el área donde se realiza el monitoreo y control de calidad del agua en cada una de las etapas del proceso de potabilización, cumpliendo con los parámetros establecidos en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1108 sexta revisión 2020-04 Agua para consumo humano.

CAPÍTULO II

MARCO METODOLÓGICO

La metodología empleada en este estudio investigativo se basa en el estado del arte (Capítulo I), en donde se comprende como el del diseño de experimentos permite obtener nuevos parámetros óptimos para los procesos, originando así una viabilidad para su implementación en la PTAP Atahualpa de la empresa AGUAPEN-EP.

2.1 Enfoque de investigación.

Una vez definido el planteamiento del problema, se deberá llegar a responder la pregunta de investigación y lograr el cumplimiento de los objetivos por lo que resulta necesario especificar el enfoque investigativo y el diseño de la investigación para su aplicación en el contexto del presente estudio. Existen dos tipos de diseño de investigación: las cuantitativas y las cualitativas.

Un enfoque cuantitativo requiere la recolección de datos para evaluar las hipótesis en base a un análisis numérico estadístico para probar una teoría. La misión del investigador es describir el comportamiento de los fenómenos y sucesos, por lo que un estudio con alcance descriptivo permitirá especificar las características de cualquier proceso u objeto que se someta a un análisis (Sampieri et al., 2014).

Tabla 8. Enfoque cuantitativo de la investigación.

Dimensiones	Enfoque
Hipótesis.	Se confirman, aceptándolas o rechazándolas según la probabilidad.
Diseño de la investigación.	Estructurado precedente de la recolección de datos.
Población.	Generaliza los datos de una muestra a una determinada población.
Muestra.	Se generalizan los resultados del estudio.
Tipo de datos.	Confiables.
Recolección de los datos.	Se obtienen por observación, medición y revisión de la documentación.
Análisis de datos.	Se utilizan procedimientos estadísticos.
Presentación de resultados.	Se utiliza un enfoque objetivo.

Nota: Elaborado por autor, adaptado de (Sampieri et al., 2014).

2.2 Diseño de investigación.

El término diseño se refiere básicamente al plan para obtener la información y de esta manera responder al planteamiento del problema. En ese sentido el enfoque cuantitativo relaciona la calidad de la investigación con el grado en el que se aplique el diseño específicamente para el caso de experimentos (Sampieri et al., 2014).

En la investigación cuantitativa se pueden encontrar varias clasificaciones, no obstante, las más conocidas son la investigación experimental y la no experimental. El primer tipo de investigación se divide en: preexperimental, experimentos puros y cuasi experimentos. Los experimentos puros manipulan una o más variables independientes o dependientes y la equivalencia de los grupos para lograr el control y una validez interna (Sampieri et al., 2014).

En ese sentido, el presente trabajo de investigación, es de tipo cuantitativo experimental, basado en los principios teóricos para la realización de los ensayos de laboratorio que permitan describir el comportamiento de un fenómeno en un campo macro de acción.

A continuación, se menciona la hipótesis propuesta: Aplicar el diseño de experimentos para la optimización del proceso de potabilización del agua en la empresa AGUAPEN-EP, en la provincia de Santa Elena – Ecuador, ayudará a minimizar los recursos económicos en los insumos químicos, entre otros factores relevantes; cuyas variables, se las estudiará de la siguiente manera:

Investigación descriptiva: se describe de manera detallada las principales características del problema de estudio, centrándose en la variable independiente (diseño de experimento) y la variable dependiente (potabilización del agua) con el fin de explicar cada uno de los procesos y actividades necesarias que se requieran para alcanzar los objetivos planteados.

Investigación experimental: empleada para estudiar y analizar la manipulación de las variables con el fin de lograr la optimización del proceso de potabilización del agua de la PTAP Atahualpa de AGUAPEN-EP. Los diseños factoriales manipulan dos o más variables independientes incluyendo los niveles de las variables dependientes y son muy utilizados en la investigación experimental (Sampieri et al., 2014).

2.3 Procedimiento metodológico.

Para este caso el procedimiento metodológico se desarrolla en cuatro fases en donde se logra optimizar una línea de producción de acuerdo a los resultados obtenidos aplicando el diseño de experimentos. (Fernández et al., 2019). En este trabajo investigativo se realizaron ensayos a escala de laboratorio en donde se obtuvieron resultados óptimos para aplicarlos a nivel macro, es decir en la PTAP Atahualpa y así no solo mejorar la calidad del agua en proceso sino también incrementar la producción de agua potable.

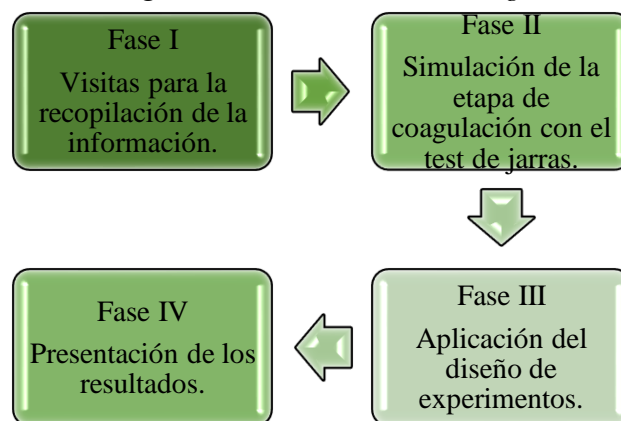
Fase I: se realizaron visitas a la PTAP Atahualpa de la empresa AGUAPEN-EP, para la recolección de la información mediante las técnicas de la observación, experimentación y revisión de documentación. Se desarrolló un diagrama de flujo para el uso del equipo test de jarras. Ver Anexo B.

Fase II: en el laboratorio de Control de Calidad se realizó una simulación de la etapa de coagulación del agua, con la supervisión del Analista de Calidad de la empresa, utilizando el equipo test de jarras con tres tipos de sustancias coagulantes para determinar el comportamiento e incidencia de los factores.

Fase III: se aplicó el diseño de experimentos mediante un diseño factorial, utilizando el software Minitab, para seleccionar la sustancia ideal y la dosis óptima de coagulante que permita optimizar el proceso de potabilización del agua.

Fase IV: se proponen los resultados obtenidos que permiten incrementar la producción sin alterar la calidad del agua.

Fig. 20. Procedimiento metodológico.



Nota: Elaborado por autor, adaptado de (Fernández et al., 2019).

2.4 Población y muestra.

2.4.1 Población (cuando el estudio lo requiera).

Se entiende por población al conglomerado de todos los datos que contienen una serie de especificaciones en común (Sampieri et al., 2014). En ese sentido, en el presente estudio se hace referencia a la PTAP Atahualpa como la población objeto de estudio.

2.4.2 Muestra.

Una muestra es un conjunto de la población de donde se recolectarán los datos de estudio (Sampieri et al., 2014). Para el caso de estudio la muestra seleccionada serán los tipos de coagulantes químicos a analizar mediante el ensayo de jarras.

2.5 Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de los datos.

La recolección de datos consiste en un plan con el detalle de los procedimientos que nos permitan la recopilación de la información que tiene propósitos comunes (Sampieri et al., 2014). El plan contiene el siguiente detalle:

Fig. 21. Plan para la obtención de datos.

PLAN PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS			
¿De donde se obtendrán las fuentes? Ensayos de laboratorio	¿Donde se encuentran? PTAP Atahualpa de AGUAPEN-EP	¿Cuáles son los métodos para la recolección de datos? La observación, experimentación y la documentación	¿De que manera se analizará la información? Diseño de experimentos y software Minitab

Nota: Elaborado por autor, adaptado de (Sampieri et al., 2014).

2.5.1 Métodos de recolección de los datos.

Se define al método como el camino que contiene una serie de procedimientos para alcanzar un determinado fin, que lo hace más amplio de la definición de una metodología. El concepto de metodología se refiere al conjunto de técnicas e instrumentos que mediante un proceso de validación genera información teórica requerida por el método científico (Del Cid et al., 2011).

En ese contexto, el método empleado para la elaboración del presente trabajo investigativo es el cuantitativo, en el sentido de que los resultados se generalizan ampliamente, facilitando la comparación entre estudios de similares características, siendo así el método más apropiado para el caso estudiado (Sampieri et al., 2014).

2.5.2 Técnicas de recolección de los datos.

Para recabar la información de fuentes primarias fue necesario emplear técnicas de investigación de campo tales como la observación, la experimentación y la revisión de documentación.

Técnica de la observación: La observación como su nombre lo indica es la técnica en la cual el investigador se acerca al fenómeno a estudiar para visualizar lo que sucede (Del Cid et al., 2011). Se visitó el Laboratorio de Control de Calidad de la PTAP Atahualpa de AGUAPEN-EP, para observar fijamente el procedimiento de desarrollo del test de jarras.

Técnica de experimentación: La experimentación consiste en el estudio del fenómeno objeto de estudio dentro de un determinado ambiente. Se realizaron varios ensayos de jarras con los diferentes coagulantes químicos seleccionados de muestra para analizar el comportamiento de la influencia de los factores y obtener los resultados óptimos para mejorar la calidad del agua y así incrementar la producción (Del Cid et al., 2011).

Técnica revisión de la documentación: Se revisaron las bitácoras de producción y las hojas de registro con los parámetros físicos del agua en todas las etapas del proceso para la obtención de la información que permita realizar la comparación de los resultados.

2.5.3 Instrumentos de recolección de los datos.

Los instrumentos de recolección de datos son los medios que se emplean directamente para registrar la información (Sampieri et al., 2014). Los instrumentos empleados en esta investigación consisten en una guía de observación, la elaboración de una data y la realización de experimentos de laboratorio. La recolección y el análisis de todos los datos permitirán obtener los resultados para lograr optimizar el proceso de potabilización de la PTAP Atahualpa de la empresa AGUAPEN-EP.

Guía de observación: Este instrumento permitirá la sistematización de la información recopilada en el campo (Del Cid et al., 2011). Para el presente estudio, se elaborará una guía de observación con la recopilación de las características más importantes del ensayo test de jarras. Ver Anexo C.

Data de información: Se realiza una data en base a la información de los registros de control de calidad del agua en proceso. Ver Anexo D.

Los ensayos de laboratorio se realizarán in situ con las diferentes muestras de los coagulantes químicos.

2.6 Variables de estudio

- Variable Independiente: Diseño de experimentos.
- Variable Dependiente: Potabilización del agua.

Se presenta también una tabla de operacionalización de las variables.

Operacionalización de las variables.

La operacionalización de las variables se refiere al conjunto de métodos y técnicas que, mediante un proceso de identificación de los datos relacionados a las características de estudio, permiten medirlas. Para medir las variables, se deben establecer por lo menos dos dimensiones y dos indicadores para cada variable (Arias, 2021).

Tabla 9. Operacionalización de variables.

Variable Independiente	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Técnicas e instrumentos
Diseño de experimentos	El diseño de experimentos es el conjunto de técnicas que sirven para manipular la información que se requiere para mejorar un proceso anticipándose a las señales útiles que este pueda enviar. (Gutiérrez & De la Vara, 2008)	El diseño de experimentos es la realización de ensayos de laboratorio con diferentes sustancias coagulantes para determinar la influencia de los factores en el proceso.	Muestra de agua cruda. Tipo de coagulante. Velocidad de agitación. Cantidad de dosis.	Turbiedad. Químico – natural. Alta – media. Óptima.	Observación. Test de jarras. Software Minitab.
Variable Dependiente	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Técnicas e instrumentos
Potabilización del agua	Es un conjunto de procesos que se realizan al agua cruda con el fin de mejorar sus características físicas, químicas y bacteriológicas. (Martínez-Orjuela et al., 2020)	Proceso mediante el cual el agua cruda recibe un tratamiento en base a químicos obteniendo como resultado agua apta para el consumo humano.	Caudal de ingreso. Aplicación de químicos. Parámetros físicos, químicos y bacteriológico. Lavado de filtros.	Grupos de bombeo. Sulfato – PAC Cloro residual, pH y color. Tiempo de lavado de filtros.	Parámetros de control de calidad del agua en proceso.

Nota: Elaborado por autor.

2.7 Procedimiento para la recolección de los datos.

Para el procedimiento de recolección de datos se realizaron varias visitas a la PTAP de la empresa AGUAPEN-EP, con la finalidad de observar detenidamente todo el proceso de potabilización del agua y los ensayos de jarra realizados en el laboratorio de Control de Calidad.

Se procedió con la toma de muestra de agua cruda para la caracterización de los parámetros físicos del agua mediante el uso de equipos de laboratorio en cumplimiento de la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1108 sexta revisión 2020-04 Agua para consumo humano.

Se revisaron las hojas de registro con los datos de control de calidad del agua y se obtiene una data a la cual se le verifica la fiabilidad mediante el análisis del Alfa de Cronbach. Ver Anexo E.

2.8 Plan de análisis e interpretación de resultados.

En la siguiente tabla, se puede observar el cumplimiento de cada uno de los objetivos del presente trabajo investigativo. Para el primer objetivo se estableció un estado de arte mediante la revisión de fuentes literarias. Para el segundo objetivo se emplea una metodología utilizando la técnica de la observación, experimentación y documentación. Los resultados obtenidos son analizados mediante el software Minitab.

Tabla 10. Plan de análisis e interpretación de resultados.

N.º	Objetivo	Procedimiento	Herramientas	Resultados esperados
1	Elaborar un estado revisando fuentes bibliográficas para la obtención de bases teóricas relacionadas al proceso de potabilización.	1.- Revisión de la literatura de artículos científicos. 2.- Observar técnicas de diseño de experimentos, optimización y palabras claves.	1.- Revisión sistemática de la literatura. 2.- Base de datos. 3.- Aplicación de software VOSviewer.	1.- Lista de estudios relevantes en la aplicación del diseño de experimentos. 2.- Identificación de metodología y selección del tipo de diseño de experimentos.
2	Establecer una metodología con pruebas de laboratorio aplicando el diseño factorial par la optimización de la sustancia coagulante.	1.- Metodología basada en un enfoque cuantitativo. 2.- Selección de técnicas de observación y revisión de documentación. 3.- Recolección de datos.	1.- Diagrama de flujo de ensayo. 2.- Revisión documental.	1.- Determinación de la metodología. 2.- Determinación de población y selección de muestra. 3.- Desenlace de la metodología.
3	Plantear con los resultados obtenidos los parámetros de mejoras en materia prima del proceso de potabilización del agua.	1.- Analizar los datos mediante el uso de software. 2.- Análisis de validez y fiabilidad. 3.- Presentación de resultados.	1.- Diseño de experimentos. 2.- Software Minitab.	1.- Presentación de datos. 2.- Enfoque de la información para la optimización. 3.- Conclusiones y recomendaciones finales.

Nota: Elaborado por el autor.

CAPÍTULO III

MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Marco de resultados.

En este apartado se exponen los resultados que provienen del uso de la técnica de observación, los experimentos y la revisión de la documentación realizada en la PTAP Atahualpa de AGUAPEN-EP. La recopilación y el análisis de datos mostraron información confiable aplicando el Alfa de Cronbach utilizando el software Minitab Statistical.

De esta manera se da paso a la aceptación de la hipótesis planteada: Aplicar el diseño de experimentos para la optimización del proceso de potabilización del agua en la empresa AGUAPEN-EP, en la provincia de Santa Elena – Ecuador, ayudará a minimizar los recursos económicos en los insumos químicos, entre otros factores relevantes, exponiendo los resultados y cumpliendo con el tercer objetivo específico de la presente investigación.

3.1.1 Resultados de la observación.

En las visitas realizadas a la PTAP Atahualpa de la empresa AGUAPEN-EP, se visualizó el proceso de potabilización del agua y el procedimiento para la determinación de la dosis adecuada de coagulante, el mismo que se lleva a efecto en el Laboratorio de Control de Calidad.

En el Anexo A, mediante un diagrama de flujo se describen los pasos utilizados para la realización del test de jarras a las sustancias coagulantes empleadas para la clarificación del agua.

A continuación, mediante el uso de la Ficha de Observación se detalla los principales aspectos del ensayo del test de jarras.

Fig. 22. Guía de Observación del Test de Jarras.

Universidad Estatal Península de Santa Elena.

Carrera: Ingeniería Industrial.

Investigación: Ensayo Test de jarras.

Observador: Alberto Domínguez Pizarro.

Boleta de Observación.

Objetivo: Determinar el comportamiento de los factores: tipo de coagulantes y cantidad de dosis.

Localización del ensayo observado: Laboratorio de Control de Calidad de la Planta Potabilizadora Atahualpa de AGUAPEN-EP, ubicada en la vía Guayaquil Santa Elena, Km 115, entrada a la población de Atahualpa.

Fecha de la realización de la observación: 29 de octubre de 2023.

Aspectos a observar: Comportamiento de los diferentes tipos de coagulantes.

Velocidad de agitación y tiempo de agitación.

Porcentaje de remoción de sólidos en suspensión.

Registro de la información:

Para determinar la dosis adecuada de la sustancia coagulante al proceso de potabilización del agua se emplea el equipo test de jarras, el mismo que simula la etapa de coagulación en la Planta de Tratamiento. Este equipo se encontró en buen estado y debidamente calibrado por un ente de control.

Para su uso, este equipo debe estar debidamente configurando tanto en la velocidad de agitación como en los tiempos de sedimentación, los cuales, debido a las condiciones del proceso de potabilización de esta Planta de Tratamiento, son los siguientes:

Velocidad	Tiempo
200 rpm	1 min
80 rpm	8 min
60 rpm	8 min
40 rpm	5 min

Mediante el test de jarras se conoce el porcentaje de remoción de los sólidos en suspensión presentes en el agua cruda, cuya mayor cantidad será la prioridad para determinar la dosis óptima de la sustancia a emplear.

Nota: Elaborado por autor, adaptado de (Del Cid et al., 2011).

3.1.2 Resultados de los experimentos.

Se realizaron los ensayos de jarra en el Laboratorio de Control de Calidad, en donde se analizaron cuatro tipos de sustancias químicas coagulantes, utilizadas para la clarificación de la materia prima que es el agua cruda. Las muestras de los coagulantes fueron: sulfato de aluminio A, sulfato de aluminio B, policloruro de aluminio líquido y policloruro de aluminio PAC en polvo.

De cada sustancia coagulante se realizaron dos ensayos en el equipo Test de jarras, dando un total de ocho pruebas, cuyos resultados fueron los siguientes:

Fig. 23. Resultados Test de Jarras del sulfato de aluminio tipo A.

Test de Jarras							
Fecha:	29 – 10 - 2023			Mezcla rápida:	200 rpm (1 min)		
Muestra:	Agua cruda			Mezcla semirápida:	80 rpm (8 min)		
Lugar:	Planta Atahualpa			Mezcla media:	60 rpm (8 min)		
Volumen:	1000 ml			Mezcla lenta:	40 rpm (5 min)		
Coagulante:	Sulfato de aluminio tipo A			Tiempo de sedimentación:	15 minutos		
Jarra	Solución al 3.5 %		Turbiedad NTU	pH	Color CoPt	% Remoción	Temp.
	ppm	MI					
1.- Agua cruda	12	0.343	1.130	6.76	33	28.48	21
2.- Agua cruda	18	0.514	0.790	6.73	30	50.00	21
3.- Agua cruda	24	0.686	0.740	6.70	25	53.16	21
4.- Agua cruda	28	0.800	0.760	7.40	25	51.90	21
5.- Agua cruda	32	0.914	0.670	7.41	21	57.59	21
6.- Agua cruda	36	1.029	0.630	7.51	16	60.13	21
	Agua cruda		1.58	7.40	56		21

Gráfico de turbiedad

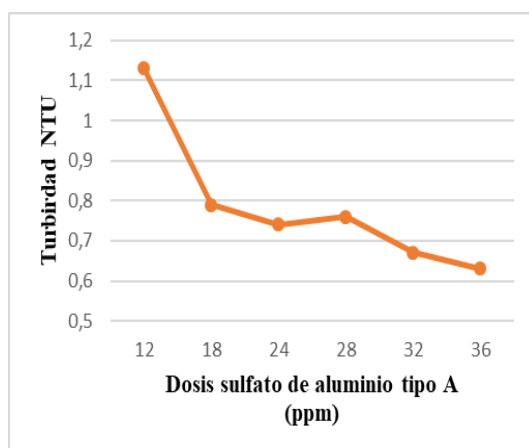
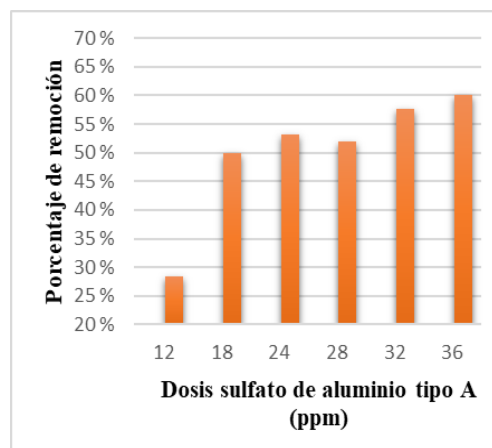


Gráfico de % de remoción



Nota: Elaborado por el autor.

Interpretación: Preparando una solución de sulfato de aluminio tipo A al 3.5% de concentración, a mayor cantidad de dosis del coagulante disminuye el valor de la turbiedad del agua, por consiguiente, el porcentaje de remoción se incrementa. Ejemplo: con una dosis de 36 ppm de sulfato de aluminio tipo A se obtiene un 60.13% de remoción de sólidos en suspensión y un parámetro de color de 16 unidades CoPt. Referente al pH se evidencia una mínima variación de las cantidades entre el mínimo de 6.76 y un máximo de 7.51.

Fig. 24. Resultados Test de Jarras del sulfato de aluminio tipo B.

Test de Jarras							
Fecha:	29 – 10 - 2023		Mezcla rápida:	200 rpm (1 min)			
Muestra:	Agua cruda		Mezcla semirápida:	80 rpm (8 min)			
Lugar:	Planta Atahualpa		Mezcla media:	60 rpm (8 min)			
Volumen:	1000 ml		Mezcla lenta:	40 rpm (5 min)			
Coagulante:	Sulfato de aluminio tipo B		Tiempo de sedimentación:	15 minutos			
Jarra	Solución al 3.5 %		Turbiedad NTU	pH	Color CoPt	% Remoción	Temp.
	ppm	MI					
1.- Agua cruda	12	0.343	2.810	7.15	54	-77.85	21
2.- Agua cruda	18	0.514	1.240	7.14	36	21.52	21
3.- Agua cruda	24	0.686	0.845	7.10	28	46.52	21
4.- Agua cruda	28	0.800	0.754	7.11	26	52.28	21
5.- Agua cruda	32	0.914	0.846	7.16	24	46.46	21
6.- Agua cruda	36	1.029	0.724	7.24	22	54.18	21
	Agua cruda		1.58	7.22	48		21

Gráfico de turbiedad

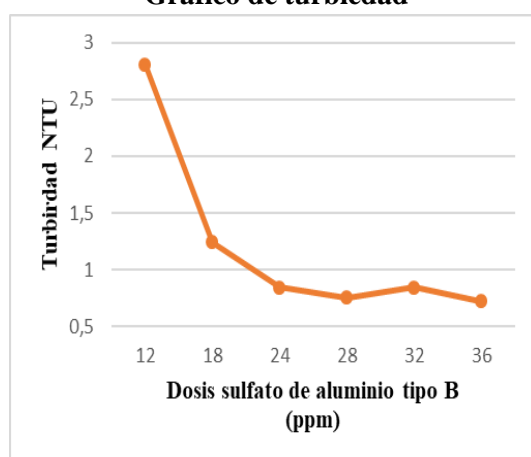
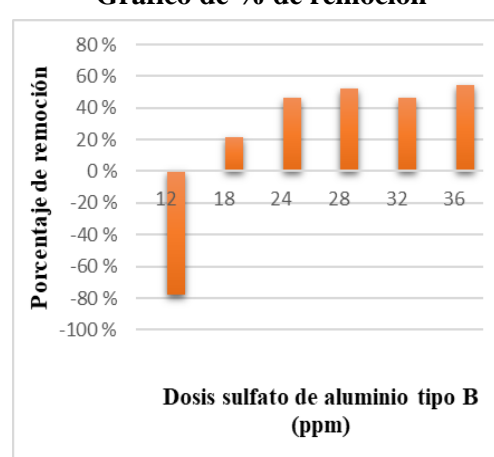


Gráfico de % de remoción



Nota: Elaborado por el autor.

Interpretación: Preparando una solución de sulfato de aluminio tipo B al 3.5% de concentración, con las dosis de 28 y 36 ppm de coagulante se obtienen los mayores

porcentajes de remoción de 52.28% y 54.18% respectivamente. Una dosis baja de este coagulante hace más turbia el agua que en condiciones normales. El parámetro de color más bajo, se encuentra en 22 unidades de CoPt y los valores de turbiedad se encuentra en un rango de 7.15 hasta 7.24.

Fig. 25. Resultados Test de Jarras del policloruro de aluminio PAC sólido.

Test de Jarras							
Fecha:	29 – 10 - 2023			Mezcla rápida:	200 rpm (1 min)		
Muestra:	Agua cruda			Mezcla semirápida:	80 rpm (8 min)		
Lugar:	Planta Atahualpa			Mezcla media:	60 rpm (8 min)		
Volumen:	1000 ml			Mezcla lenta:	40 rpm (5 min)		
Coagulante:	Policloruro de aluminio PAC sólido			Tiempo de sedimentación:	15 minutos		
Jarra	Solución al 3.5 %		Turbiedad NTU	pH	Color CoPt	% Remoción	Temp.
	ppm	MI					
1.- Agua cruda	12	0.343	0.620	7.10	26	58.39	21.5
2.- Agua cruda	18	0.514	0.404	7.16	18	72.89	21.5
3.- Agua cruda	24	0.686	0.395	7.12	16	73.49	21.5
4.- Agua cruda	28	0.800	0.366	7.14	14	75.44	21.5
5.- Agua cruda	32	0.914	0.434	7.20	14	70.87	21.5
6.- Agua cruda	36	1.029	0.436	7.08	13	70.74	21.5
Agua cruda			1.49	7.14	52		21.5

Gráfico de turbiedad

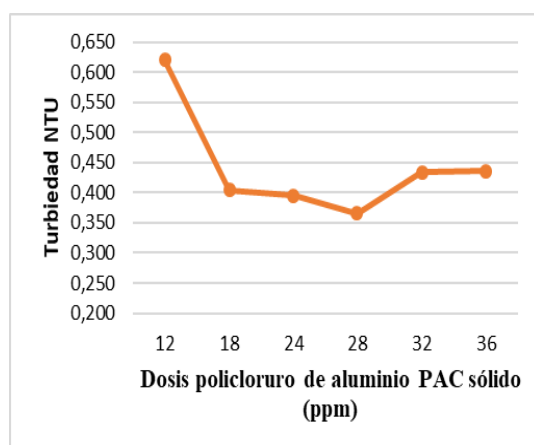
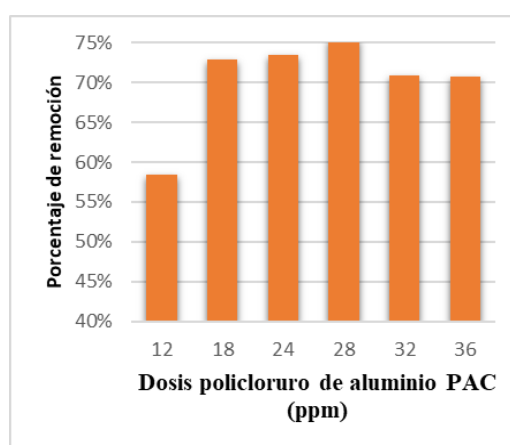


Gráfico de % de remoción



Nota: Elaborado por el autor.

Interpretación: Preparando una solución de policloruro de aluminio PAC sólido al 3.5% de concentración, se obtienen porcentajes de remoción más altos que las dos muestras anteriores, de la misma manera disminuye el valor del color. Para este caso con una dosis de 28 ppm de este tipo de coagulante se logra el 75.44% de remoción de sólidos de suspensión en el agua cruda. La mejor medida del color de 13 unidades de

CoPt. es con una dosis de 36 ppm. Las dosis de 18 y 24 ppm se pueden considerar también ideales, sin embargo, se debe tomar en cuenta que para todos estos casos se a mayor cantidad de dosis se requiere mayor cantidad de insumos químicos para la aplicación a nivel de Plantas de Tratamiento.

Fig. 26. Resultados Test de Jarras del policloruro de aluminio PAC líquido.

Test de Jarras							
Fecha:	29 – 10 – 2023			Mezcla rápida:	200 rpm (1 min)		
Muestra:	Agua cruda			Mezcla semirápida:	80 rpm (8 min)		
Lugar:	Planta Atahualpa			Mezcla media:	60 rpm (8 min)		
Volumen:	1000 ml			Mezcla lenta:	40 rpm (5 min)		
Coagulante:	Policloruro de aluminio PAC líquido			Tiempo de sedimentación:	15 minutos		
Jarra	Solución al 3.5 %		Turbiedad NTU	pH	Color CoPt	% Remoción	Temp.
	ppm	MI					
1.- Agua cruda	12	0.343	0.290	6.64	11	80.92	21.5
2.- Agua cruda	18	0.514	0.298	6.60	9	80.39	21.5
3.- Agua cruda	24	0.686	0.284	6.42	7	81.32	21.5
4.- Agua cruda	28	0.800	0.232	6.32	6	84.74	21.5
5.- Agua cruda	32	0.914	0.196	6.30	4	87.11	21.5
6.- Agua cruda	36	1.029	0.203	6.37	3	86.64	21.5
	Agua cruda		1.52	6.94	48		21.5

Gráfico de turbiedad

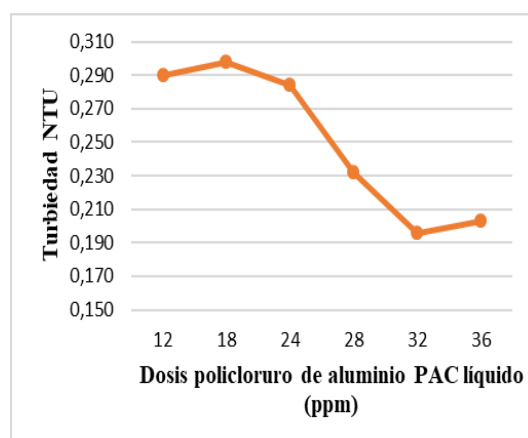
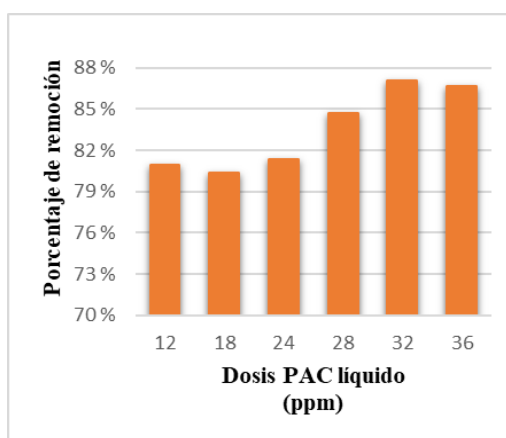


Gráfico de % de remoción



Nota: Elaborado por el autor.

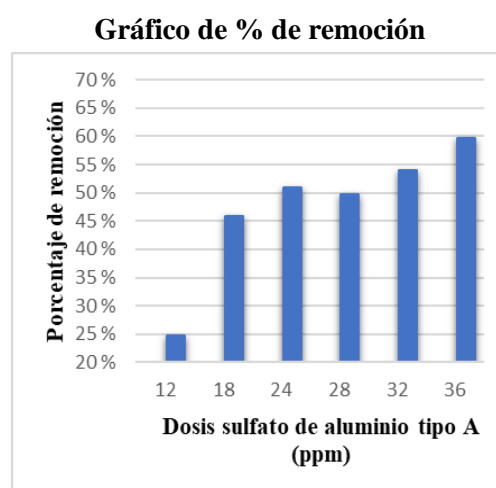
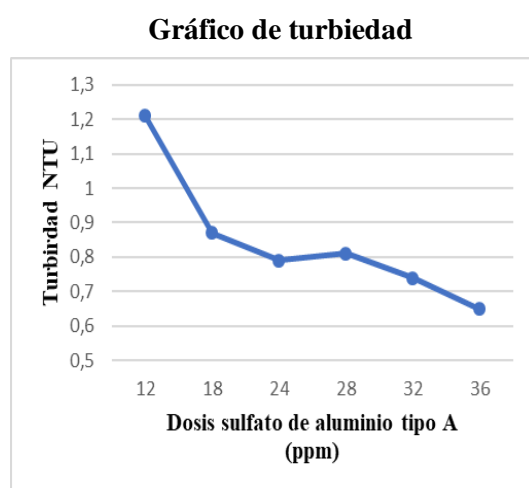
Interpretación: Preparando una solución de policloruro de aluminio PAC líquido al 17% de concentración de alúmina y al 3.5% de concentración de la solución madre, se obtienen los porcentajes de remoción de sólidos en suspensión del agua más alto de las cuatro muestras estudiadas; sin embargo, no existe un aglutinamiento ideal de las partículas en la formación de flóculos, por lo que, a nivel de Plantas de Tratamiento,

se podría generar inconvenientes en la etapa de sedimentación. De acuerdo a la gráfica a partir de una dosis de 36 ppm el porcentaje de remoción tiende a incrementarse.

Para la construcción de las estadísticas en el análisis de datos y para distinguir la variabilidad de los datos se realizó un ensayo más con cada sustancia coagulante, debido a que con la repetición se corre un nuevo tratamiento o combinación de los factores (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Fig. 27. Resultados Test de Jarras del sulfato de aluminio tipo A.

Test de Jarras							
Fecha:	02 – 11 – 2023			Mezcla rápida:	200 rpm (1 min)		
Muestra:	Agua cruda			Mezcla semirápida:	80 rpm (8 min)		
Lugar:	Planta Atahualpa			Mezcla media:	60 rpm (8 min)		
Volumen:	1000 ml			Mezcla lenta:	40 rpm (5 min)		
Coagulante:	Sulfato de aluminio tipo A			Tiempo de sedimentación:	15 minutos		
Jarra	Solución al 3.5 %		Turbiedad NTU	pH	Color CoPt	% Remoción	Temp.
	Ppm	Ml					
1.- Agua cruda	12	0.343	1.210	7.01	37	24.84	23
2.- Agua cruda	18	0.514	0.870	6.77	29	45.96	23
3.- Agua cruda	24	0.686	0.790	6.71	26	50.93	23
4.- Agua cruda	28	0.800	0.810	7.27	27	49.69	23
5.- Agua cruda	32	0.914	0.740	7.42	25	54.04	23
6.- Agua cruda	36	1.029	0.650	7.49	14	59.63	23
Agua cruda			1.61	7.37	52		23



Nota: Elaborado por el autor.

Interpretación: Con una solución de sulfato de aluminio tipo A al 3.5% de concentración, los porcentajes de remoción de la turbiedad de los sólidos en

suspensión presentes en el agua cruda se mantienen bajos desde un rango mínimo de 24.84% y un máximo de 59.63%.

Fig. 28. Resultados Test de Jarras del sulfato de aluminio tipo B.

Test de Jarras							
Fecha:	02 – 11 – 2023			Mezcla rápida:	200 rpm (1 min)		
Muestra:	Agua cruda			Mezcla semirápida:	80 rpm (8 min)		
Lugar:	Planta Atahualpa			Mezcla media:	60 rpm (8 min)		
Volumen:	1000 ml			Mezcla lenta:	40 rpm (5 min)		
Coagulante:	Sulfato de aluminio tipo B			Tiempo de sedimentación:	15 minutos		
Jarra	Solución al 3.5 %		Turbiedad NTU	pH	Color CoPt	% Remoción	Temp.
	Ppm	MI					
1.- Agua cruda	12	0.343	2.520	7.17	58	-56.52	22
2.- Agua cruda	18	0.514	1.330	7.11	37	17.39	22
3.- Agua cruda	24	0.686	0.990	6.99	31	38.51	22
4.- Agua cruda	28	0.800	0.860	7.09	29	46.58	22
5.- Agua cruda	32	0.914	0.810	7.12	23	49.69	22
6.- Agua cruda	36	1.029	0.740	7.26	21	54.04	22
	Agua cruda		1.61	7.18	46		22

Gráfico de turbiedad

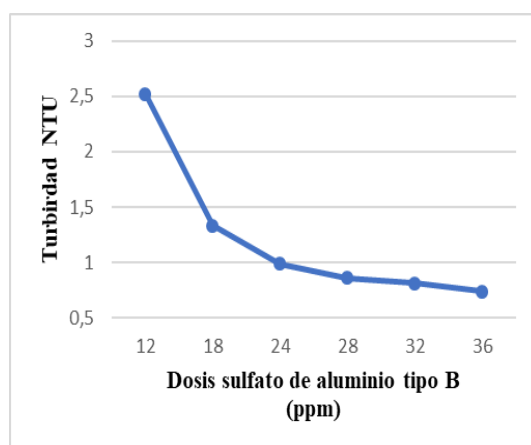
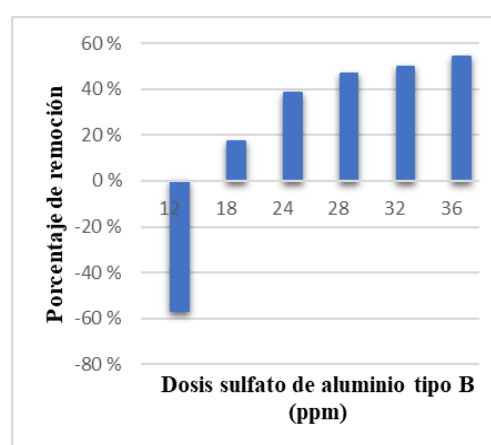


Gráfico de % de remoción



Nota: Elaborado por el autor.

Interpretación: Preparando una solución de sulfato de aluminio tipo B al 3.5% de concentración, con las dosis de 32 y 36 ppm de coagulante se obtienen los mayores porcentajes de remoción de 49.69% y 54.04% respectivamente. Una dosis baja de este coagulante hace más turbia el agua que en condiciones normales. El parámetro de color más bajo, se encuentra en 21 unidades de CoPt. con una dosis de 36 ppm.

Fig. 29. Resultados Test de Jarras del policloruro de aluminio PAC sólido.

Test de Jarras							
Fecha:	02 – 11 – 2023			Mezcla rápida:	200 rpm (1 min)		
Muestra:	Agua cruda			Mezcla semirápida:	80 rpm (8 min)		
Lugar:	Planta Atahualpa			Mezcla media:	60 rpm (8 min)		
Volumen:	1000 ml			Mezcla lenta:	40 rpm (5 min)		
Coagulante:	Policloruro de aluminio PAC sólido			Tiempo de sedimentación:	15 minutos		
Jarra	Solución al 3.5 %		Turbiedad NTU	pH	Color CoPt	% Remoción	Temp.
	Ppm	MI					
1.- Agua cruda	12	0.343	0.790	7.08	27	47.33	21
2.- Agua cruda	18	0.514	0.390	7.15	19	74.00	21
3.- Agua cruda	24	0.686	0.440	7.10	15	70.67	21
4.- Agua cruda	28	0.800	0.350	7.18	12	76.67	21
5.- Agua cruda	32	0.914	0.440	7.17	13	70.67	21
6.- Agua cruda	36	1.029	0.410	7.09	12	72.67	21
Agua cruda			1.50	7.09	55		21

Gráfico de turbiedad

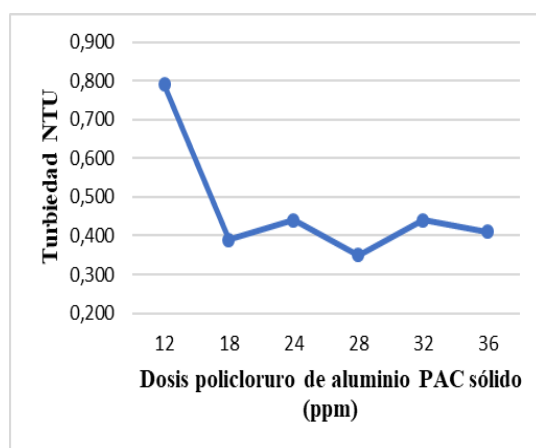
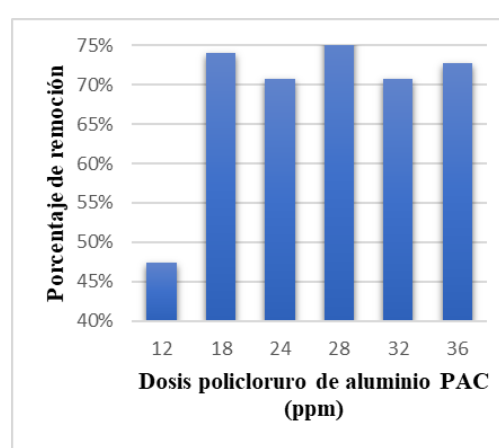


Gráfico de % de remoción



Nota: Elaborado por el autor.

Interpretación: Preparando una solución de policloruro de aluminio PAC sólido al 3.5 % de concentración, los porcentajes de remoción de sólidos en suspensión aumentan hasta llegar a un máximo de 76.67%, en comparación con las dos muestras anteriores. La mejor medida del color de 12 unidades de CoPt. es con una dosis de 28 y 32 ppm. Las dosis de 18 y 28 ppm se pueden considerar ideales, sin embargo, es importante indicar que para todos estos casos a mayor cantidad de dosis se requiere mayor cantidad de insumos químicos para la aplicación a nivel de Plantas de Tratamiento.

Fig. 30. Resultados Test de Jarras del policloruro de aluminio PAC líquido.

Test de Jarras							
Fecha:	02 – 11 – 2023			Mezcla rápida:	200 rpm (1 min)		
Muestra:	Agua cruda			Mezcla semirápida:	80 rpm (8 min)		
Lugar:	Planta Atahualpa			Mezcla media:	60 rpm (8 min)		
Volumen:	1000 ml			Mezcla lenta:	40 rpm (5 min)		
Coagulante:	Policloruro de aluminio PAC líquido			Tiempo de sedimentación:	15 minutos		
Jarra	Solución al 3.5 %		Turbiedad NTU	pH	Color CoPt	% Remoción	Temp.
	Ppm	MI					
1.- Agua cruda	12	0.343	0.380	6.64	13	74.67	21
2.- Agua cruda	18	0.514	0.410	6.62	9	72.67	21
3.- Agua cruda	24	0.686	0.340	6.39	8	77.33	21
4.- Agua cruda	28	0.800	0.290	6.31	7	80.67	21
5.- Agua cruda	32	0.914	0.250	6.28	4	83.33	21
6.- Agua cruda	36	1.029	0.170	6.36	4	88.67	21
Agua cruda			1.50	6.99	51		21

Gráfico de turbiedad

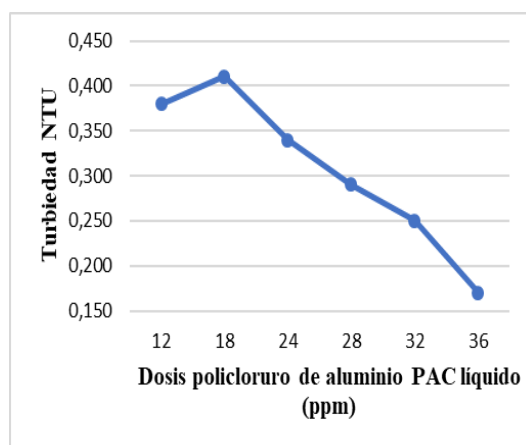
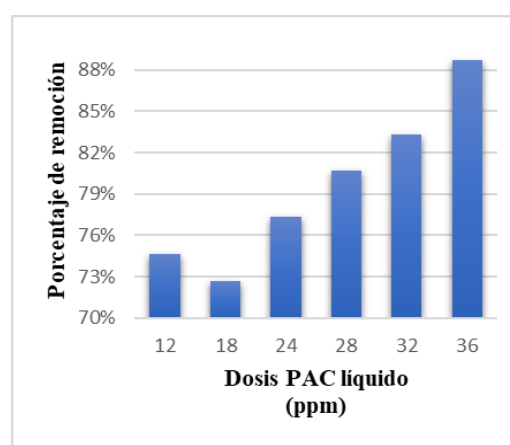


Gráfico de % de remoción



Nota: Elaborado por el autor.

Interpretación: Preparando una solución de policloruro de aluminio PAC líquido al 17% de concentración de alúmina y al 3.5% de concentración de la solución madre, se obtienen los porcentajes de remoción de sólidos en suspensión del agua más alto de las cuatro muestras estudiadas, es decir entre 72.67% y 88.67%; sin embargo, en la prueba se puede visualizar que no ocurre un efecto correcto de aglutinamiento de las partículas que faciliten su sedimentación.

El policloruro de aluminio líquido a pesar de tener los mejores resultados en la remoción de los sólidos en suspensión, no es recomendable su uso a nivel de Plantas

de Tratamiento por que las partículas que generan la turbiedad no lograron el peso adecuado para facilitar su decantación, lo que afectaría la calidad del agua en proceso.

A manera de resumen, se muestran los datos en donde se relacionan las variables, para proceder con el análisis de la validación de la hipótesis nula y la hipótesis alterna.

Tabla 11. Resumen de resultados de las cuatro muestras coagulantes.

Resumen de resultados Test de jarras						
Tipo de coagulante	Dosis ppm	Turbiedad NTU	% de remoción	Color CoPt.	pH	Temp.
Sulfato de aluminio tipo A	36	0.630 – 0.650	60.13 – 59.63	16 - 14	7.51-7.49	21-23
Sulfato de aluminio tipo B	36	0.724 – 0.740	54.18 – 54.04	22 - 21	7.24-7.26	21-22
Policloruro de aluminio PAC	28	0.366 – 0.350	75.44 – 76.67	14 - 12	7.14-7.18	21.5-21
Policloruro de aluminio líquido	32 -36	0.223 – 0.187	85.22 – 87.66	4 – 3.5	6.29-6.37	21.3-21.3

Nota: Elaborado por el autor.

Interpretación: La sustancia química que mejor efectividad tiene para remover los sólidos en suspensión a nivel de laboratorio, es el policloruro de aluminio PAC líquido (85.22-87.66%); pero debido a que los flóculos formados carecen de gravedad para su sedimentación, no es recomendable utilizarlo en este proceso de potabilización.

Los dos tipos de sulfato de aluminio presentan porcentaje de remoción de 54.04% hasta 60.13%; sin embargo, la cantidad de dosis aplicada de 36 a nivel de Plantas de Tratamiento es alta debido a que origina mayor cantidad de aplicación de sustancias químicas.

En ese sentido el policloruro de aluminio PAC sólido, sería el coagulante ideal para este tipo de agua cruda; no obstante, la dosis resultante de laboratorio resulta alta para el proceso a nivel de Planta de Tratamiento.

3.1.3 Resultados de la revisión documental.

Se revisaron los documentos físicos relacionados al proceso de potabilización para la obtención de una data de información con la que se verifico la confiabilidad de los

datos empleando el método del Alfa de Cronbach mediante el uso del software Minitab.

3.2 Validación y confiabilidad de los instrumentos.

La verificación de la validez y confiabilidad de los instrumentos empleados en este proceso investigativo, se desarrollaron conforme las cuatro fases señaladas en la metodología, tal como se detalla a continuación:

Fase I: en las visitas realizadas a la PTAP Atahualpa de la empresa AGUAPEN-EP, mediante el uso de las técnicas de la observación, experimentación y revisión de documentación, se recopilaron los datos necesarios para el levantamiento de toda la información.

Determinación de la confiabilidad del instrumento.

Mediante la recopilación de la información se elabora una Data con los porcentajes de remoción de la turbiedad del agua cruda de la Estación de Bombeo en San Rafael, principal fuente de captación de materia prima para el proceso de potabilización en la PTAP Atahualpa, durante al año 2022. Ver Anexo C.

Se entiende por confiabilidad al grado en el que un instrumento de varios ítems mide una muestra de una población, refiriéndose a una medición libre de errores. En ese sentido el coeficiente alfa es un índice que se utiliza para medir la confiabilidad del tipo de consistencia de una escala. El valor mínimo aceptable para este coeficiente es de 0.70 y un máximo de 0.90, donde los valores superiores indicaran que existe redundancia (Oviedo & Campo-Arias, 2005).

Para nuestro Data de estudio con un total de 12 elementos se obtuvo un coeficiente alfa de Cronbach de 0.8424, lo que indica que la consistencia de la información es muy buena. Ver Anexo D.

Fase II: en el laboratorio de Control de Calidad con el Analista de Calidad encargado, se realizaron varios ensayos simulando la etapa de coagulación del agua a nivel de Planta de Tratamiento para determinar el comportamiento e incidencia de los factores, cuyos resultados se encuentran expuestos en el numeral anterior.

Fase III: con los resultados obtenidos se aplicó el diseño de experimentos mediante un diseño factorial, utilizando el software Minitab, para seleccionar la sustancia ideal y la dosis óptima de coagulante que permita optimizar el proceso de potabilización del agua.

Determinación de la validez de constructo.

La validez se refiere al grado en el que un instrumento mide la variable que se quiere medir, este instrumento de medición debe representar a la mayoría de los componentes del contenido de las variables que se pretenden medir. Un constructo es una variable que se puede medir y tiene lugar dentro de una hipótesis o modelo teórico (Sampieri et al., 2014).

La validez de constructo se determinó analizando los resultados de los ensayos obtenidos mediante un diseño de experimento factorial. Un experimento es una serie de pruebas en las cuales se modifican las variables de entrada en un proceso productivo o un determinado sistema para definir las variables de salida o respuesta (Muyulema, 2017).

El diseño de experimentos DOE es muy utilizado cuando se tiene un producto cuyo resultado depende de una serie de variables que no se pueden controlar y que es conveniente ajustarlas para optimizar el proceso. El tipo de experimento utilizado para el análisis del trabajo investigativo es el diseño factorial completo con todas las combinaciones de factores y niveles (Muyulema, 2017).

Pautas principales para la creación de un diseño de experimentos.

- 1.- Identificación del problema: mejorar el porcentaje de remoción de la turbiedad del agua.
- 2.- Elección de los factores: tipo de coagulante y dosis aplicada.
- 3.- Seleccionar la variable de respuesta: influencia del porcentaje de remoción.
- 4.- Elección del tipo de diseño de experimentos: diseño factorial de dos factores, de cuatro y tres niveles con dos replicas para cada tratamiento.
- 5.- Desarrollo del experimento: uso del software Minitab Statistical.

6.- Conclusiones y sugerencias (Montgomery, 2004)

Diseño factorial con dos factores.

En el anexo F, se observa la creación del diseño en el software antes mencionado.

En base a los resultados obtenidos del ensayo test de jarras realizados a los cuatro tipos de coagulantes, se configuró un diseño factorial con dos factores. En ese sentido se creó un modelo factorial 4 x 3, considerando dos factores A (tipo de coagulante) y B (dosis del producto) con a y b ($a, b \geq 2$) niveles de prueba para construir un diseño factorial a x b, siendo estos los tratamientos y con dos replicas para conocer el efecto de los factores sobre el porcentaje de remoción de los sólidos en suspensión, el pH, el color y la temperatura.

La información para el análisis es la siguiente:

Tabla 12. Datos del experimento factorial 4 x 3 para el porcentaje de remoción.

Tipo de coagulante	Dosis de coagulante ppm						Total
	28		32		36		
A	51.90	49.69	57.59	54.04	60.13	59.63	332.98
B	52.28	46.58	46.46	49.69	54.18	54.04	303.23
C	75.44	76.67	70.87	70.67	70.74	72.67	437.06
D	84.74	80.67	87.11	83.33	86.64	88.67	511.16
	517.97		519.76		546.70		Y...=1584.43

Nota: Elaborado por el autor.

En donde: A = Sulfato de aluminio A.

B = Sulfato de aluminio B.

C = Policloruro de aluminio PAC sólido.

D = Policloruro de aluminio líquido

Las cantidades en los recuadros representan el porcentaje de remoción.

La tabla ANOVA para este tipo de diseño factorial a x b, está dada por:

Tabla 13. ANOVA para el diseño factorial a x b.

Factor	Suma de cuadrado SC	Grados de libertad GL	Cuadrados Medios CM	Estadístico de prueba	Valor - p
A	SC _A	a-1	CM _A	CM _A /CM _E	P(F>F ₀ ^A)
B	SC _B	b-1	CM _B	CM _B /CM _E	P(F>F ₀ ^B)
AB	SC _{AB}	(a-1)(b-1)	CM _{AB}	CM _{AB} /CM _E	P(F>F ₀ ^{AB})
Error	SC _E	ab(n-1)	CM _E		
Total	SC _T	abn-1			

Nota: Elaborado por autor, adaptado de (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Se procede a realizar los cálculos manuales. A continuación, la suma de los cuadrados de los efectos:

$$SC_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i..}^2}{bn} - \frac{Y_{...}^2}{N}$$

$$SC_A = \frac{332.98^2 + 303.23^2 + 437.06^2 + 511.16^2}{3 \times 2} - \frac{1584.43^2}{4 \times 3 \times 2} = 4587.58$$

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j.}^2}{an} - \frac{Y_{...}^2}{N}$$

$$SC_B = \frac{517.97^2 + 519.76^2 + 546.70^2}{4 \times 2} - \frac{1584.43^2}{4 \times 3 \times 2} = 64.77$$

$$SC_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij.}^2}{n} - \frac{Y_{...}^2}{N} - SC_A - SC_B$$

$$SC_{AB} = \frac{218735.25}{2} - \frac{1584.43^2}{24} - 4587.58 - 64.77 = 114.51$$

$$SC_T = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 \sum_{l=1}^3 \frac{Y_{ijl}^2}{n} - \frac{Y_{...}^2}{N} = 109418.09 - 104600.77 = 4817.32$$

$$SC_E = SC_T - SC_A - SC_B - SC_{AB}$$

$$SC_E = 4817.32 - 4587.58 - 64.77 - 114.51 = 50.46$$

Los grados de libertad.

$$a - 1 = 4 - 1 = 3$$

$$b - 1 = 3 - 1 = 2$$

$$(a - 1)(b - 1) = 3 \times 2 = 6$$

$$ab(n - 1) = 12(2 - 1) = 12$$

$$abn - 1 = 24 - 1 = 23$$

Los cuadrados medios son:

$$CM_A = \frac{SC_A}{GL} = \frac{4587.58}{3} = 1529.19$$

$$CM_B = \frac{SC_B}{GL} = \frac{64.77}{2} = 32.39$$

$$CM_{AB} = \frac{SC_{AB}}{GL} = \frac{114.51}{6} = 19.09$$

$$CM_E = \frac{SC_E}{GL} = \frac{50.46}{12} = 4.21$$

Estadísticos de prueba.

$$F_O = \frac{CM_A}{CM_E} = \frac{1529.19}{4.21} = 363.23$$

$$F_O = \frac{CM_B}{CM_E} = \frac{32.39}{4.21} = 7.69$$

$$F_O = \frac{CM_{AB}}{CM_E} = \frac{19.09}{4.21} = 4.53$$

Con esta información se construye la tabla para el análisis de varianza.

Tabla 14. ANOVA Análisis de varianza del ejemplo.

Factor	Suma de cuadrado SC	Grados de libertad GL	Cuadrados Medios CM	Estadístico de prueba	Valor - p
Coagulante	4587.58	3	1529.19	363.23	3.49
Dosis	64.77	2	32.39	7.69	3.89
AB	114.51	6	19.09	4.53	3.00
Error	50.46	12	4.21		
Total	4817.32	23			

Nota: Elaborado por el autor, adaptado de (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

El valor – p se calcula en base a la Tabla Puntos porcentuales de la distribución F con un nivel de significancia del 5% equivalente a 0.05 y tomando en cuenta los grados de libertad del factor (numerador) y el error (denominador).

Se comparan los valores del estadístico de prueba y el valor – p y se obtiene:

$$363.23 > 3.49$$

$$7.69 > 3.89$$

$$4.53 > 3.00$$

Los tres valores del estadístico de prueba son mayores al valor – p, por lo que se rechaza la hipótesis nula.

Para la verificación de los resultados, aplicaremos el software Minitab Statistical, obteniendo lo siguiente:

Tabla 15. Análisis de varianza ANOVA del ejemplo. Minitab.

Origen	° L	+ cuadrados	Cuadrados medios	F valor	p valor
Modelo	11	4766,06	433,28	102,75	0,000
Lineal	5	4651,07	930,21	220,59	0,000
Coagulante	3	4586,63	1528,88	362,56	0,000
Dosis	2	64,44	32,22	7,64	0,007
Interacciones de 2 términos	6	114,99	19,17	4,54	0,012
Coagulante x dosis	6	114,99	19,17	4,54	0,012
Error	12	50,60	4,22		
Total	23	4816,66			

Nota: Elaborado por el autor.

Interpretación: La tabla ANOVA indica que para un nivel alfa de 0.05 vs el valor de P, todos los registros son menores al 0.05, por lo tanto, los factores A (tipo de coagulante), B (dosis del producto), las interacciones de los dos términos y la interacción de los dos factores afectan al porcentaje de remoción de los sólidos en suspensión del agua cruda.

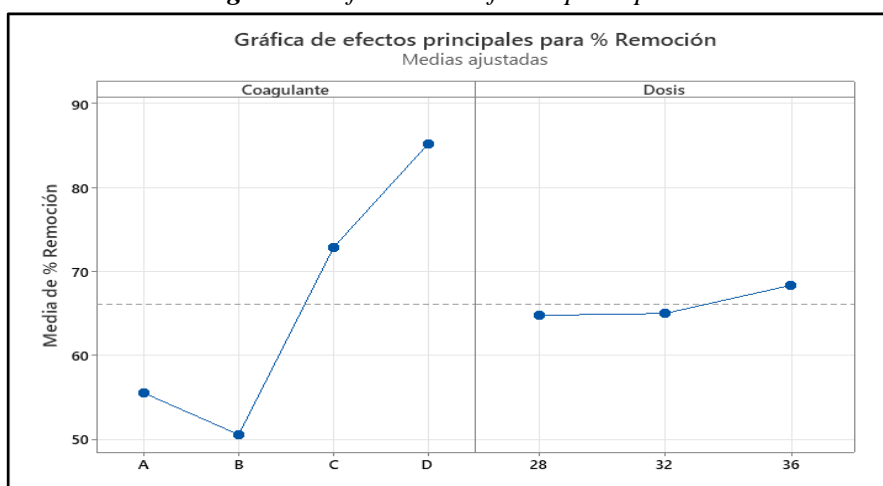
Gráficas factoriales.

En base a la gráfica de los efectos principales, los coagulantes policloruro de aluminio PAC sólido y líquido son más eficientes que el sulfato de aluminio tipo A y B para la remoción de sólidos en suspensión, llegando a porcentajes superiores al 70% y 80% respectivamente. En ese sentido el PAC líquido es el coagulante con el mejor comportamiento para la remoción de sólidos sin embargo a nivel de laboratorio no presenta un buen aglutinamiento de partículas que faciliten la decantación a nivel de Plantas de Tratamiento, por lo que alteraría la calidad del agua en proceso.

De acuerdo a este análisis el coagulante ideal para este tipo de agua y con las mejores características para la formación de masas de lodos fáciles de sedimentar es el policloruro de aluminio PAC sólido.

Referente a la dosis óptima para lograr el mayor porcentaje de remoción de sólidos, la gráfica de los efectos principales indica que una dosis de 36 ppm puede ser ideal, no obstante, esta cantidad requiere de gran demanda de químicos para preparar la sustancia coagulante a nivel de Plantas de Tratamiento.

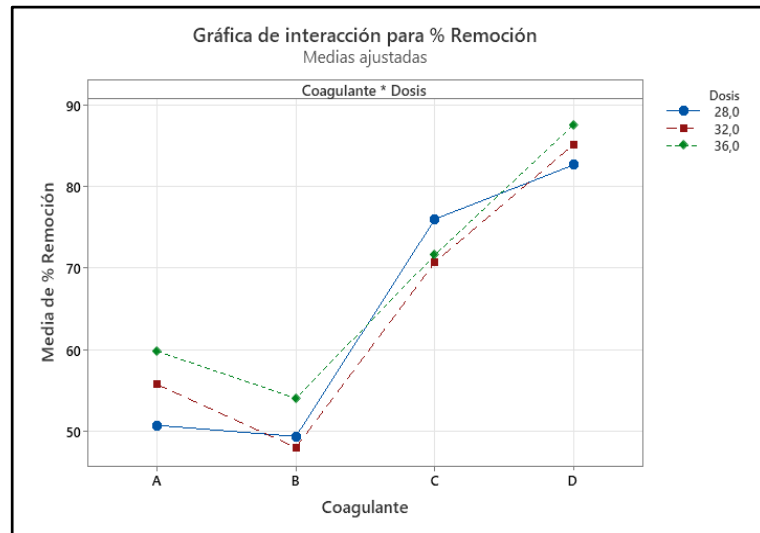
Fig. 31. Gráfica de los efectos principales.



Nota: Elaborado por el autor.

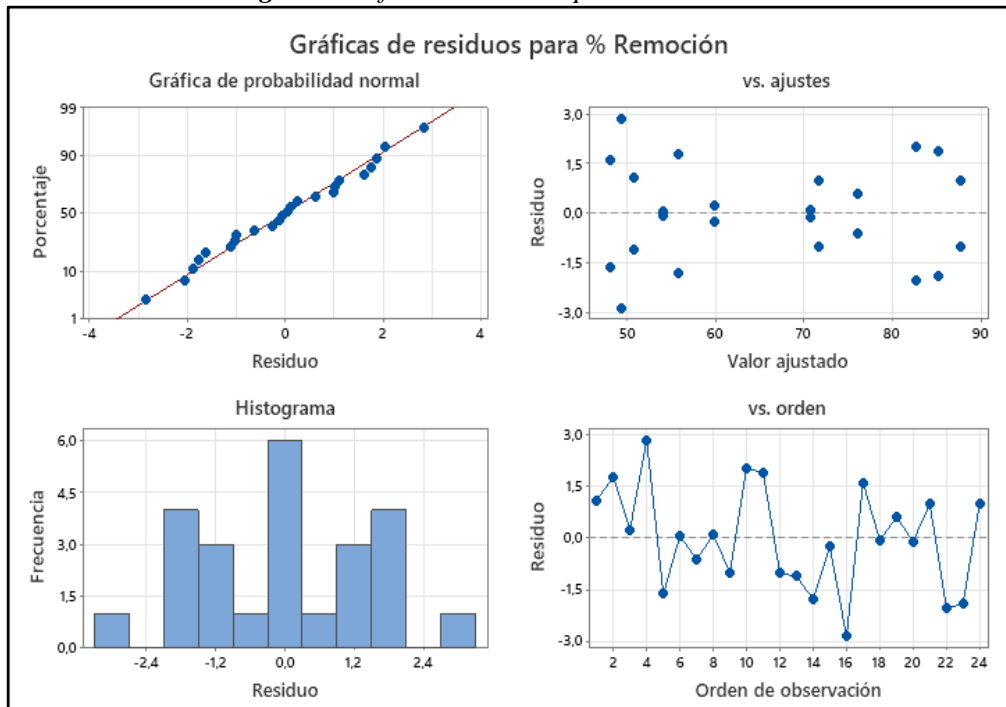
La gráfica de interacción para el porcentaje de remoción indica que con el coagulante A (sulfato de aluminio sólido A) con una dosis mínima de 28 ppm se genera un porcentaje de remoción superior al 50%; en cambio con el coagulante codificado con la letra D (PAC líquido) con una dosis de 36 ppm se obtiene un porcentaje de remoción cerca del 90%, lo que a nivel de laboratorio lo hace el más efectivo para la clarificación del agua.

Fig. 32. Gráfica de interacción.



Nota: Elaborado por el autor.

Fig. 33. Gráfica de residuos para rendimiento.



Nota: Elaborado por el autor.

Los dos factores y la interacción entre ambos es significativa, los residuos se distribuyen normalmente por lo que el diseño es válido y adecuado para caracterizar el problema.

Ecuación de regresión

$$\begin{aligned} \% \text{ Remoción} = & 66,015 - 10,518 \text{ coagulante A} - 15,477 \text{ coagulante B} + 6,817 \text{ coagulante C} \\ & + 19,178 \text{ coagulante D} - 1,269 \text{ dosis 28} - 1,045 \text{ dosis 32} + 2,314 \text{ dosis 36} \\ & - 3,43 \text{ coagulante x dosis A28} + 1,36 \text{ coagulante x dosis A32} \\ & + 2,07 \text{ coagulante x dosis A36} + 0,16 \text{ coagulante x dosis B28} \\ & - 1,42 \text{ coagulante x dosis B32} + 1,26 \text{ coagulante x dosis B36} \\ & + 4,49 \text{ coagulante x dosis C28} - 1,02 \text{ coagulante x dosis C32} \\ & - 3,48 \text{ coagulante x dosis C36} - 1,22 \text{ coagulante x dosis D28} \\ & + 1,07 \text{ coagulante x dosis D32} + 0,15 \text{ coagulante x dosis D36}. \end{aligned}$$

Tabla 16. Datos del experimento factorial 4 x 3 para el potencial de hidrogeno pH.

Tipo de coagulante	Dosis de coagulante ppm					
	28		32		36	
A	7.40	7.27	7.41	7.42	7.51	7.49
B	7.11	7.09	7.16	7.12	7.24	7.26
C	7.14	7.18	7.20	7.17	7.08	7.09
D	6.32	6.31	6.30	6.28	6.37	6.36

Nota: Elaborado por el autor.

Tabla 17. Análisis de varianza ANOVA del ejemplo. Minitab.

Origen	° L	+ cuadrados	Cuadrados medios	F valor	p valor
Modelo	11	4.13703	0.37609	392.45	0,000
Lineal	5	4.09023	0.81805	853.61	0,000
Coagulante	3	4.06900	1.35633	1415.30	0,000
Dosis	2	0.02123	0.01062	11.08	0,002
Interacciones de 2 términos	6	0.04680	0.00780	8.14	0,001
Coagulante x dosis	6	0.04680	0.00096	8.14	0,001
Error	12	0.01150			
Total	23	4.14853			

Nota: Elaborado por el autor.

Interpretación: La tabla ANOVA indica que para un nivel alfa de 0.05 vs el valor de P, todos los registros son menores al 0.05, por lo tanto, los factores A (tipo de coagulante), B (dosis del producto), las interacciones de los dos términos y la interacción de los dos factores afectan el valor del pH del agua.

Tabla 18. Datos del experimento factorial 4 x 3 para el color en unidades CoPt.

Tipo de coagulante	Dosis de coagulante ppm					
	28		32		36	
A	25	27	21	25	16	14
B	26	29	24	23	22	21
C	14	12	14	13	13	12
D	6	7	4	4	3	4

Nota: Elaborado por el autor.

Tabla 19. Análisis de varianza ANOVA del ejemplo. Minitab.

Origen	° L	+ cuadrados	Cuadrados medios	F valor	p valor
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	11	1572.46	142.951	79.79	0,000
Lineal	5	1500.04	300.008	167.45	0,000
Coagulante	3	1394.46	464.819	259.43	0,000
Dosis	2	105.58	52.792	29.47	0,000
Interacciones de 2 términos	6	72.42	12.069	6.74	0,003
Coagulante x dosis	6	72.42	12.069	6.74	0,003
Error	12	21.50	1.792		
Total	23	1593.96			

Nota: Elaborado por el autor.

Interpretación: La tabla ANOVA indica que para un nivel alfa de 0.05 vs el valor de P, todos los registros son menores al 0.05, por lo tanto, los factores A (tipo de coagulante), B (dosis del producto), las interacciones de los dos términos y la interacción de los dos factores afectan en el parámetro del color del agua en el tratamiento.

Tabla 20. Datos del experimento factorial 4 x 3 para la temperatura en °C

Tipo de coagulante	Dosis de coagulante ppm					
	28		32		36	
A	21	23	21	23	21	23
B	21	22	21	22	21	22
C	21.5	21	21.5	21	21.5	21
D	21.5	21	21.5	21	21.5	21

Nota: Elaborado por el autor.

Tabla 21. Análisis de varianza ANOVA del ejemplo. Minitab.

Origen	° L	+ cuadrados	Cuadrados medios	F valor	p valor
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	11	2.2500	0.204545	0.30	0.973
Lineal	5	2.2500	0.45000	0.65	0.664
Coagulante	3	2.2500	0.750000	1.09	0.390
Dosis	2	0.0000	0.000000	0.00	1.000
Interacciones de 2 términos	6	0.00000	0.000000	0.00	1.000
Coagulante x dosis	6	0.00000	0.000000	0.00	1.000
Error	12	8.2500	0.687500		
Total	23	10.5000			

Nota: Elaborado por el autor.

Interpretación: La tabla ANOVA indica que para un nivel alfa de 0.05 vs el valor de P, todos los registros son mayores al 0.05, por lo tanto, los factores A (tipo de coagulante), B (dosis del producto), las interacciones de los dos términos y la interacción de los dos factores no afectan en el parámetro de la temperatura del agua.

La eficiencia de una PTAP está vinculada al cumplimiento de las normativas de control, especialmente en los parámetros de calidad del agua, donde la turbiedad resulta ser el factor más importante en el proceso de tratamiento (Martínez-Orjuela et al., 2020). En ese sentido y en base a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, se procede a la verificación de la hipótesis tomando en cuenta los factores de tipo y cantidad de coagulante.

3.3 Verificación de hipótesis.

Una hipótesis es una afirmación referente a los parámetros de un proceso, que se puede probar a partir de la muestra significativa de una población. Después de plantear la hipótesis se pueden obtener los datos realizando los ensayos para la obtención de los parámetros (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Para el caso de nuestro problema de estudio, se plantean las siguientes hipótesis:

H_0 : Efecto de la dosis de coagulante (A) = 0

H_A : Efecto de la dosis de coagulante (A) \neq 0

H_0 : Efecto del tipo de coagulante (B) = 0

H_A : Efecto del tipo de coagulante (B) $\neq 0$

H_0 : Dosis x tipo de coagulante (AB) = 0

H_A : Dosis x tipo de coagulante (AB) $\neq 0$

La hipótesis nula H_0 es la que se pretende rechazar, mientras que la hipótesis alternativa H_A indica la aceptación entre lo investigado y lo que se estima. En ese sentido al realizar los cálculos de la comprobación de las hipótesis, si el resultado se encuentra dentro del rango de la H_0 , esta se rechaza y se acepta la hipótesis H_A .

Definición de hipótesis.

Hipótesis nula H_0 : Aplicar el diseño de experimentos para la optimización del proceso de potabilización del agua en la empresa AGUAPEN-EP, en la provincia de Santa Elena – Ecuador, no ayudará a minimizar los recursos económicos en los insumos químicos, entre otros factores relevantes.

Hipótesis alternativa H_A : Aplicar el diseño de experimentos para la optimización del proceso de potabilización del agua en la empresa AGUAPEN-EP, en la provincia de Santa Elena – Ecuador, ayudará a minimizar los recursos económicos en los insumos químicos, entre otros factores relevantes.

De acuerdo al análisis de varianza ANOVA de la Tabla 11., todos los valores de P son < 0.05 ; por lo que se rechaza la hipótesis nula H_0 , lo que quiere decir que tanto el tipo de coagulante, la dosis y la interacción de los dos términos afectan en la remoción de los sólidos suspendidos en el agua.

En tal sentido se acepta la hipótesis alternativa H_A que expresa que Aplicar el diseño de experimentos para la optimización del proceso de potabilización del agua en la empresa AGUAPEN-EP, en la provincia de Santa Elena – Ecuador, ayudará a minimizar los recursos económicos en los insumos químicos, entre otros factores relevantes.

Fase IV: los resultados obtenidos mediante el diseño de experimento factorial determinaron lo siguiente:

- ✓ El tipo de coagulante y la cantidad de dosis a nivel de laboratorio, influyen en la remoción de la turbiedad del agua, por consiguiente, también alterará las condiciones del agua en proceso a nivel de Plantas de Tratamiento.
- ✓ El análisis de hipótesis permitió aceptar la hipótesis alterna H_A.
- ✓ El tipo de coagulante ideal para el tratamiento de este tipo de aguas es el PAC sólido con una dosificación de 28 ppm, la cual es considerada alta para aplicarla a un nivel macro.
- ✓ Las masas de lodo (flóculos) formadas por la acción del coagulante son muy pequeñas, por lo que existe dificultad para su sedimentación.

3.4 Proceso de potabilización de la Planta Atahualpa utilizando sulfato de aluminio tipo B sólido como coagulante.

La PTAP Atahualpa de la empresa AGUAPEN-EP, es de tipo convencional, tiene aproximadamente 23 años desde su puesta en marcha, en la actualidad procesa caudales de entrada de agua cruda de entre 440 l/s hasta 860 l/s., dependiendo de la operatividad de los GMB de la Estación ubicada en San Rafael, de las condiciones climáticas, el tiempo día y noche y la presencia de personas no residenciales en épocas de temporada.

Coagulante: se aplica sulfato de aluminio tipo B sólido con una dosis de 24 ppm y una concentración del 3.5% de solución, para la remoción de la turbiedad.

Con estos datos para saber a escala mayor la cantidad de soluto en kilogramos necesarios para preparar en las tolvas, aplicamos la siguiente fórmula:

$$x = \frac{C(\%)xV}{100}$$

Donde: C = concentración del producto en %.

V = volumen en litros del recipiente.

x = Kg.

$$x = \frac{3.5x10000}{100} = 350 \text{ Kg} = 14 \text{ sacos de } 25 \text{ Kg.}$$

Para determinar el caudal de coagulante desde la salida de la bomba dosificadora hacia la cámara de medición y mezcla, se emplea la siguiente fórmula:

$$x = \frac{QxD}{C}$$

Donde: Q = caudal de agua cruda m³/s.

D = dosis de coagulante ppm.

C = concentración g/l = 350.000 gr/10000 l.

X = l/s.

$$x = \frac{0.860 \times 24}{35} = 0.590 \frac{l}{s}$$

Para conocer el consumo de sulfato de aluminio en un día, aplicamos la siguiente ecuación:

$$W = Q \times D$$

Donde: Q = caudal de agua cruda m³/día.

D = dosis de coagulante ppm (g/m³).

W = consumo de sulfato de aluminio (Kg/día).

$$W = 74304 \frac{m^3}{día} \times 24 \frac{g}{m^3} = 1783296 \frac{g}{día}$$

$$W = 1783.30 \frac{Kg}{día} = 71 \text{ sacos de } 25 \text{ Kg. aprox. en un día.}$$

$$W = 2130 \text{ sacos de } 25 \text{ Kg. aprox. en un mes.}$$

Desinfectante: utiliza el cloro gas en cilindros de 907 Kg., para dosificar el agua desde las salas de pre (6 ppm) y post cloración (1 ppm).

Cámara de medición y mezcla rápida: la materia prima es decir el agua cruda, ingresa a la canaleta Parshall, en donde una regleta ubicada en una posición estratégica mide el caudal de entrada, que en condiciones actuales es de 860 l/s. Adicionalmente existe un caudalímetro digital para la medición del caudal de ingreso instalado en la línea de ingreso de agua cruda a la PTAP Atahualpa.

En esta sección se aplican las sustancias químicas para aprovechar la mezcla con la velocidad y la turbulencia del agua en el canal de ingreso.

Floculadores: son hidráulicos y la velocidad del agua para la agitación lenta y efecto de la sustancia coagulante depende del caudal de entrada del agua cruda.

Sedimentadores: para facilitar la sedimentación de los lodos, los módulos de potabilización del agua MPA tienen una serie de tubos decantadores tipo colmena con una inclinación de 60° para impedir el acceso de los flóculos formados por la acción del coagulante hacia la parte superior.

En esta sección se realizan tres purgas diarias para la evacuación de los lodos sedimentados, si el caso amerita es necesario realizar las purgas convenientes para garantizar la calidad del agua en proceso. Los decantadores reciben un mantenimiento periódico de dos veces al año.

Filtros: existen un total de 8 filtros formados por una capa de grava, arena y antracita para la purificación del agua y tener los parámetros exigidos por la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108:2020. Según el caudal y coagulante utilizado los filtros pueden resistir desde un rango de 28 a 32 horas para llegar a saturarse, tiempo en el cual deberán realizarse los respectivos retro lavados. En este contexto se llegan hacer desde 4 a 6 retro lavados de filtros.

Cámara de reunión: es esta área se aplica una dosis de 1 ppm de cloro gas para garantizar el parámetro del cloro residual en las líneas de distribución.

Reservorio de agua tratada: se almacena el agua potable que proviene de la cámara de reunión. Por medio de un medidor electrónico se lee y se controla el nivel del agua conforme ingresa y sale por medio de las bombas de impulsión hacia los consumidores.

Casa bomba: se encuentran tres bombas centrifugas para el despacho del agua potable hacia tres reservorios ubicados en Santa Elena y demás sitios hasta donde llegan las redes de distribución de AGUAPEN-EP, en los cantones de Salinas, La Libertad y Santa Elena.

Producción: con un caudal de entrada de 860 l/s diarios, esta Planta de Tratamiento llega a producir 74.304 m³ al día, equivalentes a 2'229.120 m³ mensuales aproximadamente. Ver Anexo M.

3.5 Proceso de potabilización del agua de la PTAP Atahualpa utilizando policloruro de aluminio como coagulante.

En la sección resultados, mediante la aplicación del diseño de experimentos factorial, se determinó que el coagulante ideal para el proceso de potabilización con este tipo de agua cruda, es el policloruro de aluminio PAC sólido, con una dosis de 28 ppm a nivel de laboratorio, no obstante, a nivel de Planta de Tratamiento esta cantidad es considerada alta debido a la gran demanda de uso del producto.

Aplicación del diseño de experimentos para la optimización del proceso de potabilización del agua en la PTAP Atahualpa.

Los contaminantes presentes en el agua cruda y los sólidos en suspensión pueden ser eliminados por productos químicos que se aplican para la coagulación del agua y el sulfato de aluminio es el coagulante más aplicado comúnmente en las PTAP (Martínez-Orjuela et al., 2020).

Un estudio realizado al proceso de coagulación del agua en una PTAP de Colombia concluyó que el policloruro de aluminio en combinación con otro químico permitió mejorar la sedimentación de las partículas presentes en el agua, aumentando el tiempo de duración de la colmatación de los filtros (Fernández et al., 2021).

En ese sentido y en base a los resultados obtenidos en los ensayos anteriores, se realiza un diseño factorial 2^2 , para estudiar el efecto que tiene la variación de la cantidad de dosis y el tipo de coagulante en el proceso de potabilización del agua.

Los niveles para el análisis del diseño factorial 2^2 son: la dosis en un rango de 12 y 36 ppm y dos tipos de coagulantes codificados como B para el sulfato de aluminio y C para el policloruro de aluminio.

Factores	Datos	
	Nivel (-)	Nivel (+)
Dosis de coagulante (ppm)	12	36
Tipo de coagulante	B	C

Se identifica en la tabla el valor -1 para el nivel más bajo y +1 para el nivel alto. En el caso del factor cualitativo se asocia también con los dos niveles, pues esta decisión no afectará el desarrollo del experimento.

De los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos, se procede a configurar la matriz de diseño.

Matriz de experimentos		Plan		Resultados %		
D	T	Dosis	Tipo	Ensayo 1	Ensayo 2	Total
-	-	12	B	-77.85	-56.52	-134.37 = (1)
+	-	36	B	54.18	54.04	108.22 = a
-	+	12	C	58.39	70.74	129.13 = b
+	+	36	C	47.33	72.67	120 = ab

Nota: Elaborado por el autor.

Mediante la siguiente expresión, se calcula el efecto principal de la dosis del coagulante:

$$D = \frac{1}{2n} [a + ab - b - 1]$$

$$D = \frac{1}{2(2)} [108.22 + 120 - 129.13 - (-134.37)] = 58.36\%$$

Este valor indica que, al variar la dosis del coagulante del nivel inferior al superior, el porcentaje de remoción aumentará en un 58.36% en promedio.

Para el caso del tipo de coagulante, el efecto se encuentra con la siguiente expresión:

$$T = \frac{1}{2n} [b + ab - a - 1]$$

$$T = \frac{1}{2(2)} [129.13 + 120 - 108.22 - (-134.37)] = 68.82\%$$

Este resultado nos indica que al cambiar de coagulante de sulfato de aluminio al PAC se incrementa el porcentaje de remoción en un 68.82% promedio.

El efecto de la interacción entre los dos factores es:

$$DT = \frac{1}{2n} [ab + 1 - a - b]$$

$$DT = \frac{1}{2(2)} [120 + (-134.37) - 108.22 - 129.13] = -125.86\%$$

Se procede a obtener la suma de los cuadrados, con las siguientes expresiones:

$$SC_D = \frac{[a + ab - b - 1]^2}{4n}$$

$$SC_D = \frac{[108.22 + 120 - 129.13 - (-134.37)]^2}{4 \times 2} = 6812,95$$

$$SC_T = \frac{[b + ab - a - 1]^2}{4n}$$

$$SC_T = \frac{[129.13 + 120 - 108.22 - (-134.37)]^2}{4 \times 2} = 9472,38$$

$$SC_{DT} = \frac{[ab + 1 - a - b]^2}{4n}$$

$$SC_{DT} = \frac{[120 + (-134.37) - 108.22 - 129.13]^2}{4 \times 2} = 7920,37$$

La suma de cuadrados totales es:

$$SC_{Total} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^n \frac{Y_{ijl}^2}{n} - \frac{Y_{...}^2}{N} = 31045,52 - 6215,01 = 24830,51$$

Por lo tanto, la suma de cuadrados del error es la siguiente:

$$SC_E = SC_{Total} - SC_D - SC_T - SC_{DT}$$

$$SC_E = 24830,51 - 6812,95 - 9472,38 - 7920,37 = 624,81$$

Análisis de varianza

Factor	Suma de cuadrado SC	Grados de libertad GL	Cuadrados Medios CM	Estadístico de prueba	Valor - p
Dosis	6812,95	1	6812,95	43,61	7.71
Tipo	9472,38	1	9472,38	60,64	
DT	7920,37	1	7920,37	50.71	
Error	624,81	4	156,20		
Total	24830,51	7			

Nota: Elaborado por el autor, adaptado de (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Se comparan los valores del estadístico de prueba y el valor – p y se obtiene:

$$43.61 > 7.71$$

$$60.64 > 7.71$$

$$50.71 > 7.71$$

De la tabla ANOVA se determina que los valores del estadístico de prueba son mayores al valor de F tabulada por lo que quiere decir que tanto la cantidad de dosis como el tipo de coagulante influyen en el proceso de tratamiento del agua.

El modelo de regresión esta dado por:

$$\beta_0 = \text{promedio de respuestas} = \frac{(-134,37 + 108,22 + 129,13 + 120)}{4 \times 2} = 27,87$$

$$\text{Efecto principal del factor dosis } D = \frac{228,22 - (-5,24)}{2 \times 2} = 58,37$$

$$\text{Efecto principal del factor dosis } T = \frac{(249,13 - (-26,15))}{2 \times 2} = 68,82$$

$$\text{Efecto principal de la interacción } DT = \frac{(-14,37 - 237,35)}{2 \times 2} = -62,93$$

$$\beta_1 = \frac{D}{2} = \frac{58,37}{2} = 29,19$$

$$\beta_2 = \frac{T}{2} = \frac{68,82}{2} = 34,41$$

$$\beta_3 = \frac{DT}{2} = \frac{-62.93}{2} = -31,47$$

$$\text{Modelo de regresión ajustado } y_{est} = 27,87 + 29,19x_1 + 34,41x_2$$

Para calcular los residuales, se toma en cuenta la dosis del coagulante con su codificación de nivel bajo ($X_1=-1$) y el tipo de coagulante ($X_2=-1$)

$$y_{est} = 27,87 + 29,19(-1) + 34,41(-1) = -35,73$$

Por consiguiente, las combinaciones de los tratamientos y residuales son:

$$e_1 = -77,85 - (-35,73) = -42,12$$

$$e_2 = -56,52 - (-35,73) = -20,79$$

Para el nivel alto de la dosis y el nivel bajo del tipo de coagulante, obtenemos:

$$y_{est} = 27,87 + 29,19(+1) + 34,41(-1) = 22,65$$

$$e_1 = 54,18 - 22,65 = 31,53$$

$$e_2 = 54,04 - 22,65 = 31,39$$

Para el nivel bajo de la dosis y el nivel alto del tipo de coagulante, se tiene:

$$y_{est} = 27,87 + 29,19(-1) + 34,41(+1) = 33,09$$

$$e_1 = 58,39 - 33,09 = 25,3$$

$$e_2 = 70,74 - 33,09 = 37,65$$

Finalmente, para el nivel alto de ambos factores.

$$y_{est} = 27,87 + 29,19(+1) + 34,41(+1) = 91,47$$

$$e_1 = 47,33 - 91,47 = 44,14$$

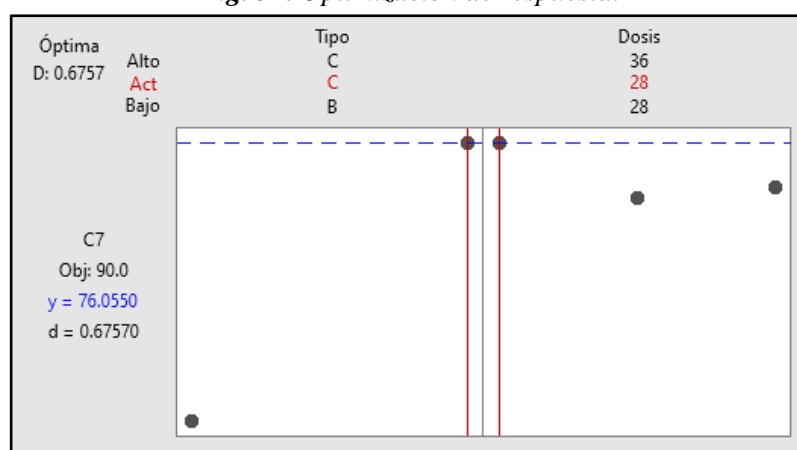
$$e_2 = 72,67 - 91,47 = 18,80$$

En ese sentido, los cálculos realizados indican que con una dosis de 36 ppm de sulfato de aluminio se produce una remoción de turbiedad promedio de 54,11%, mientras que,

con una dosis de 12 ppm de PAC, se alcanza a obtener un porcentaje de remoción promedio de 64,57, por lo que resulta emplear este producto para optimizar el proceso de potabilización del agua desde el tratamiento de la materia prima.

Con los datos de la Tabla 11, se descartan los coagulantes sulfato de aluminio tipo A por la alta dosis y el policloruro de aluminio líquido por la formación de flocs con inconvenientes para decantar. En ese sentido aplicando el diseño de experimentos para la optimización del proceso de potabilización del agua y con la ayuda del software Minitab Statistical, obtenemos la siguiente información.

Fig. 34. Optimización de respuesta.



Nota: Elaborado por el autor.

Parámetros						
Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
C7	Objetivo	47	90	100	1	1
Solución	Tipo	Dosis	Ajuste	Deseabilidad compuesta		
1	C	28	76.055	0.675698		

Los datos obtenidos indican que con el coagulante tipo C, es decir el policloruro de aluminio con una dosis de 28 ppm se obtiene el mejor porcentaje de remoción 76.055 para la optimización del proceso de potabilización.

Bajo este argumento, se realiza un nuevo ensayo solo con el PAC sólido, con dosis bajas y con la adición de un polímero para mejorar la consistencia de los lodos para determinar el comportamiento de la remoción de la turbiedad con estos parámetros. Los datos para realizar el Test de Jarras con el PAC en bajas concentraciones, fueron los siguientes:

Fig 35. Resultados Test de Jarras del policloruro de aluminio PAC sólido y adición de polímero.

Test de Jarras							
Fecha:	06 – 11 - 2023			Mezcla rápida:	200 rpm (1 min)		
Muestra:	Agua cruda			Mezcla semirápida:	80 rpm (8 min)		
Lugar:	Planta Atahualpa			Mezcla media:	60 rpm (8 min)		
Volumen:	1000 ml			Mezcla lenta:	40 rpm (5 min)		
Coagulante:	Policloruro de aluminio PAC sólido			Tiempo de sedimentación:	15 minutos		
Jarra	Solución al 3.5 %		Polímero al 0.05 %	Turbiedad NTU	pH	Color CoPt	% Remoción
	ppm	ml	ml				
1.- Agua cruda	6	0.171	0.5	0.745	7.13	29	51.94
2.- Agua cruda	8	0.229	0.5	0.667	7.01	29	56.97
3.- Agua cruda	10	0.286	0.5	0.563	6.99	22	63.68
4.- Agua cruda	12	0.343	0.5	0.553	7.04	22	64.32
5.- Agua cruda	14	0.400	0.5	0.524	6.97	20	66.19
6.- Agua cruda	16	0.457	0.5	0.462	7.01	19	70.19
Agua cruda				1.55	7.14	40	

Gráfico de turbiedad

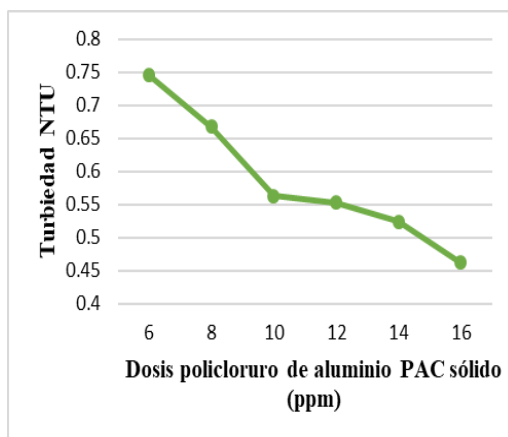
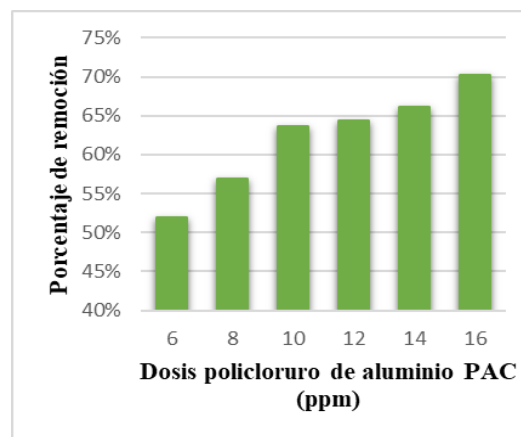


Gráfico de % de remoción



Nota: Elaborado por el autor.

Interpretación: Con una solución de policloruro de aluminio PAC sólido al 3.5 % de concentración y la adición de una solución de polímero al 0.05% a los 9 minutos de agitación, los porcentajes de remoción de sólidos se encontraron desde 51.94% hasta 70.19%, mejorando la consistencia de los flóculos para facilitar su decantación. La dosis ideal determinada en el ensayo fue de 16 ppm, sin embargo, de acuerdo a las condiciones del agua a nivel de Planta de Tratamiento, se recomienda la dosis de 12 ppm. El ensayo fue realizado a una temperatura ambiente de 21.5 °C.

Las gráficas indican también que mientras aumenta la dosis de PAC sólido, disminuye la turbiedad del agua y por consiguiente se incrementa el porcentaje de remoción.

Los datos obtenidos en el último ensayo se transfieren al proceso de potabilización de la PTAP Atahualpa, cuya etapa de coagulación ha sido simulada mediante el test de jarras, más un monitoreo constante en el proceso de potabilización se garantizará la calidad del agua en todas las etapas del tratamiento.

En los floculadores hidráulicos se aplica la solución del polímero al 0.05% de concentración para que los flocs formados mejoren su aglutinamiento y peso para de esta manera facilitar su decantación.

Para la preparación del PAC sólido en las tolvas de la Casa Químicos, con una dosis de 12 ppm y una concentración del 3.5% de solución, se requiere la siguiente cantidad de producto:

$$x = \frac{3.5 \times 10000}{100} = 350 \text{ Kg} = 14 \text{ sacos de } 25 \text{ Kg}.$$

El caudal de coagulante desde la salida de la bomba dosificadora hacia la cámara de medición es de:

$$x = \frac{0.860 \times 12}{35} = 0.295 \frac{l}{s}.$$

Para conocer el consumo de PAC en un día, aplicamos la siguiente ecuación:

$$W = Q \times D$$

Donde: Q = caudal de agua cruda $m^3/\text{día}$.

D = dosis de coagulante ppm (g/m^3).

W = consumo de PAC ($Kg/\text{día}$).

$$W = 74304 \frac{m^3}{\text{día}} \times 12 \frac{g}{m^3} = 891648 \frac{g}{\text{día}}.$$

$$W = 891.648 \frac{Kg}{día} = 36 \text{ sacos de } 25 \text{ Kg. aprox. en un día.}$$

$$W = 1080 \text{ sacos de } 25 \text{ Kg. aprox. en un mes.}$$

Filtros: debido al aumento del porcentaje de remoción de la turbiedad con el PAC, el tiempo para llegar a la colmatación de los filtros va de 40 a 50 horas, con lo que se desperdicia menos cantidad de agua en las purgas, limpieza de decantadores y lavado de filtros.

Productividad. – Conociendo el volumen de producción, la cantidad de producto mensual estimada y el precio del Kg. del producto obtenemos:

Volumen producido: 860 l/s diarios = 74.304 m³ al día, equivalentes a 2'229.120 m³ mensuales.

Costo del PAC: 27000 Kg x USD \$ 0.90 = USD \$ 24300.

$$PM = \frac{2'229.120 \text{ m}^3}{\text{USD } \$ 24300} = 91.73 \text{ m}^3$$

Por cada dólar invertido en la adquisición del PAC se produce 91.73 m³ de agua para el consumo humano.

Costo del sulfato de aluminio tipo B sólido: 53250 Kg x USD \$ 0.60 = USD \$ 31950.

$$PM = \frac{2'229.120 \text{ m}^3}{\text{USD } \$ 31950} = 69.77 \text{ m}^3$$

Por cada dólar invertido en la adquisición del sulfato de aluminio tipo B se produce 69.77 m³ de agua para el consumo humano.

$$\text{Eficiencia física} = \frac{\text{Salida útil de materia prima}}{\text{Entrada de materia prima}}$$

Agua utilizada en el proceso (lavado de filtros, purgas, decantadores = 2%)

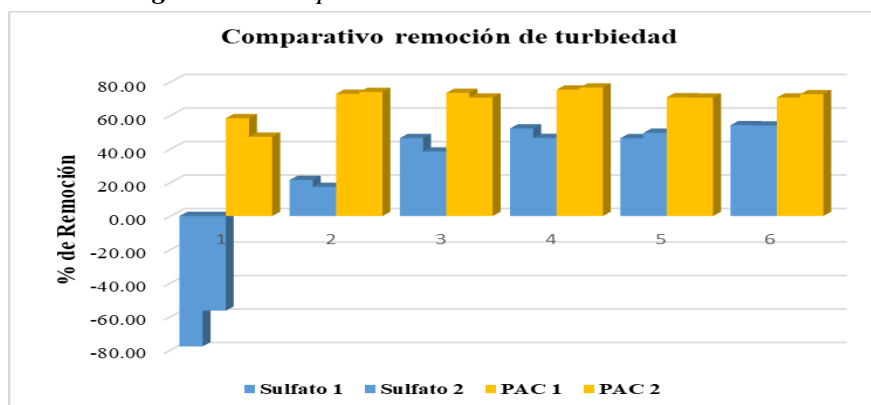
$$EF = \frac{2'184.538 \text{ m}^3}{2'229.120 \text{ m}^3} = 0.98$$

Existe una pérdida del 2% y una eficiencia física del 98%.

Comparación entre proceso con sulfato de aluminio y la optimización con el diseño de experimentos.

De los resultados obtenidos en los ensayos del Test de jarras se realiza una comparación del porcentaje de remoción entre los coagulantes con las mejores características.

Figura 36. Comparación de la remoción de turbiedad.



Nota: Elaborado por el autor.

En los dos ensayos realizados a los coagulantes en cada una de las diferentes dosis, el policloruro de aluminio PAC presenta los mejores porcentajes en la remoción de sólidos presentes en el agua, razón por la cual para mejorar las condiciones de los flóculos para la sedimentación se añade un polímero para lograr un mejor peso en las masas de lodo.

Tabla 22. Principales diferencias entre los coagulantes.

Comparativo entre los dos coagulantes	
Sulfato de aluminio tipo B	Optimización con el diseño
Caudal: 860 l/s	Caudal: 860 l/s
Dosis: 24 ppm	Dosis: 28 ppm
% de remoción: 54.18%	% de remoción: 76.06%
Otras comparaciones	
Flocs livianos	Flocs ideales para la decantación
Alta cantidad de lodos.	Poca generación de lodos.
Costo por Kg. \$ 0.60.	Costo por Kg. \$ 0.90.
Eficiente en altas concentraciones (32 a 44 ppm).	Eficiente en bajas concentraciones (12 a 28 ppm).
Baja reacción con polímero.	Efectivo con el uso de polímero.
Horas de operación de filtros ≤ 40 horas.	Horas de operación de filtros ≥ 40 horas.
Caudal bomba dosificadora 0.295 l/s.	Caudal bomba dosificadora 0.590 l/s.
Uso: 2130 sacos de 25 Kg. en un mes.	Uso: 1080 sacos de 25 Kg. en un mes.
Producción 69.77 m ³ por cada dólar invertido.	Producción 91.73 m ³ por cada dólar invertido.

Nota: Elaborado por el autor.

3.6 Presupuesto

En la siguiente tabla se presenta el presupuesto anual para optimizar el proceso de potabilización del agua en la PTAP principalmente en la adquisición de las sustancias químicas utilizadas en el procesamiento de la materia prima.

Tabla 23. Presupuesto.

Rubro	Descripción	Cantidad	Costo unitario USD \$	Costo total USD \$
Tecnología para el DOE	Software	1	25.00	25.00
	Capacitación	5 horas	20.00	100.00
	Computador	1	1200.00	1200.00
	Internet	12 mes	30.00	360.00
Personal	Analista	1	900.00	10.800
Insumos químicos	PAC	324000 kg	0.90	291600.00
	Polímero	3000 kg	7.00	21000.00
			Subtotal	325085.00
			IVA 12%	39010.20
			Total	364095.2

Nota: Elaborado por el autor.

El presupuesto para optimizar los recursos económicos en los insumos químicos es de un valor de USD \$ 364095.2, con lo cual se procede a calcular los índices financieros como el valor actual neto VAN, la tasa interna de retorno TIR y el periodo de recuperación PR considerando un ingreso de flujo durante cinco años y una tasa anual del 10% para actualizar los valores del flujo de ingreso. Los datos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 24. Valores para cálculos de índices financieros.

	0	1	2	3	4	5
Flujo de fondo	\$ -364095.2	\$ 200000	\$ 150000	\$ 150000	\$ 160000	\$ 200000
Saldo actual de 10%	\$ -364095.2	\$ 181818.2	\$ 123966.9	\$ 112697.2	\$ 109282.2	\$ 124184.3
Saldo actual acumulado	\$ -364095.2	\$ -182277	\$ -58310.1	\$ 54387.1	\$ 163669.3	\$ 287853.6

Tasa %	Valor definido.	10%
VNA	Valor actual de los flujos futuros actualizados.	\$ 651948.76
VAN	Valor del flujo futuro + inversión inicial.	\$ 287853.56
TIR	Tasa de descuento con la que el valor neto se iguala a cero.	38.12 %
PR	Tiempo que toma un proyecto para recuperar la inversión.	2.5 años.

Nota: Elaborado por el autor.

Con un presupuesto inicial de USD \$ 364.095,2 y en base a los cálculos se indica que considerando una tasa anual de 10% se genera una ganancia de USD \$ 287.853,56, la tasa interna de retorno se incrementa en un 38.12% y el periodo de recuperación de la inversión es de dos años y medio.

3.7 Marco de discusión.

El principal aporte de este trabajo investigativo es presentar una metodología para la aplicación del diseño de experimentos en la PTAP Atahualpa de AGUAPEN-EP, desde la revisión de las bases teóricas, el uso de las técnicas e instrumentos y la interpretación de los resultados.

En el capítulo I por medio del estado del arte se desarrolló una revisión sistemática de la información, en donde varios estudios son relacionados a la temática de estudio, como por ejemplo el “Estudio comparativo de técnicas de optimización multirrespuesta en diseños experimentales”, “Optimización de los insumos químicos para el tratamiento de la materia prima.” entre otros.

En el capítulo II se utilizó la metodología desarrollada en cuatro fases en donde se logra optimizar una línea de producción en base a los resultados obtenidos en el diseño de experimentos (Fernández et al., 2019).

En el capítulo III se exponen los resultados de las técnicas de la observación, de los experimentos realizados y de la revisión documental. En este contexto en la fase I se describe la información resultante de la recopilación de datos obtenidas en las vistas a la PTAP Atahualpa. Se elaboró una Data con 12 elementos referente a los porcentajes de remoción de la turbiedad, con la cual se obtuvo un coeficiente de alfa de Cronbach de 0.8424, indicando la consistencia de la información como muy buena.

En la fase II se realizaron los ensayos de laboratorio con el equipo test de jarras para simular el proceso de coagulación y de esta manera analizar el comportamiento de los factores producidos por los cuatro tipos de coagulantes (sulfato de aluminio tipo A, sulfato de aluminio tipo B, policloruro de aluminio líquido y policloruro de aluminio sólido) empleados en nuestro estudio.

La fase III del tercer capítulo contiene la configuración de los resultados en un diseño factorial 4 x 3 con cálculos manuales para el análisis de la varianza y la hipótesis y su

verificación mediante el uso del software Minitab. La tabla ANOVA determinó que para un nivel de confianza del 5% los valores del estadístico de prueba fueron mayores al valor $-p$, por lo que los dos factores analizados (A tipo de coagulante y B dosis) afectan al porcentaje de remoción de los sólidos en suspensión del agua cruda, aceptándose la hipótesis alternativa H_A que expresa que aplicar el diseño de experimentos para la optimización del proceso de potabilización del agua en la PTAP Atahualpa de AGUAPEN-EP, ayudará a minimizar los recursos económicos en los insumos químicos.

En la fase IV de la metodología seleccionada se exponen los resultados de la aplicación del diseño de experimentos factorial, en donde se destaca que el tipo de coagulante y la cantidad dosis influyen en la remoción de la turbiedad del agua. El ensayo de jarras de laboratorio determinó que la dosis ideal de PAC a nivel de Planta de Tratamiento, fue de 28 ppm.

Se realiza una comparación entre los procesos de potabilización del agua empleando sulfato de aluminio tipo B y PAC sólido, dando como resultado que el policloruro de aluminio es más eficiente en cuanto a remoción de sólidos se refiere y por consiguiente el producto final será agua de calidad en cumplimiento a los parámetros de la norma NTE-INEN 1108:2020.

Para no alterar la calidad del agua en proceso debido al incremento del caudal de entrada de agua cruda hacia la Planta, se requiere adicionar un polímero para mejorar las condiciones de los flocs, facilitar su aglutinamiento y sedimentación.

En ese sentido se realizó un nuevo ensayo con una solución de PAC al 3.5% de concentración y la adición de polímero al 0.05%, obteniendo una dosis ideal a nivel de laboratorio de 16 ppm.

De acuerdo a las pruebas y análisis de resultados para procesar agua en la PTAP Atahualpa de AGUAPEN-EP, se requiere una inversión de USD \$ 24.300,00 aproximadamente si se trabaja con PAC, mientras que si se emplea sulfato de aluminio tipo B el costo mensual será de USD \$ 31.950,00, por lo que emplear PAC disminuye los costos de inversión en materia prima.

Fase de planificación.

La planificación básica de cómo se pretende desarrollar el proyecto, para su evaluación y la decisión de su financiación consiste en:

- ✓ Presentación del proyecto para conocimiento y toma de decisiones.
- ✓ Estimación de la duración del proyecto. Para este caso el tiempo considerado es de un año calendario, a partir de su aplicación.
- ✓ Financiamiento del presupuesto.
- ✓ Ejecución del proyecto.
- ✓ Presentación de informes mensuales.

También se debe considerar las siguientes actividades complementarias.

- ✓ Incorporación de nuevo personal.
- ✓ Aprovisionamiento de equipos y materiales (si el caso fuese necesario).
- ✓ Planificación de las comunicaciones.
- ✓ Fijación de tiempo para la frecuencia de los ensayos de laboratorio y aplicación a nivel de planta. El estudio amerita hasta tres pruebas semanales de laboratorio y aplicación diaria a nivel de Planta de Tratamiento.

Identificación de riesgos.

Al tratarse de manipulación de sustancias químicas, la evaluación de los riesgos determina adoptar las siguientes medidas preventivas:

La presencia de una sustancia química peligrosa ocurre en el tratamiento de la materia prima, almacenamiento en lugares de trabajo y manipulación de las sustancias, donde se derivan los siguientes riesgos:

- ✓ Riesgo por inhalación.
- ✓ Riesgo por absorción a través de la piel.
- ✓ Riesgo por contacto en el cuerpo y ojos.
- ✓ Riesgo por ingestión.

En ese sentido se debe conocer los datos proporcionados por la ficha de seguridad de los productos utilizados.

Se debe proporcionar al personal de equipos de protección personal como guantes, mascarillas, fajas, mandil, gafas entre los más importantes con la finalidad de evitar cualquier tipo de accidente.

CONCLUSIONES

Del presente trabajo investigativo se concluye lo siguiente:

1.- Las bases teóricas para el estudio de la aplicación del diseño de experimentos se desarrollaron por medio de un estado del arte, empleando una revisión sistemática de la literatura y un análisis bibliométrico con el software VOSviewer, seleccionándose 31 artículos relevantes en temas como el tratamiento de agua, técnicas de optimización y diseños de experimentos entre otros, durante los últimos cinco años.

2.- De acuerdo al análisis de los artículos científicos que contenían estudios de las principales características del diseño de experimentos en la optimización de procesos, que para el caso de estudio es empleando policloruro de aluminio para tratamiento de la materia prima, se determinó una metodología compuesta por cuatro fases para optimizar el proceso de una línea de producción, con la cual se obtuvieron resultados confiables que nos permiten tomar mejores decisiones específicamente en los costos de inversión de materia prima.

3.- Los ensayos del test de jarras realizados el laboratorio de Control de Calidad y cuyos resultados se configuraron para el diseño de experimento factorial, permitieron obtener el tipo ideal de coagulante (PAC), así como también la dosis óptima. Una inversión de USD \$ 364.095,2 en los costos de inversión de esta materia prima, con un flujo de ingreso variable de entre USD \$ 150.000 hasta \$ 200.000 y una tasa anual del 10%, permite recuperar la inversión en dos años y medios aproximadamente por lo que el uso del PAC resulta rentable en comparación con el sulfato de aluminio.

RECOMENDACIONES

Resulta importante tener en cuenta las siguientes sugerencias:

1.- Todo trabajo investigativo necesita de un buen fundamento teórico, por lo que es recomendable usar métodos adecuados tales como la revisión sistemática de la literatura, el análisis bibliométrico, entre otros que incluyan software para su desarrollo de una manera estructurada, garantizando así la obtención de la información de fuentes confiables para su desarrollo e interpretación.

2.- Es necesario elaborar el estado del arte para el análisis de los artículos científicos que permitan seleccionar la metodología, técnica e instrumentos de investigación que estén más acorde para su re aplicación en el tema de estudio desde la recopilación de la información hasta la presentación de los resultados de una manera clara, precisa y concisa.

3.- Se sugiere la aplicación del diseño de experimentos y el uso de software estadísticos para el análisis de los datos de producción y de la calidad del agua en la PTAP Atahualpa de la empresa AGUAPEN-EP y otras Plantas de Tratamiento, cuyas metodologías ayudaran a una mejor toma de decisión en la reducción de costos en insumos, materia prima, optimización de procesos y por consiguiente resultados más eficientes.

BIBLIOGRAFÍA

- Araque, M. (2022). Planta de tratamiento de agua potable. In M. Araque Arellano (Ed.), *Diseño hidráulico de plantas de tratamiento de agua potable* (pp. 41–90). Editorial Abya-Yala. <https://doi.org/10.7476/9789978108208.0004>
- ARCA. (2022). *Regulación-DIR-ARCA-RG-012-2022-Calidad-del-agua_-signed*.
- Arellano, A., & Peña, D. (2020). Modelos de regresión lineal para predecir el consumo de agua potable. *NOVASINERGIA REVISTA DIGITAL DE CIENCIA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA*, 3(1), 27–36. <https://doi.org/10.37135/ns.01.05.03>
- Arias, J. (2021). Guía para elaborar la operacionalización de variables. *Revista Espacio I+D Innovación Más Desarrollo*, X (28), 42–56. <https://doi.org/10.31644/IMASD.28.2021.a02>
- Barrios, A., Vaquera, H., Romero, J. M., Crossa, J., & Burguete, E. (2020). Estudio comparativo de técnicas de optimización multirespuesta en diseños experimentales. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 21(2), 1–12. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21n2.016>
- Bravo, Y. M., Larrúa Quevedo, R., & Moreira, S. A. (2020). Diseño de experimento para vigas con nudos híbridos. *Revista Técnica De La Facultad De Ingeniería Universidad Del Zulia*, ve2020(2), 50–55. <https://doi.org/10.22209/rt.ve202020n2a07>
- Camilo, J., Suescún, B., Poveda Gómez, J. D., Flaminio, J., & Prada, O. (2022). *Optimización del tratamiento de agua para consumo humano en la inspección de policía de Cambao del Municipio de San Juan de Rioseco, Cundinamarca, Colombia*.
- Carreño, R., Montenegro, K., Mosquera, J., Robalino, J., & Pazmiño, E. (2019). *Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS)-Gerencia de Operaciones*.
- Carrera-Oña, G., Santiana-Espín, C., González-Palacios, M., & Valdiviezo-Abarca, T. (2020). *Diseño de experimentos en el análisis de muestras de agua*.

- Castellanos, F. (2017). *REVISION OF THE USE OF NATURAL COAGULANTS IN THE PROCESS OF WATER CLARIFICATION IN COLOMBIA*.
- Del Cid, A., Méndez, R., & Sandoval, F. (2011). *Investigación. Fundamentos y metodología Segunda edición*.
- Delgado, M. (2020). *Uso del diseño de experimentos para la innovación empresarial*.
www.upo.es/revistas/index.php/RevMetCuant/article/view/2450
- Fernández, J., Montenegro, S., Ledezma, C., & Yanza, J. (2021). Sedimentabilidad de partículas flocculentas en aguas con alto contenido de color y baja turbiedad, coaguladas con FeCl₃ + PAC versus PAC. *Tecnológicas*, 24(51), e1789.
<https://doi.org/10.22430/22565337.1789>
- Fernández, S., Pérez, A., & Medina, P. (2019). Uso integral de simulación, diseño de experimentos y KANBAN para evaluar y mejorar el rendimiento de una línea de producción. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 13(26), 9–16.
<https://doi.org/10.31908/19098367.1147>
- Fúquene, D. M., & Yate, A. V. (2018). *Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales*.
<https://doi.org/10.22490/ECAPMA.2771>
- Galdo, A. (2021). Impacto del mindfulness en el rendimiento académico de estudiantes universitarios: Una revisión sistemática de literatura con VOSviewer. *Revista EDUCA UMCH*, 17, 88–120. <https://doi.org/10.35756/educaumch.202117.151>
- Gómez, R., & Espín, R. (2022). Optimización de los procesos operativos de la empresa Promacero de la ciudad de Pelileo, mediante la aplicación de la metodología 5's. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(2), 1241–1251.
https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i2.1949
- Guevara, R. (2016). *Estado del arte*.
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (Segunda Edición).
- Koutoudjian, J. (2019). *Operación de Plantas Potabilizadoras Curso AIDIS 2019*.

- León-Chimbolema, J., Miguez-Paredes, R., & Godoy-Ponce, S. (2022). *Estudio y rediseño de una planta potabilizadora de agua para consumo humano Study and redesign of a drinking water treatment plant for human consumption Estudo e redesenho de uma estação de tratamento de água potável para consumo humano* *Ciencias Técnicas y Aplicadas Artículo de Investigación*. 7(6), 2496–2514. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i6.4205>
- Martínez-Orjuela, M. R., Mendoza-Coronado, J. Y., Medrano-Solís, B. E., Gómez-Torres, L. M., & Zafra-Mejía, C. A. (2020). Evaluación de la turbiedad como parámetro indicador del tratamiento en una planta potabilizadora municipal. *Revista UIS Ingenierías*, 19(1), 15–24. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n1-2020001>
- Mendoza-Gallardo, J., Rodríguez-Picón, L., & Méndez-González, L. (2021). Comparación de métodos de optimización para un experimento con múltiples variables de respuesta. *Cultura Científica y Tecnológica*, 18(2), 1–10. <https://doi.org/10.20983/culcyt.2021.2.2.1>
- Montgomery, Douglas. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos - Montgomery, 2da. Edición. Segunda.*
- Moreno, B., Muñoz, M., Cuellar, J., Domancic, S., & Villanueva, J. (2018). Revisiones Sistemáticas: definición y nociones básicas. *Revista Clínica de Periodoncia, Implantología y Rehabilitación Oral*, 11(3), 184–186. <https://doi.org/10.4067/s0719-01072018000300184>
- Muyulema, J. C. (2017). *Modelo de medición del desempeño global corporativo, a través de la integración del seis sigma integral multivariado con el balanced scorecard, en la industria avícola de la provincia de Chimborazo.*
- NTE INEN 1108. (2014). *Agua potable. Requisitos.*
- NTE INEN 1108. (2020). *Agua para consumo humano. Requisitos.*
- Oviedo, H., & Campo-Arias, A. (2005). *Metodología de investigación y lectura crítica de estudios Aproximación al uso del coeficiente alfa de Cronbach Title: An Approach to the Use of Cronbach's Alfa.*

- Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria-Villa R., & Gallo, J. (2020). Contaminación del agua, métodos de análisis y tecnologías de remoción. *Ciencia e Ingeniería*, 14, 9–18.
- Pachacama-Llumiyinga, J. (2020a). Utilización de productos para Potabilización de Agua Use of products for water purification Uso de produtos para purificação de água. 2020, 5, 1378–1389. <https://doi.org/10.23857/pc.v5i8.1669>
- Pachacama-Llumiyinga, J. (2020b). *Utilización de productos para Potabilización de Agua Use of products for water purification Uso de produtos para purificação de água*. 5, 1378–1389. <https://doi.org/10.23857/pc.v5i8.1669>
- Pérez, D., Franco, J., Gutiérrez, F., Hernández, J., Balbuena, A., & González, A. (2021). *Diseño de experimentos factoriales 2 n para su análisis con Infostat e Infogen*.
- Pulgarín, D. A., Santamaría-álzate, F., Ruge, J. C., & Orduz, O. I. (2019). Determination the coefficients of San's model, to calculate the percentage of removal flocculent particles with three coagulants types. *DYNA (Colombia)*, 86(210), 131–136. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.74851>
- Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación. Sexta*.
- Torres-Sosa, J., Rodríguez-Picón, L., Méndez-González, L., & Pérez-Olguín, I. (2020). Diseño de experimentos para optimizar resistencia e índices de capacidad de un fusible. *Cultura Científica y Tecnológica*, 17(2), 1–9. <https://doi.org/10.20983/culcyt.2020.2.2.4>
- Ulibarrie, N. O., Beltramini, L. B., Defagot, V., Bourquen, N. L., & Andrés, F. (2019). Utilización del Diseño de Experimentos para la Optimización de Mezclas. *Revista Tecnología y Ciencia*, 36, 11–21. <https://doi.org/10.33414/rtyc.36.11-21.2019>
- Vargas, M. G., Galeano Higueta, C., & Jaramillo Muñoz, A. (2015). *EL ESTADO DEL ARTE: UNA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN THE STATE OF THE ART: A RESEARCH METHODOLOGY*.
- Yanza-López, J., Rivera-Hernández, R., Gómez-Torres, L., & Zafra-Mejía, C. (2019). Evaluación de FeCl₃ y PAC para la potabilización de agua con alto contenido de

color y baja turbiedad. *Tecnológicas*, 22(45), 9–21.
<https://doi.org/10.22430/22565337.1085>

ANEXOS

Anexo A. Requisitos físicos y químicos del agua para consumo humano.

TABLA 1. Requisitos físicos y químicos del agua para consumo humano

Parámetro	Unidad	Límite permitido ^b	Método de ensayo ^c
Arsénico	mg/L	0,01	Standard Methods 3114
Cadmio	mg/L	0,003	Standard Methods 3113
Cloro libre residual	mg/L	0,3 a 1,5	Standard Methods 4500 Cl ⁻
Cobre	mg/L	2,0	Standard Methods 3111
Color aparente	Pt-Co	15	Standard Methods 2120
Cromo (cromo total)	mg/L	0,05	Standard Methods 3113
Fluoruro	mg/L	1,5	Standard Methods 4500-F ⁻
Mercurio	mg/L	0,006	Standard Methods 3112
Nitratos (como NO ₃ ⁻)	mg/L	50,0	Standard Methods 4500-NO ₃ ⁻
Nitritos (como NO ₂ ⁻)	mg/L	3,0	Standard Methods 4500-NO ₂ ⁻
Plomo	mg/L	0,01	Standard Methods 3113
Turbiedad ^a	NTU	5	Standard Methods 2130

^a Se conoce también como *Turbidez*.
^b Los resultados obtenidos deben expresarse con el mismo número de cifras significativas de los límites permitidos, aplicando las reglas para redondear números indicadas en NTE INEN 52.
^c En el caso de que sean usados métodos de ensayo alternativos a los señalados, estos deben ser normalizados. En el caso de no ser un método normalizado, este debe ser validado.

RANGO DE pH DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO

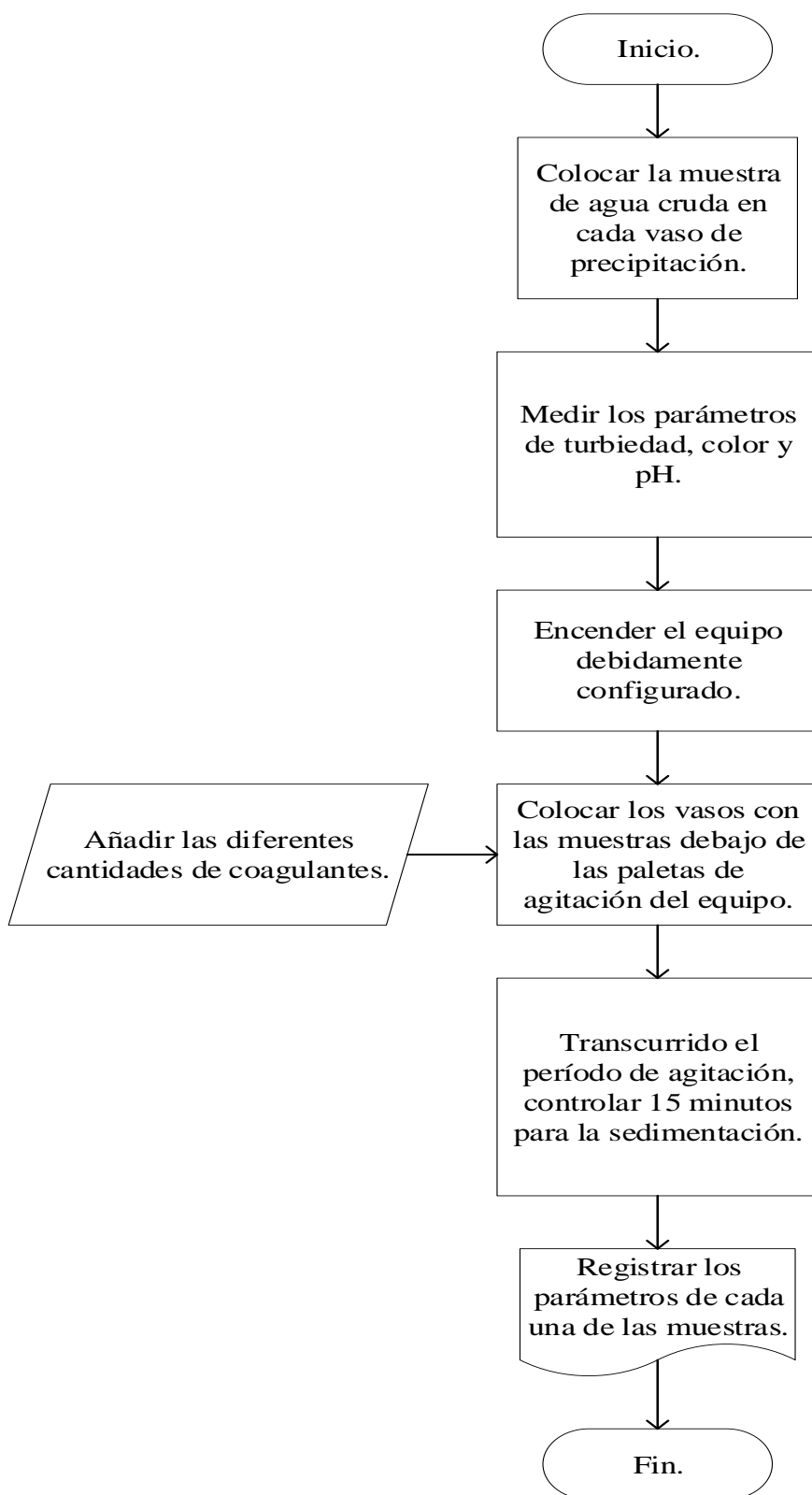
TABLA B.1. Rango de pH del agua para consumo humano

Parámetro	Unidad	Rango
pH ^a	Unidades de pH	6,5 – 8,0

^a Parámetro de control operativo

Nota: Fuente Norma NTE INEN 1108, sexta revisión 2020-04.

Anexo B. Diagrama de flujo Test de jarras.



Nota: Elaborado por el autor.

Anexo C. Modelo de Guía de Observación.

Universidad Estatal Península de Santa Elena.

Carrera: Ingeniería Industrial.

Investigación: Ensayo Test de jarras.

Observador: Alberto Domínguez Pizarro.

Boleta de Observación.

Objetivo: Determinar el comportamiento de los factores de estudio.

Localización del ensayo observado: Planta Potabilizadora Atahualpa de AGUAPEN-EP, ubicada en la vía Guayaquil Santa Elena, Km 115, entrada a la población de Atahualpa.

Fecha de la realización de la observación:

Aspectos a observar: Comportamiento de los diferentes coagulantes.

Velocidad de agitación.

Tiempo de sedimentación.

Registro de la información:

Nota: Elaborado por autor, adaptado de (Del Cid et al., 2011)

Anexo D. Data de información con el porcentaje de remoción del agua cruda.

PRUEBA DE JARRAS CONTROL DE CALIDAD			PRUEBA DE JARRAS CONTROL DE CALIDAD		
Aplicación de coagulante			Aplicación de coagulante		
MESES 2022	JARRA	REMOCIÓN %	MESES 2022	JARRA	REMOCIÓN %
ENE	1.- Agua cruda	88%	JUL	1.- Agua cruda	81%
	2.- Agua cruda	83%		2.- Agua cruda	82%
	3.- Agua cruda	75%		3.- Agua cruda	76%
	4.- Agua cruda	87%		4.- Agua cruda	82%
	5.- Agua cruda	85%		5.- Agua cruda	83%
	6.- Agua cruda	79%		6.- Agua cruda	79%
FEB	1.- Agua cruda	75%	AGO	1.- Agua cruda	82%
	2.- Agua cruda	91%		2.- Agua cruda	65%
	3.- Agua cruda	88%		3.- Agua cruda	71%
	4.- Agua cruda	84%		4.- Agua cruda	75%
	5.- Agua cruda	91%		5.- Agua cruda	77%
	6.- Agua cruda	90%		6.- Agua cruda	77%
MAR	1.- Agua cruda	81%	SEP	1.- Agua cruda	80%
	2.- Agua cruda	87%		2.- Agua cruda	63%
	3.- Agua cruda	85%		3.- Agua cruda	79%
	4.- Agua cruda	79%		4.- Agua cruda	76%
	5.- Agua cruda	93%		5.- Agua cruda	85%
	6.- Agua cruda	85%		6.- Agua cruda	79%
ABR	1.- Agua cruda	80%	OCT	1.- Agua cruda	79%
	2.- Agua cruda	77%		2.- Agua cruda	83%
	3.- Agua cruda	85%		3.- Agua cruda	87%
	4.- Agua cruda	87%		4.- Agua cruda	83%
	5.- Agua cruda	86%		5.- Agua cruda	87%
	6.- Agua cruda	84%		6.- Agua cruda	88%
MAY	1.- Agua cruda	78%	NOV	1.- Agua cruda	83%
	2.- Agua cruda	82%		2.- Agua cruda	84%
	3.- Agua cruda	87%		3.- Agua cruda	85%
	4.- Agua cruda	86%		4.- Agua cruda	77%
	5.- Agua cruda	90%		5.- Agua cruda	83%
	6.- Agua cruda	89%		6.- Agua cruda	85%
JUN	1.- Agua cruda	79%	DIC	1.- Agua cruda	73%
	2.- Agua cruda	76%		2.- Agua cruda	74%
	3.- Agua cruda	67%		3.- Agua cruda	76%
	4.- Agua cruda	69%		4.- Agua cruda	76%
	5.- Agua cruda	77%		5.- Agua cruda	73%
	6.- Agua cruda	76%		6.- Agua cruda	77%

Nota: Fuente Registros de Control de Calidad de AGUAPEN-EP.

Anexo E. Análisis de elementos y Alfa de Cronbach.

Matriz de datos

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	88	83	75	87	85	79
2	75	91	88	84	91	90
3	81	87	85	79	93	85
4	80	77	85	87	86	84
5	78	82	87	86	90	89
6	79	76	67	69	77	76
7	81	82	76	82	83	79
8	82	65	71	75	77	77
9	80	63	79	76	85	79
10	79	83	87	83	87	88
11	83	84	85	77	83	85
12	73	74	76	76	73	77

Matriz de correlación

	C1	C2	C3	C4	C5
C2	-0,006				
C3	-0,210	0,569			
C4	0,178	0,503	0,629		
C5	0,131	0,603	0,780	0,633	
C6	-0,206	0,677	0,937	0,602	0,808

*Contenido de la celda
Correlación de Pearson*

Estadísticas totales y de elementos

Variable	Conteo total	Media	Desv.Est.
C1	12	79,92	3,80
C2	12	78,92	8,38
C3	12	80,08	7,04
C4	12	80,08	5,65
C5	12	84,17	6,04
C6	12	82,33	5,07
Total	12	485,50	27,68

Estadísticas de elementos omitidas

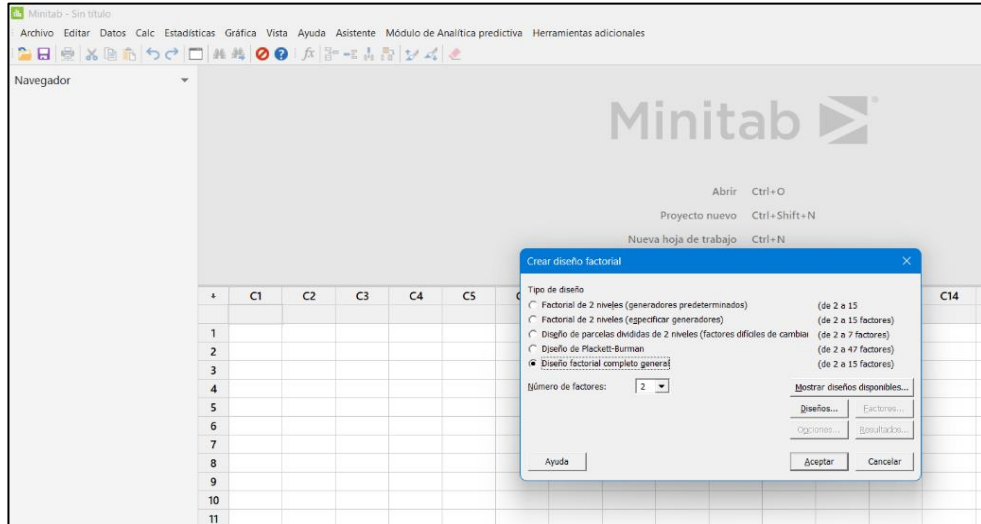
Variable omitida	Media total ajustada	Desv.Est. total ajustada	Correlación total ajustada por elemento	Correlación múltiple cuadrada	Alfa de Cronbach
C1	405,58	27,53	-0,0282	0,3787	0,8971
C2	406,58	21,52	0,6459	0,5271	0,8232
C3	405,42	21,86	0,7769	0,8984	0,7821
C4	405,42	23,48	0,6900	0,5186	0,8046
C5	401,33	22,44	0,8343	0,7561	0,7737
C6	403,17	23,24	0,8506	0,9200	0,7810

Alfa de Cronbach

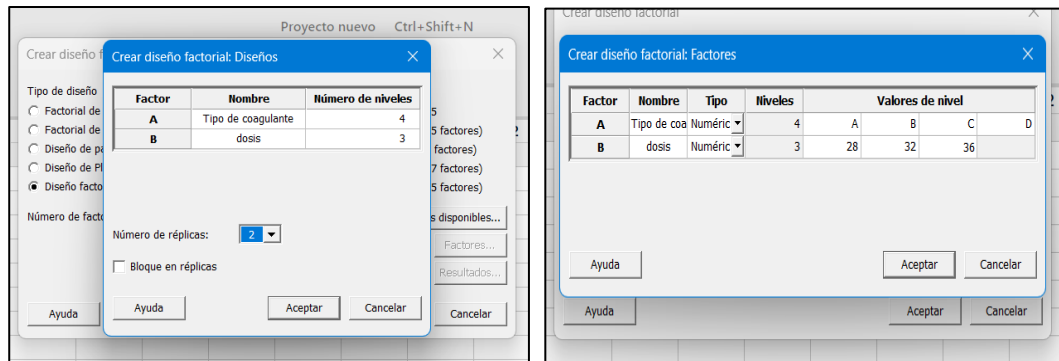
Alfa
0,8424

Nota: Elaborado por el autor.

Anexo F. Creación de diseño factorial en software Minitab Statistical.



Creación de diseño factorial.



Factores y réplicas.

Niveles.

Diseño factorial de múltiplos niveles

HOJA DE TRABAJO 1

Diseño factorial de múltiples niveles

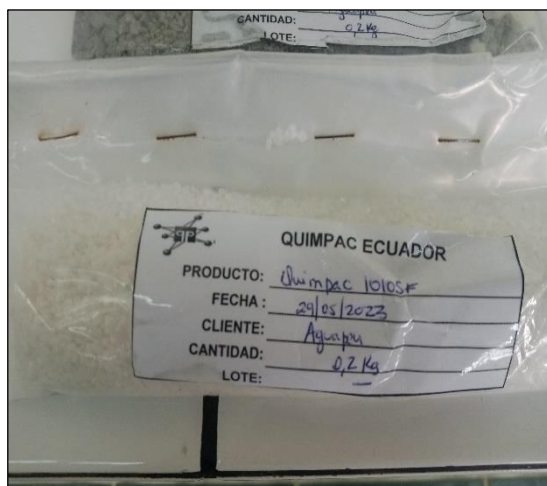
Resumen del diseño

Factores: 2 Réplicas: 2
 Corridos base: 12 Total de corridas: 24
 Bloques base: 1 Total de bloques: 1

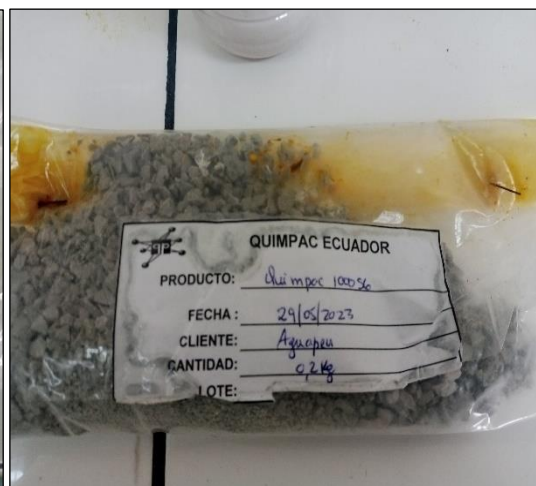
	C1	C2	C3	C4	C5-T	C6	C7	C8	C9
	OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	Tipo de coagulante	dosis			
1	22	1	1	1	D	28			
2	3	2	1	1	A	36			
3	2	3	1	1	A	32			
4	1	4	1	1	A	28			
5	11	5	1	1	D	32			
6	24	6	1	1	D	36			
7	10	7	1	1	D	28			
8	14	8	1	1	A	32			
9	15	9	1	1	A	36			
10	16	10	1	1	B	28			
11	18	11	1	1	B	36			
12	6	12	1	1	B	36			
13	5	13	1	1	B	32			
14	13	14	1	1	A	28			
15	8	15	1	1	C	32			
16	4	16	1	1	B	28			
17	19	17	1	1	C	28			
18	9	18	1	1	C	36			

Diseño factorial.

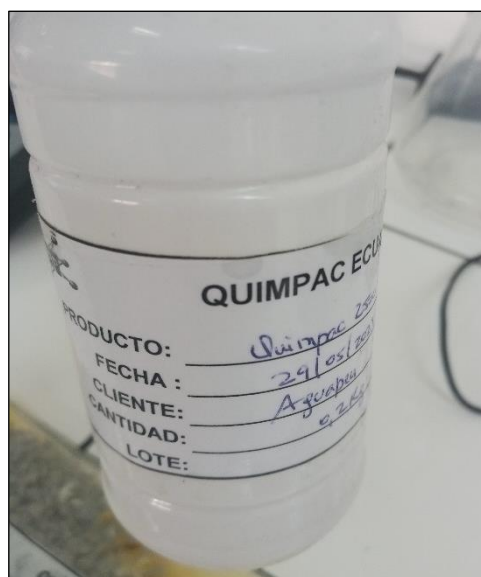
Anexo G. Evidencia del desarrollo del ensayo de jarras.



Sulfato de aluminio tipo A.



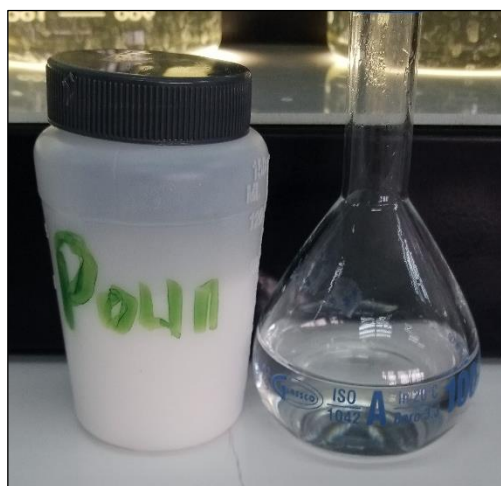
Sulfato de aluminio tipo B.



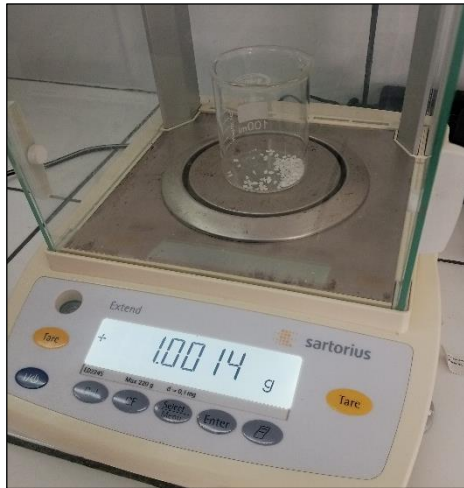
Policloruro de aluminio líquido.



Policloruro de aluminio sólido.



Polímero.



Balanza electrónica.



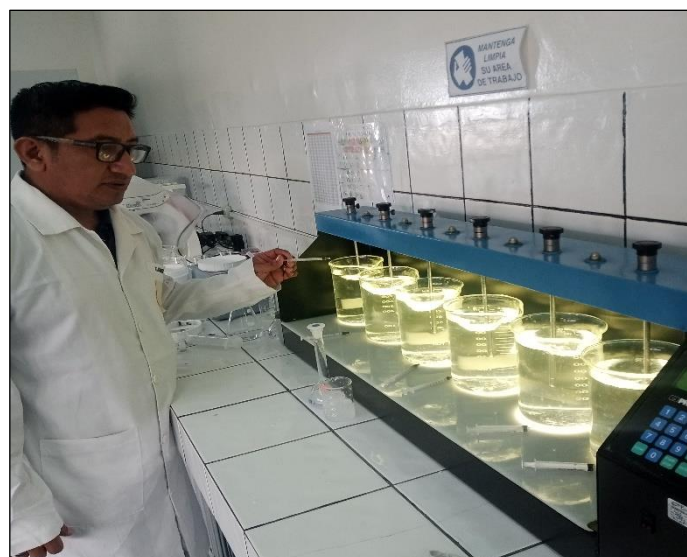
Turbidímetro.



Colorímetro.



Agitador electrónico.



Equipo para test de jarras.



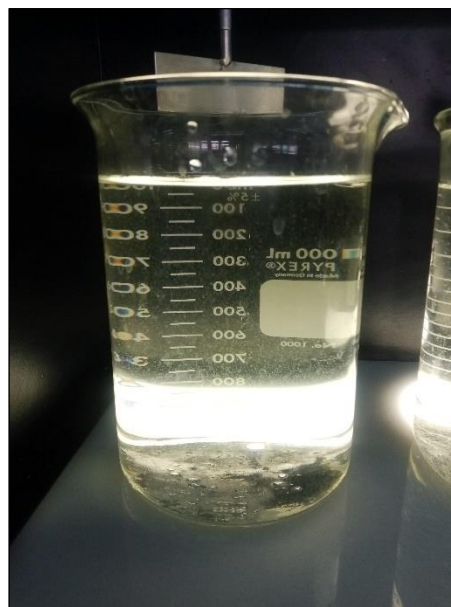
Toma de muestras de agua.



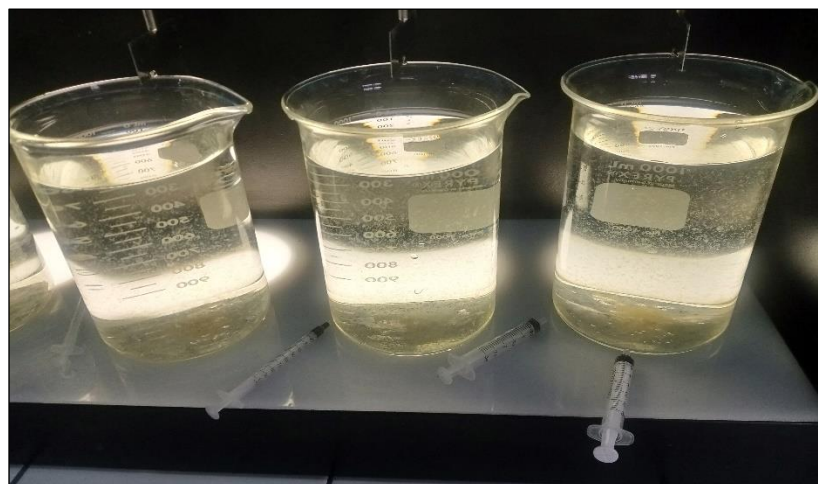
Medición de turbiedad.



Medición de color.



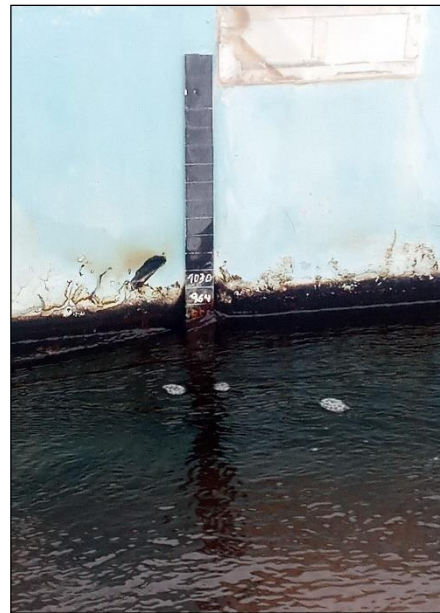
Muestra en reposo.



Decantación de flocs.



Canaleta Parshall.



Regleta de medición.



Floculadores hidráulicos.



Aplicación de polímero



Decantadores.



Filtros.



Tolvas de preparación del coagulante.



Bombas dosificadoras.



Cilindros de gas cloro 907 Kg.



Dosificadores de cloro gas.



Caudalímetro de entrada a la Planta Potabilizadora Atahualpa.



Anexo H. Solicitud de autorización para realización de Tesis de grado.

Atahualpa, 07 de junio de 2023.

Sr.
Licdo. Xavier Linzán Cobos, Mgr.
GERENTE GENERAL
AGUAPEN-EP
Presente.

De mis consideraciones.

Yo, Alberto Leonardo Domínguez Pizarro, con cédula de identidad N°. 0918020173, por este medio respetuosamente expongo:

Actualmente he finalizado la malla curricular de la carrera de Ingeniería Industrial en la Universidad Estatal Península de Santa Elena UPSE, en ese sentido solicito muy comedidamente, la autorización para la realización de la Tesis de Grado o Propuesta de Trabajo de Integración Curricular 2023 **“Aplicación del Diseño de Experimentos para la Optimización del Proceso de Potabilización del Agua en la empresa AGUAPEN-EP, Santa Elena – Ecuador”** en la Planta Atahualpa, requisito fundamental para la culminación de sus estudios de grado.

Por la favorable atención a la presente, anticipo mis sinceros agradecimientos de consideración y estima.

Atentamente.



Alberto L. Domínguez Pizarro
C.I. 0918020173
Celular: 0985780800



07 JUN 2023

HORA: 09:57 ANEXO: _____
FIRMA RESPONSABLE: _____

Anexo I. Solicitud autorizada.



Oficina Matriz, Salinas 09 de junio de 2023
OFICIO N° AGUAPEN E.P.-GG-209

ASUNTO: AUTORIZACIÓN TRABAJO DE TITULACIÓN

Señor
Alberto L. Domínguez Pizarro
ESTUDIANTE DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
Ciudad. –

De mis consideraciones:

Reciba un cordial saludo de quienes conformamos la Empresa Pública Municipal Mancomunada de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales de los Cantones Santa Elena, La Libertad y Salinas.

En atención al **Oficio S/N**, suscrito por usted, mediante el cual solicita Autorización para el desarrollo de trabajo de titulación al estudiante **ALBERTO L. DOMÍNGUEZ PIZARRO**, de la carrera Ingeniería Industrial.

Al respecto, debo informarle que esta Gerencia **AUTORIZA** al estudiante **ALBERTO L. DOMÍNGUEZ PIZARRO**, para que pueda acceder a la información para realizar la tesis de grado o propuesta de trabajo de integración curricular 2023 **"APLICACIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA EN LA EMPRESA AGUAPEN-EP, SANTA ELENA – ECUADOR"**.

Para mayor información contactarse con la Ing. Erika Moreno Ponce – Directora de Gestión de Producción Calidad y Medio Ambiente de esta institución, al teléfono 2-775439, extensión 162 respectivamente; a fin de coordinar vuestra solicitud.

Con sentimientos de consideración y estima.

Atentamente,

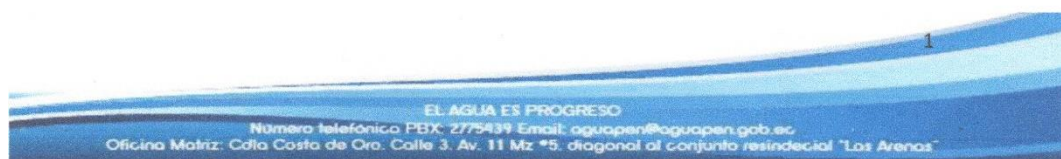


Lcdo. Xavier Linzán Cobos, Mgtr.
GERENTE GENERAL


C.c.: Ing. Wendy Cruz Zurita – Directora de Talento Humano

Archivo

XLC/Apm



Anexo J. Certificado de análisis de control de calidad del sulfato de aluminio tipo B.

 QUIMPAC ECUADOR S.A.	CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE CONTROL DE CALIDAD SULFATO DE ALUMINIO GRADO 2 TIPO B GRUESO	F.2C6.27
		Revisión 05
		15/6/2017 Pág. 1 de 1



Certified to NSF/ANSI/CAN 60

PRODUCTO: SULFATO DE ALUMINIO GRADO 2 TIPO B GRUESO
 QUIMPAC 1010 SG
 ALUMINUM SULFATE GRADE 2 THICK TYPE B
CLIENTE: AGUA PEN
LOTE: 5254
FECHA DE PRODUCCIÓN: FEBRERO / 2023
FECHA DE CADUCIDAD: FEBRERO / 2025

ANÁLISIS FÍSICO - QUÍMICO

PARÁMETROS	RESULTADOS	ESPECIFICACIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS
	5254		
Alumina Soluble Total Expresada como Al ₂ O ₃ %	15.32	15.3 % Mínimo	INEN 1907
Basicidad Expresada como Al ₂ O ₃ %	0.71	0.025 % Mínimo	INEN 1906
Hierro Soluble Total Expresado como Fe ₂ O ₃ %	0.23	0.75 % Máximo	INEN 1908
Materias Insolubles en Agua %	10	10 % Máximo	INEN 1905
GRANULOMETRÍA			
Pase malla # 4	100	100%	_____
Pase malla # 100	1	< 10%	_____
DOSIFICACIÓN MAXIMA USO (MUL) 250 mg/L			

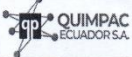
QUIMPAC ECUADOR S.A.

ANALISTA RESPONSABLE

Anthony Obando
Planta Tratamiento de aguas Guayaquil

VÍA DAULE KM 16,5, AV ROSAVIN S/N Y CALLE COBRE; GUAYAQUIL - ECUADOR
INDUSTRIA ECUATORIANA
PRODUCTO CERTIFICADO CON SELLO DE CALIDAD INEN

Anexo K. Certificado de análisis de control de calidad del sulfato de aluminio tipo A.

	FORMATO CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE CONTROL DE CALIDAD SULFATO DE ALUMINIO GRADO 1 TIPO A FINO	F.2C6.28 Revisión 04	
		15/6/2017	Pág. 1 de 1



Certified to
NSF/ANSI/CAN 60

CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE CONTROL DE CALIDAD

PRODUCTO: SULFATO DE ALUMINIO GRADO 1 TIPO A FINO
 QUIMPAC 1000 SF
 ALUMINUM SULFATE GRADE 1 FINE TYPE A
CLIENTE: AGUA PEN
LOTE: 5302
FECHA DE PRODUCCION: MAYO/ 2023
FECHA DE CADUCIDAD: MAYO/ 2025

ANÁLISIS FÍSICO - QUÍMICO

PARÁMETROS	RESULTADOS	ESPECIFICACIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS
	5302		
Alumina Soluble Total Expresada como Al ₂ O ₃ %	17.04%	17% Mínimo	INEN 1907
Basicidad Expresada como Al ₂ O ₃ %	0.26%	0.05 % Mínimo	INEN 1906
Hierro Soluble Total Expresado como Fe ₂ O ₃ %	0.009%	0.01 % Máximo	INEN 1908
Materias Insolubles en Agua %	0.25%	0.5% Máximo	INEN 1905
GRANULOMETRIA			
Malla # 10	99.94%	90 % Mínimo	---
DOSIFICACIÓN MAXIMA USO (MUL) 250 mg/L			

ANALISTA RESPONSABLE


Anthony Obando

Planta Tratamiento de aguas Guayaquil

VÍA DAULE KM 16.5, AV ROSAVIN S/N Y CALLE COBRE; GUAYAQUIL - ECUADOR
 INDUSTRIA ECUATORIANA
 PRODUCTO CERTIFICADO CON SELLO DE CALIDAD INEN

QUIMPAC ECUADOR S. A.

Anexo L. Certificado de análisis de control de calidad del policloruro de aluminio líquido.

	FORMATO CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE CONTROL DE CALIDAD POLICLORURO DE ALUMINIO_PAC	F.2C6.25	
		15/6/2017	Pág. 1 de 1



Certified to
NSF/ANSICAN 60

CERTIFICADO DE ANALISIS DE CONTROL DE CALIDAD

PRODUCTO POLICLORURO DE ALUMINIO
 PAC
 QUIMPAC 2500
 POLYALUMINUM CHLORIDE
CLIENTE: AGUA PEN
LOTE T1/090523/2300
FECHA PRODUCCION 20 DE ABRIL DEL 2023
FECHA DE CADUCIDAD 20 DE ABRIL DEL 2024

ANÁLISIS FÍSICO - QUÍMICO

PARÁMETROS	RESULTADOS	ESPECIFICACIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS
Densidad a 20° C	1.380	1,365 ± 0.015Kg/L	AWWA B408-18
Alúmina soluble total expresada como Al ₂ O ₃ %	17.10	17± 1.5 %	AWWA B408-18
Basicidad expresada como Al ₂ O ₃ %	48.17	40+/-10 %	AWWA B408-18
Turbiedad	3.43	<50 NTU	---
Color	CUMPLE	característico	AWWA B408-18

DOSIFICACIÓN MAXIMA USO (MUL) 250 mg/L

ANALISTA RESPONSABLE

Anthony Obando
 Planta Tratamiento de aguas Guayaquil

QUIMPAC ECUADOR S.A.

VÍA DAULE KM 16.5, AV ROSAVIN S/N Y CALLE COBRE; GUAYAQUIL - ECUADOR

Anexo M. Producción mensual con sulfato de aluminio tipo B sólido.



PRODUCCIÓN MENSUAL DE AGUA POTABLE																			
PLANTA POTABILIZADORA ATAHUALPA																			
DÍA	HORAS FUNCIONAMIENTO GMB EBAC			VOLUMEN AGUA CRUDA m3 CANALETA PARSHALL	APLICACIÓN SUSTANCIAS QUÍMICAS Kg			N° PURGAS DE SEDIMENTADORES				N° LAVADO DE FILTROS							
	N° 1	N° 4	N° 5		SULFATO DE ALUMINIO	CLORO GAS		MPA N° 1		MPA N° 2		MPA N° 1				MPA N° 2			
				PRE		POST	N° 1	N° 2	N° 1	N° 2	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	
1	0	24	24	74304	2100	501	111	3	3	3	3	1	0	1	1	0	1	1	1
2	0	24	24	74304	1750	446	74	3	3	3	3	0	1	0	1	1	1	0	0
3	0	24	24	74304	2100	444	74	3	3	3	3	1	1	1	0	1	0	1	1
4	0	24	24	74304	2000	446	74	3	3	3	3	1	0	1	1	0	1	1	1
5	0	24	24	74304	2100	446	74	3	3	3	3	0	1	0	1	1	1	0	0
6	0	24	24	74304	1750	446	74	3	3	3	3	1	1	1	0	1	0	1	1
7	0	24	24	74304	1750	446	74	3	3	3	3	1	0	1	1	0	1	1	1
8	0	23	24	73272	2100	440	73	3	3	3	3	1	1	0	1	1	1	1	0
9	2	22	22	71889	1750	431	72	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1
10	4	21	21	70081	2350	437	70	3	3	3	3	0	1	1	1	1	1	0	1
11	5	19	19	68693	2250	447	69	3	3	3	3	1	1	1	0	1	0	1	1
12	4	20	20	70025	2350	455	70	3	3	3	3	1	0	1	1	0	1	1	1
13	5	19	19	68598	1400	446	90	3	3	3	3	1	1	0	1	1	1	1	0
14	4	20	20	69549	2100	384	117	3	3	3	3	0	1	1	1	1	1	0	1
15	0	24	24	74304	1750	482	131	3	3	3	3	1	1	1	0	1	0	1	1
16	4	20	20	70310	1750	317	125	3	3	3	3	1	0	1	1	0	1	1	1
17	4	20	20	69929	1750	420	98	3	3	3	3	1	1	0	1	1	1	1	4
18	6	4	4	22565	950	135	34	3	3	3	3	0	0	1	0	0	0	0	1
19	1	23	23	73638	2100	468	110	3	3	3	3	1	1	0	1	1	1	1	0
20	0	24	24	74304	2100	483	111	3	3	3	3	0	1	1	1	1	1	0	1
21	0	24	24	74304	2450	483	111	3	3	3	3	1	0	1	0	0	0	1	1
22	0	24	24	74304	2100	483	111	3	3	3	3	1	1	0	1	1	1	1	0
23	0	24	24	74304	2100	483	111	3	3	3	3	0	1	1	1	1	1	0	1
24	3	21	21	71451	2100	464	107	3	3	3	3	1	0	1	0	0	0	1	1
25	3	21	21	70367	2100	458	106	3	3	3	3	0	1	0	1	1	1	0	0
26	3	21	21	70690	2100	424	106	3	3	3	3	1	0	1	0	0	0	1	1
27	5	19	19	68503	2100	411	103	3	3	3	3	0	1	0	1	1	1	0	0
28	3	21	21	71261	2100	428	107	3	3	3	3	1	1	1	0	1	0	1	1
29	1	23	23	73638	2100	442	110	3	3	3	3	1	0	0	1	0	1	1	0
30	6	18	18	67932	2100	408	102	3	3	3	3	0	1	1	0	1	0	0	1
31	5	19	19	68123	2100	443	102	3	3	3	3	1	0	1	1	0	1	1	1
TOTALES	68	662	663	2182162	61700	13447	2901	93	93	93	93	21	20	21	21	20	21	21	25
						16348													

Fuente: AGUAPEN-EP.