

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Química y Textil



TESIS

Diseño de una planta piloto para la remoción de plomo mediante el proceso de coagulación-floculación

Para obtener el título profesional de Ingeniero Químico.

Elaborado por

Dante Junior Castillo Cisneros

 [0009-0008-8704-9881](https://orcid.org/0009-0008-8704-9881)

Asesor

Ing. Juan Angel Turriate Manrique

 [0009-0007-7189-7889](https://orcid.org/0009-0007-7189-7889)

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Castillo Cisneros [1]
Referencia/Reference	[1] D. Castillo Cisneros, " <i>Diseño de una planta piloto para la remoción de plomo mediante el proceso de coagulación-floculación</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Castillo, 2024)
Referencia/Reference	Castillo, D. (2024). <i>Diseño de una planta piloto para la remoción de plomo mediante el proceso de coagulación-floculación</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Dedico esta tesis a Dios, por ser mi guía, mi fortaleza y la razón de cada uno de mis logros. A mis padres Dante y Olga, por ser los pilares fundamentales de mi vida, por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mis hermanos Paolo y Jessy por su cariño y por acompañarme en cada paso del camino. Y a mi novia Melissa, por su paciencia, su amor y ser mi apoyo en cada paso de este proceso. Sin ustedes, este logro no habría sido posible. Gracias por estar siempre a mi lado.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a las siguientes personas que hicieron posible la realización de esta tesis.

En primer lugar, agradezco al Ing. Gonzalo Paredes Contreras por brindarme la oportunidad de realizar mis pruebas experimentales, su apoyo y confianza fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

A mi asesor, el Ing. Juan Turriate Manrique, le agradezco por su constante apoyo y asesoría a lo largo de esta investigación.

Finalmente, extendo mi agradecimiento a todos mis profesores, quienes, con su enseñanza han guiado mi formación académica.

Resumen

El objetivo del actual estudio es diseñar una planta para el tratamiento del efluente residual de un laboratorio de servicio de minerales mediante el proceso de coagulación-floculación y pueda emitir valores de plomo menores a 0.5 mg/l, este proyecto es de importancia ya que las pequeñas industrias pueden emplearlo como guía de implementación de una planta piloto para el tratamiento de un agua residual industrial.

El estudio que se ha realizado es de tipo experimental y correlacional, empleando un diseño experimental compuesto; asimismo evaluando la influencia de las variables de operación que impactan al proceso como la dosis coagulante, floculante, la velocidad de agitación rápida y lenta, evaluando su impacto sobre las variables dependientes (Plomo, pH, turbidez y volumen de lodos).

Mediante el software Desing Expert 12, se determinó una correlación de 89.06%, entre las variables operacionales y el plomo residual, siendo la dosis del coagulante la variable crítica del proceso de remoción. Se determinó la dosificación óptima en 96 ppm de sulfato férrico, 9 ppm de polímero aniónico 203 rpm de velocidad de agitación rápida y 60 rpm de velocidad lenta, además se evaluó las correlaciones de pH, turbidez y volumen de lodos, entre las variables operacionales obteniendo unas correlaciones de 99.19%, 92.93% y 93.23% respectivamente.

Con los valores óptimos de operación se diseñó el tanque de agitación, un impulsor, el sistema de bombeo y el tanque de sedimentación, al ejecutar el proyecto se obtuvo valores de plomo residual inferiores a 0.5 mg/l con una remoción superior al de 99.0%.

Palabras clave — Coagulación, floculación, diseño, metales pesados, planta piloto.

Abstract

The objective of the current study is to design a plant for the treatment of residual effluent from a mineral service laboratory through the coagulation-flocculation process and can emit lead values less than 0.5 mg/l, this project is important since small industries can use it as a guide to implement a pilot plant for the treatment of industrial wastewater.

The study that has been carried out is experimental and correlational, using a composite experimental design; also evaluating the influence of the operating variables that impact the process such as the coagulant dose, flocculant, fast and slow agitation speed, evaluating their impact on the dependent variables (Lead, pH, turbidity and sludge volume).

Using the Design Expert 12 software, a correlation of 89.06% was determined between the operational variables and the residual lead, with the coagulant dose being the critical variable of the removal process. The optimum dosage was determined at 96 ppm of ferric sulphate, 9 ppm of anionic polymer at 203 rpm of fast agitation speed and 60 rpm of slow speed. In addition, the correlations of pH, turbidity and sludge volume were evaluated among the operational variables, obtaining correlations of 99.19%, 92.93% and 93.23% respectively.

Using the optimal operating values, the agitation tank, an impeller, the pumping system and the sedimentation tank were designed. When executing the project, residual lead values lower than 0.5 mg/l were obtained with a removal greater than 99.0%.

Keywords — Coagulation, flocculation, design, heavy metals, pilot plant.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	16
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo.....	18
1.1 Generalidades	18
1.2 Descripción del problema de investigación	19
1.3 Objetivos del estudio.....	22
1.3.1 Objetivo general	22
1.3.2 Objetivos específicos.....	22
1.4 Hipótesis	23
1.4.1 Hipótesis general.....	23
1.4.2 Hipótesis específicas.....	23
1.5 Antecedentes investigativos	23
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	28
2.1 Marco teórico	28
2.1.1 Aguas residuales.....	28
2.1.2 Normativa de los valores máximos admisibles	29
2.1.3 Decreto supremo N°010-2019-VIVIENDA	30
2.1.4 Parámetros de calidad del agua	32
2.2 Marco conceptual	34
2.2.1 Teoría de la coagulación y floculación.....	34
2.2.2 Coagulación	35
2.2.3 Floculación	43
2.2.4 Reactivos empleados para el proceso coagulación – floculación	47
2.2.5 Agitación y mezcla.....	50
2.2.6 Tanque de agitación	51
2.2.7 Componentes del tanque de agitación	52

2.2.8	Patrones de flujo	53
2.2.9	Tipos de Impulsor	54
2.2.10	Diseño de un tanque de agitación	56
2.2.11	Diseño compuesto centrado	57
capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación		60
3.1	Diseño de la investigación	60
3.1.1	Caracterización del agua residual	60
3.1.2	Diseño de las pruebas de coagulación y floculación	60
3.1.3	Preparación de reactivos	62
3.1.4	Procedimiento para las pruebas experimentales	62
3.1.5	Diseño de optimización	63
3.2	Diseño del tanque	63
3.2.1	Selección de material de construcción	63
3.2.2	Dimensionamiento del tanque	65
3.2.3	Cálculo del espesor de pared del tanque	66
3.2.4	Cálculo de deflectores	69
3.2.5	Diseño del sistema de agitación	70
3.2.6	Diseño del eje	73
3.2.7	Diseño del impulsor	81
3.3	Diseño del tanque ecualizador	87
3.4	Diseño del sedimentador de base cónica	88
3.4.1	Dimensiones del sedimentador	88
3.4.2	Espesor del sedimentador	90
3.5	Diseño del sistema de bombeo	92
3.5.1	Determinación del diámetro de succión e impulsión	93
3.5.2	Estimación de la pérdida de carga en la succión	95
3.5.3	Altura mínima de la tubería de succión	100
3.5.4	Estimación de la curva característica del sistema	103
3.5.5	Determinación de la potencia de la bomba	106

3.5.6	Selección de la bomba	106
3.5.7	Distribución de las tuberías	109
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados		113
4.1	Resultados descriptivos	113
4.1.1	Resultados de las características fisicoquímicas del agua residual del laboratorio de servicio.	113
4.1.2	Resultados descriptivos del tratamiento a nivel laboratorio	114
4.1.3	Resultados descriptivos de la comprobación de los parámetros óptimos 122	
4.1.4	Resultados descriptivos del tratamiento a nivel planta piloto.	125
4.2	Resultados inferenciales	128
4.2.1	Resultados del análisis estadístico del diseño central compuesto para la remoción del plomo	128
4.2.2	Resultados del análisis estadístico del diseño central compuesto para el volumen de lodos	133
4.2.3	Resultados del análisis estadístico del diseño central compuesto para el pH final del agua tratada	135
4.2.4	Resultados del análisis estadístico del diseño central compuesto para turbidez (NTU)	137
Conclusiones		140
Recomendaciones		142
Referencias bibliográficas		143
Anexos		143

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Normativa de contenido de plomo en efluentes industriales de algunos países sudamericanos</i>	30
Tabla 2 <i>Anexo 1 del VMA</i>	31
Tabla 3 <i>Anexo 2 del VMA</i>	31
Tabla 4 <i>Medidas para el dimensionamiento de un tanque con agitación</i>	57
Tabla 5 <i>Niveles de las variables independientes</i>	60
Tabla 6 <i>Parámetros de la prueba de coagulación y floculación</i>	61
Tabla 7 <i>Composición química de los aceros</i>	64
Tabla 8 <i>Carbono equivalente en cada tipo de acero</i>	64
Tabla 9 <i>Propiedades mecánicas y su resistencia a la corrosión de los aceros</i>	65
Tabla 10 <i>Requerimientos para el diseño del tanque</i>	65
Tabla 11 <i>Dimensiones del diseño del tanque de agitación</i>	66
Tabla 12 <i>Clase de corrosión en el acero inoxidable</i>	68
Tabla 13 <i>Valores de factor de choque y fatiga</i>	77
Tabla 14 <i>Dimensiones del tanque ecualizador</i>	87
Tabla 15 <i>Velocidades recomendadas para fluidos en tuberías</i>	94
Tabla 16 <i>Longitud equivalente de los accesorios en la succión</i>	98
Tabla 17 <i>Longitud equivalente de los accesorios en la sección de impulsión</i>	103
Tabla 18 <i>Tabulación de los resultados de altura manométrica a diferentes caudales</i> ...	105
Tabla 19 <i>Dimensiones de la bomba centrífuga</i>	107
Tabla 20 <i>Caracterización fisicoquímica del agua residual antes del tratamiento</i>	113
Tabla 21 <i>Resultados de las variables dependientes empleando los parámetros óptimos</i>	122
Tabla 22 <i>Caracterización fisicoquímica del agua residual luego del tratamiento a nivel planta piloto</i>	128
Tabla 23 <i>Resultados del ANOVA y el modelo matemático para la remoción de plomo</i> ..	129

Tabla 24 <i>Resumen de la optimización de las variables independientes y las respuestas</i>	131
Tabla 25 <i>Optimización de las variables independientes</i>	132
Tabla 26 <i>Prueba de T-Student a los valores de plomo residuales</i>	132
Tabla 27 <i>Prueba de T-Student a los valores del porcentaje de remoción de plomo</i>	133
Tabla 28 <i>Resultados del ANOVA y el modelo matemático del volumen de lodos generados</i>	134
Tabla 29 <i>Resultados del ANOVA y el modelo matemático del pH del agua tratada</i>	136
Tabla 30 <i>Resultados del ANOVA y el modelo matemático de la turbidez del agua tratada</i>	138

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Diagrama de Pourbaix del sistema Pb (II)</i>	33
Figura 2 <i>Díagrama de solubilidad de metales en agua</i>	34
Figura 3 <i>Energía potencial de interacción entre dos coloides</i>	36
Figura 4 <i>Coagulación por adsorción</i>	37
Figura 5 <i>Fragmentos de floc reestablecidos</i>	38
Figura 6 <i>Potencial en la coagulación por adsorción</i>	38
Figura 7 <i>Captura de los iones metálicos</i>	39
Figura 8 <i>Coagulación por barrido</i>	40
Figura 9 <i>Modelo del proceso de coagulación</i>	41
Figura 10 <i>Efecto del tiempo de floculación en la sedimentación</i>	44
Figura 11 <i>Efecto de la variación de la velocidad de agitación y la turbidez</i>	45
Figura 12 <i>Concentración del coloide, expresada como concentración de superficie</i>	46
Figura 13 <i>Diagrama de remoción</i>	47
Figura 14 <i>Tanque de agitación con accesorios</i>	52
Figura 15 <i>Sistema de agitación con flujo axial</i>	53
Figura 16 <i>Sistema de agitación con flujo radial</i>	54
Figura 17 <i>Sistema de agitación con flujo tangencial</i>	54
Figura 18 <i>Impulsor tipo hélice</i>	55
Figura 19 <i>Impulsor tipo pala</i>	55
Figura 20 <i>Impulsor tipo turbina</i>	56
Figura 21 <i>Dimensiones para el diseño de un tanque agitado</i>	56
Figura 22 <i>Diseño central compuesto circunscrito</i>	58
Figura 23 <i>Estructura de un diseño experimental compuesto centrado</i>	58
Figura 24 <i>Comparación entre las variantes del diseño compuesto central al emplear diferentes alfa</i>	59
Figura 25 <i>Sistema de agitación mecanico</i>	63
Figura 26 <i>Diseño del tanque de agitación</i>	69

Figura 27	<i>Correlación del número de Reynolds y el número de potencia (N_p)</i>	71
Figura 28	<i>Motor de trifásico de 2 HP</i>	72
Figura 29	<i>Instalación eléctrica del variador de frecuencia</i>	73
Figura 30	<i>Diagrama de cuerpo libre del momento torsor</i>	74
Figura 31	<i>Diagrama de fuerzas y momentos sobre el eje de agitación</i>	75
Figura 32	<i>Deflexión del eje durante la agitación</i>	78
Figura 33	<i>Sección de un eje macizo</i>	80
Figura 34	<i>Diagrama viscosidad – Volumen de tanque para determinar el tipo de impulsor</i>	81
Figura 35	<i>Impulsor tipo hélice</i>	82
Figura 36	<i>Impulsor tipo turbina de palas planas inclinadas</i>	83
Figura 37	<i>Dimensiones para el diseño de un impulsor tipo turbina</i>	83
Figura 38	<i>Vista axial del impulsor</i>	85
Figura 39	<i>Vista de perfil de la hoja del impulsor</i>	85
Figura 40	<i>Dimensionamiento del sedimentador</i>	88
Figura 41	<i>Diferencial de espesor</i>	91
Figura 42	<i>Sedimentador cilíndrico de base cónica</i>	92
Figura 43	<i>Sistema de succión</i>	95
Figura 44	<i>Resistencias de válvulas y accesorios expresados como longitud equivalente de diámetro de tubería</i>	97
Figura 45	<i>Diseño de la distribución de la tubería en la succión de la bomba</i>	98
Figura 46	<i>Constante de Hazen – Williams para diversos materiales de tubería</i>	99
Figura 47	<i>Altura mínima de tubería sumergida para evitar ingreso de aire en la tubería de succión</i>	101
Figura 48	<i>Diseño de la distribución de la tubería en la impulsión de la bomba</i>	102
Figura 49	<i>Curva característica del sistema de bombeo</i>	104
Figura 50	<i>Curva característica del sistema de bombeo</i>	105
Figura 51	<i>Vistas de la Bomba centrífuga</i>	107
Figura 52	<i>Curvas características de la bomba</i>	108
Figura 53	<i>Punto de operación del sistema de bombeo</i>	109

Figura 54	<i>Distribución de la tubería para el reciclo (zona de impulsión)</i>	110
Figura 55	<i>Distribución de la tubería para el reciclo (zona de succión)</i>	110
Figura 56	<i>Distribución de la tubería para el ingreso del agua residual a la planta piloto</i>	111
Figura 57	<i>Tubería de unión entre el tanque agitado y el tanque ecualizador</i>	112
Figura 58	<i>Distribución de la tubería a la salida del sedimentador</i>	112
Figura 59	<i>Resultados descriptivos de plomo</i>	114
Figura 60	<i>Evaluación de las variables de operación respecto a la remoción de plomo</i>	115
Figura 61	<i>Prueba de normalidad de los valores de plomo</i>	116
Figura 62	<i>Resultados descriptivos de pH</i>	116
Figura 63	<i>Evaluación de las variables de operación respecto al pH</i>	117
Figura 64	<i>Prueba de normalidad de los valores de pH</i>	118
Figura 65	<i>Resultados descriptivos de la turbidez</i>	118
Figura 66	<i>Evaluación de las variables de operación respecto a la turbidez</i>	119
Figura 67	<i>Prueba de normalidad de los valores turbidez (NTU)</i>	120
Figura 68	<i>Resultados descriptivos de la turbidez</i>	120
Figura 69	<i>Evaluación de las variables de operación respecto al volumen de lodos</i>	121
Figura 70	<i>Prueba de normalidad de los valores de volumen de lodos generados</i>	122
Figura 71	<i>Datos descriptivos de la comprobación de los parámetros óptimos</i>	123
Figura 72	<i>Evaluación de la normalidad de la comprobación de los parámetros óptimos</i>	124
Figura 73	<i>Evaluación de la normalidad del porcentaje de remoción de plomo</i>	124
Figura 74	<i>Datos descriptivos de plomo del monitoreo de la planta piloto</i>	125
Figura 75	<i>Datos descriptivos del porcentaje de remoción de plomo en el monitoreo de la planta piloto</i>	126
Figura 76	<i>Datos descriptivos del pH final en el monitoreo de la planta piloto</i>	126
Figura 77	<i>Evaluación de la normalidad del plomo residual y el porcentaje de remoción de plomo de la planta piloto</i>	127
Figura 78	<i>Superficie respuesta de la remoción del plomo</i>	130
Figura 79	<i>Solución óptima para las variables independientes y las respuestas</i>	131
Figura 80	<i>Superficie respuesta del volumen de lodos generado luego del tratamiento</i>	135

Figura 81	<i>Superficie respuesta del pH obtenido luego del tratamiento.</i>	137
Figura 82	<i>Superficie respuesta de la turbidez del agua luego del tratamiento.</i>	139

Introducción

El agua es el recurso hídrico básico, sin embargo, su limitado suministro es una problemática que afecta actualmente a más del 40% de la población global, asimismo más del 80% de las aguas residuales son producidas por el ser humano y vertidas sin ningún tipo de tratamiento a los ríos y mares, por esta razón se ve en la necesidad que se investiguen y desarrollen técnicas de tratamiento de agua más eficientes para reducir los contaminantes presentes como sulfuros, sulfatos y los metales pesados. De los contaminantes antes mencionados, uno de los metales pesados más problemáticos debido a su toxicidad y capacidad de bioacumulación en los seres vivos es el plomo. La exposición a niveles altos de plomo resulta ser muy peligrosa ocasionando enfermedades neurológicas, renales y cardiovasculares. (OMS, 2023)

En las últimas décadas el Perú ha tenido un gran desarrollo industrial, esto es particularmente evidente en lo que respecta al nivel de contaminación ambiental y al vertido de aguas residuales industriales sin tratamiento previo. A pesar de que existe una legislación el “Decreto Supremo N°010-2019-VIVIENDA” las industrias por motivos económicos no ejecutan los tratamientos adecuados para sus efluentes.

Existen diversos tipos de tratamientos como la coagulación y floculación, precipitación química, oxidación química entre otras. El procesamiento del agua mediante procesos de coagulación y floculación comienza con la aglomeración de pequeños flóculos, el cual por su tamaño suficientemente grande puede sedimentar y ser separado del efluente luego del tratamiento (Alcarraz et al., 2010).

El actual estudio presenta como propósito el diseño de una planta piloto con la finalidad que se logre una reducción en el contenido de plomo de los efluentes industriales de un laboratorio de servicio de análisis de minerales, por lo tanto, pueda cumplir con los

valores máximos permitidos de plomo especificados en el Decreto Supremo n. 010-2019-VIVIENDA en el Anexo 2.

Durante el desarrollo de los capítulos del actual estudio, inicialmente se describe las generalidades y la problemática de la investigación, además, sobre esta base se definieron y formularon objetivos e hipótesis generales y específicos; luego, se discute el marco teórico y el marco conceptual, los conceptos teóricos básicos que se utilizaron en el diseño de la planta piloto y como principios para la eliminación del plomo de las aguas residuales industriales, en los siguientes capítulos se detalla el diseño y dimensiones del tanque de mezcla e impulsor, el sistema de bombeo y el diseño del tanque de sedimentación, asimismo se define el diseño experimental mediante la metodología del diseño compuesto centrado (DCC), los resultados fueron evaluados y analizados mediante modelos estadísticos, finalmente, los parámetros óptimos se estimaron utilizando el método numérico del software Desing Expert 12.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

Los procesos para el tratamiento de aguas residuales industriales ayudan a mitigar la contaminación hídrica, la cual es generada por el mismo crecimiento industrial del país y la poca regularización por parte de las autoridades, el tratamiento de efluentes industriales es de gran importancia así de este modo se pueda garantizar el ciclo del agua y se pueda liberar los efluentes con el menor contenido de contaminantes hacia los cuerpos receptores de agua.

Cada tipo de industrias presentan efluentes con una caracterización particular en la concentración de los contaminantes presentes, por ejemplo, en la industria textil presentan detergentes, tensioactivos y metales pesados como cromo y cadmio, mientras que en la industria alimentaria los efluentes pueden presentar carga orgánica que pueden aumentar la cantidad de la demanda biológica de oxígeno (DBO5), asimismo los efluentes de la industria minera pueden presentar caracteres ácidos o básicos y la detección de metales pesados como cadmio, zinc, plomo, entre otros.

Los efluentes de los laboratorios de servicio del rubro mineros también presentan las mismas características como los de la industria minera ya que las muestras que se trabajan son las mismas matrices como concentrados, minerales o relaves.

El laboratorio de servicios de análisis mineralógicos emplea para tratar su efluente industrial la precipitación por oxidación, el cual agregando peróxido de hidrógeno al efluente, aumenta su potencial óxido-reducción generando la oxidación y precipitación de varios metales, luego por medio de un filtro éstos son retenidos a su salida; no obstante este sistema no es sustentable debido a los costos de mantenimiento e insumos requeridos, asimismo al realizar algunos monitoreos en la salida de la poza de precipitación

se observó que el contenido de plomo residual estaba alrededor de 1.5 mg/l, superando el valor máximo establecido por el decreto peruano.

En base a los monitoreos realizados se ha visto la necesidad de emplear el sistema de floculación y coagulación para el tratamiento del efluente industrial, al realizar pruebas puntuales con sulfato férrico y policloruro de aluminio (PAC), se observó una mejor clarificación del efluente con el sulfato férrico, obteniendo una remoción preliminar del plomo de 96.3 %, es por ello que se ha propuesto un modelo experimental para evaluar la dosificación óptima y en base a ello realizar la construcción de una planta piloto con capacidad de 1.1 m³ de agua.

1.2 Descripción del problema de investigación

Los efluentes industriales provenientes de los laboratorios de servicio, relacionados a la industria minera son altamente contaminados con metales pesados como como el plomo, Aluminio, Arsénico, cobre, mercurio entre otros, además, debido a su proceso de extracción para la cuantificación de los analitos estos efluentes presentan un pH muy ácido entre 2 a 3.5 unidades, representando un problema ambiental al ser vertidos a un cuerpo receptor de agua (Paz & Manturano, 2017)

Diversos tipos de industrias vierten diversos metales en forma de iones a los sistemas públicos de aguas residuales y en algunos casos superan los valores máximos permisibles establecidos en el Decreto supremo N° 010-2019 Vivienda- Anexo 1 y 2; esto ha llevado que en la última década varias empresas han tenido la necesidad de implantar sistemas de tratamientos de aguas para poder cumplir con la VMA, implementando tecnologías como tratamientos biológicos, oxidación avanzada, electrocoagulación entre otros.

Actualmente las industrias que ofrecen los servicios de análisis en muestras mineralizadas hacen muchos esfuerzos en adoptar medidas preventivas para mitigar la concentración de los metales en los efluentes industriales.

Desafortunadamente, el alto costo de instalación o el gran espacio disponible para su puesta en marcha impide que una pequeña a mediana empresa pueda aplicar estas tecnologías. En consecuencia, el sector productivo que trabaja con este tipo de muestras desecha en sus efluentes residuales cierta cantidad de metales pesados que superan los estándares aceptados.

El laboratorio Alex Stewart International del Perú es una corporación con su casa matriz en Liverpool, Inglaterra que brinda servicios supervisión y control de calidad de los embarques y análisis; en ella se trabajan varios tipos de matrices como muestras de alimentos, aguas y minerales, esta última matriz abarca el análisis de muestras mineralógicas y productos conexos del sector minero, entre las muestras que se analizan se encuentran las muestras de minerales metálicos como minerales geológicos, relaves, escorias, concentrados, lodos y precipitados; además de minerales no metálicos como carbón, arcilla, bauxita, azufre, yeso, tierra de diatomeas, carbonato de dolomita y otros minerales no metálicos, todas estas matrices se analizan mediante métodos clásicos como Fire Assay, gravimetría y métodos instrumentales como FIAS, potenciometría, IPC/OES, espectrofotometría de absorción atómica, ion selectivo y volumetría. Esta última matriz es una de las más contaminantes ya que durante su proceso analítico se debe disgregar la muestra con ácidos como: ácido nítrico, ácido sulfúrico, ácido fluorhídrico, ácido perclórico y ácido clorhídrico, estos remanentes ácidos son almacenados en bidones de 20 L los cuales son recogidos por una empresa prestadora de servicio que se encarga de su disposición final.

La problemática incide al momento de lavar el material de vidrio para que pueda usarse nuevamente en el proceso analítico, este al contener un alta acidez y trazas de metales da como resultado que las aguas residuales vertidas por cada área del laboratorio emitan al alcantarillado valores superiores a lo establecido por el Decreto Supremo N°010-2019-VIVIENDA valor máximo permitido.

En primer lugar se realizó un monitoreo del efluente, el cual presentaba un pH alrededor de 4.5 y luego de realizar el análisis por metales pesados mediante la técnica instrumental (equipo de ICP-OES) se encontró un elevado contenido en plomo, aproximadamente 30 veces lo establecido por el Decreto Supremo N°010-2019-VIVIENDA, como solución el pH se regulo con hidróxido de sodio y para reducir el contenido de plomo se implementó un tratamiento por medio de oxidación, que mediante la adición de peróxido de hidrógeno en el tanque de almacenamiento se aumentó el potencial óxido-reducción produciendo la formación y oxidación del plomo en PbO_2 . Al realizar el análisis del sobrenadante en el tanque ecualizador los niveles de plomo estaban por debajo de 0.05 ppm cumpliendo con la VMA, sin embargo, tiempo después se realizó el análisis en el punto de descarga detectando la presencia de plomo, esto se debió ya que al momento de realizar la descarga del agua tratada el sistema de bombeo trasladaba parte del sedimento precipitado y este al estar formado de partículas muy finas de PbO_2 pasaba por el filtro de descargar al alcantarillado público, siendo su nivel superior a 0.05 ppm e incumpliendo el Decreto Supremo N°010-2019-VIVIENDA.

La alternativa que se plantea para la reducción de metales pesados es la ejecución de un sistema de tratamiento por medio de coagulación y floculación.

Existen una variedad de coagulantes elaborados a raíz de sales de hierro y aluminio, para este caso se empleará el uso de sulfato férrico $Fe_2(SO_4)_3$ como coagulante, ya que al disociarse los iones férricos Fe^{3+} neutralizan la carga negativa de las partículas

restantes de aguas residuales, por otra parte al adicionar el polímero aniónico en el efluente coagulado ayuda a la aglomeración de las partículas neutras formando un precipitado más grande y pesado, facilitando su posterior separación en el procedimiento de filtrado.(Vargas, 2004)

El estudio actual tiene como propósito determinar la caracterización del efluente industrial del laboratorio de servicio de análisis “Alex Stewart International del Perú”, para luego mediante un diseño experimental establecer los parámetros óptimos de intensidad de agitación, así también como la dosis óptima del sulfato férrico y el polímero aniónico, en base a las pruebas experimentales y los parámetros de operación obtenidos anteriormente se elaborará un diseño de una planta piloto para la remoción de plomo del efluente.

¿Será el tratamiento de sulfato férrico y el polímero aniónico suficiente para la remoción del contenido de plomo presente en el efluente del laboratorio de servicio Alex Stewart International del Perú S.R.L. para que pueda cumplir los valores máximos admisibles en Pb establecidos en el anexo 2 del Decreto Supremo N°010-2019-VIVIENDA?

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo general

Diseñar una planta piloto para tratar el efluente de un laboratorio de servicio mediante coagulación-floculación y pueda cumplir con el valor máximos admisibles de plomo indicado en el anexo 2 del Decreto Supremo N°010-2019-VIVIENDA.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Desarrollar un diseño experimental para reducir el contenido de plomo (Pb) mediante el proceso de coagulación-floculación en un efluente de un laboratorio de servicio.

- b) Estimar las condiciones óptimas de operación para el tratamiento del efluente mediante coagulación-floculación y así lograr la máxima remoción de plomo.
- c) Evaluar el comportamiento de la turbidez, pH y los lodos generados al modificar los parámetros de operación del proceso de coagulación-floculación.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

¿Los valores de plomo emitidos por la planta piloto luego del tratamiento mediante coagulación-floculación son menores a 0.5 mg/l?

1.4.2 Hipótesis específicas

- a) El diseño experimental central compuesto (DCC) es suficiente para determinar las condiciones óptimas de remoción del plomo mediante el proceso de coagulación-floculación.
- b) Al aplicar las condiciones óptimas de operación en el proceso de coagulación-floculación, se remueve más del 97% de plomo.
- c) Las variables de operación como la dosis de sulfato férrico y polímero aniónico, la velocidad de agitación rápida y lenta afectan significativamente en el volumen de lodos producidos, pH y turbidez.

1.5 Antecedentes investigativos

Muchas de las actividades generadas por el ser humano generan un impacto negativo en los recursos hídricos, generando contaminación y haciendo que este recurso ya no pueda ser apto para el consumo humano, por ello, los procesos de tratamiento de agua son cada vez más complejos en la actualidad, ya sea por la presencia de la carga bacteriana o la presencia de diferentes compuestos químicos como los metales pesados que son nocivos para la salud (Chulluncuy, 2011).

Con la finalidad de eliminar los metales pesados en los efluentes de la industria, se han investigado diferentes coagulantes y polímeros orgánicos e inorgánicos, como por ejemplo la investigación en la que se empleó la pectina de nopal como biopolímeros de reemplazo del polímero sintético en las remociones de metales pesados, en el efluente a tratar se encontraron iones metálicos (Ni^{2+} , Cr^{3+} , Ca^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} y Cu^{2+}), después de pruebas experimentales, se determinó que la dosis óptima de pectina es 0,019 mg/ml, pH 5,5 y velocidad de agitación de 320 rpm, obteniendo porcentaje de remoción de hasta 90% como para el Ca^{2+} , Cu^{2+} y Zn^{2+} , en el caso de Cd^{2+} y Pb^{2+} la remoción era menor de 50 % (Pinto et al., 2023).

Es importante conocer las bondades de los diversos coagulantes como alternativa en los procesos de remoción de metales pesados en los efluentes de agua residual, ya que cada uno de ellos poseen características propias que ayudan selectivamente a la disminución de ciertos contaminantes en el efluente.

Soto et al. (2004) realizó una comparación entre el uso de coagulantes para tratar un efluente industrial proveniente de la industria galvánica en el cual se encontró presencia de Cr^{3+} , Fe^{3+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} en las concentraciones de 447 ppm, 200 ppm, 750 ppm y 27 ppm respectivamente, para tal propósito se optaron los siguientes coagulantes sulfato de aluminio, sulfato férrico, cloruro férrico y sulfato ferroso, asimismo a que el pH de este efluente se encontraba alrededor de 2, se debe agregar hidróxido de sodio para elevar el pH a 10, ya que a estos niveles de basicidad los hidróxidos de los metales contaminantes son insolubles, posteriormente a ello se procedió con el proceso de coagulación con los coagulantes antes mencionados, determinando que el sulfato férrico y ferroso tiene una buena capacidad de remoción de metales, respecto al tiempo de sedimentación de los flocs formados se puede concluir que el sulfato ferroso, sulfato férrico y cloruro férrico tienen tiempos de sedimentación muy similares a comparación del sulfato de aluminio que no se compactó al mismo nivel que los otros coagulantes (Soto et al., 2004).

Según Teng et al. (2014) estudiaron el efecto de los coagulantes y la combinación de floculantes y coagulantes en el tratamiento de aguas residuales de la fabricación de papel, se evaluó la eficiencia de remoción teniendo en cuenta el pH, la dosificación del coagulante y floculante, las características del sedimento formado. Empleando en el proceso dos coagulantes: alumbre y cloruro de polialuminio; además se emplearon como floculantes 9 poliacrilamidas catiónicas y aniónicas. Al realizar las pruebas experimentales empleando independientemente como coagulantes tanto el alumbre con una concentración de 1000 mg/l y el cloruro de polialuminio con una concentración de 500 mg/l lograron una disminución mayor al 90% en la eliminación de sólidos suspendidos totales, turbidez y DQO; de los floculantes empleados la poliacrilamida catiónica (Organopol 5415) en una concentración de 5mg/L se obtuvo una remoción del 95% de turbidez, 98% de remoción de sólidos suspendidos totales y 93% de reducción de DQO, para el proceso combinado el alumbre junto con el Organopol 5415 obtuvieron la mayor eficiencia de remoción.(Teng et al., 2014)

Pang et al. (2011) investigaron la relación de eficacia de remoción variando el tipo de coagulante y su relación con el pH, para ello se utilizó sulfato de aluminio, policloruro de aluminio y cloruro de magnesio, además se empleó como floculante el Koaret PA 3230, para evaluar la eficacia de la remoción de metales pesados de Pb^{2+} en presencia de Zn^{2+} y Fe^{2+} , se evaluó diferentes rangos de pH para cada coagulante, para el sulfato de aluminio se empleó de 6.2 a 7.8, cloruro de polialuminio de 8.0 a 9.3 y para el cloruro de magnesio de 8.7 a 10.9 de los cuales el cloruro de polialuminio fue el más eficaz en este estudio, logrando una remoción de Pb (II) superior al 99%.(Pang et al., 2011)

Los autores Sakhi et al. (2018) evaluaron la remoción de metales pesados de aguas residuales de la industria textil, utilizando cloruro férrico como coagulante, se evaluó tres factores de control: pH, dosis de floculante y dosis de coagulante. Las condiciones óptimas de operación para la remoción de cadmio, plomo, arsénico, níquel y selenio fueron de 0.64

g/L de sulfato férrico (coagulante) y 2.6 g/L de floculante a un pH de 8.1 obteniendo una remoción de iones metálicos de Cd^{3+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , As^{2+} , Se^{2+} en un porcentaje de 38.49%, 78.88%, 61.88%, 60.63%, 81.76%, 47.01% respectivamente. (Sakhi et al., 2018)

Hargreaves et al., (2018) evaluaron la eficacia de coagulación y floculación con cloruro férrico, polietilenimina y biopolímeros como el quitosano y floculano para eliminar los iones metálicos de Cu^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} del agua residual de una planta de tratamiento. La caracterización de la muestra indicaba que contenía 21 ppm de Cu, 0.8 ppm Pb, 4 ppm de Ni y 43 ppm de Zn, al realizar el tratamiento la polietilenimina y el quitosano presentaron niveles de remoción por debajo del 35% mientras que el cloruro férrico en una dosis óptima de 0.10 mg/L obtuvo un porcentaje de remoción de 48% de Cu, 56% de Pb, 41% de Zn, mientras que el biopolímero floculano en una dosis óptima de 0.25mg/L logrando un porcentaje de remoción de 77% de Cu, 68% de Pb, 42% de Zn. (A. Hargreaves et al., 2018)

Suo et al. (2020) en una investigación realizada para tratar aguas con contenido de Cd(II), Pb(II) y Cu(II), se empleó como coagulante el sulfato férrico polimérico, realizando un diseño de experimentos de un solo factor, se empleó la metodología de superficie respuesta con diseño Box-Behnken para investigar los efectos que tienen la dosis de sulfato férrico polimérico, el valor de pH y el tiempo de sedimentación en la eficiencia de remoción de metales pesados, estableciendo un modelo de superficie polinómica cuadrada. Se definió que la óptima dosis del sulfato férrico polimérico era de 59.6 mg/L, un pH de 8.04, generando un tiempo de sedimentación de 45.4 min eliminando satisfactoriamente los metales de Cd (II), Pb (II) y Cu (II) y cumpliendo con la normativa estándar integrada de descarga de aguas residuales de China (GB 8978-1996). Asimismo, se midió el potencial Z del sobrenadante y la dimensión fractal de los flóculos luego de haber sido coagulada en las condiciones óptimas, concluyendo que la neutralización

eléctrica y la coagulación por purga tienen un papel importante en la coagulación del metal pesado. (Suo et al., 2020)

Montoya & Silencio (2017) calcularon las eficiencias de remoción en un proceso de coagulación, en el cual evaluaron la dependencia del pH y el coagulante inorgánico que se está empleando, ya que este contribuye significativamente en el porcentaje de remoción. Al comparar la relación de pH y los coagulantes: sulfato ferroso y el cloruro férrico durante el tratamiento de muestras de aguas residuales industriales de la etapa de curtido, se definió que el valor de pH óptimo de ambos coagulantes era de 9 unidades, al aumentar la basicidad de la muestra ($\text{pH} > 10$) los porcentajes de remoción decrecen proporcionalmente con el aumento de pH (Montoya & Silencio, 2017).

Cueva (2014) evaluó que las aguas de los efluentes industriales mineros son caracterizadas por el contenido de metales pesados como plomo, cobre, zinc, arsénico entre otros, el tratamiento de este tipo de efluente se puede realizar con el sulfato férrico como coagulante en los procesos de coagulación-floculación, debido que son conocidas sus propiedades como reductor de metales pesados presentes en los efluentes, para lograr buenos resultados de remoción de metal, se requiere determinar los parámetros operativos óptimos, como la cantidad de sulfato ferroso, la velocidad de agitación y el tiempo de agitación, los cuales pueden ser fijados en una prueba de jarras a nivel laboratorio, además también es necesario evaluar el tiempo de sedimentación (Cueva, 2014)

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Aguas residuales

De todos los recursos que existen en la Tierra, el agua es uno de los recursos más importante para el desarrollo de la vida y la humedad, si este recurso llegara a faltar o a degradarse no sería posible supervivencia de cualquier ser vivo (Marsily, 2001).

Las aguas residuales son generadas como agua de desecho de los procesos industriales como en la industria textil, farmacéutica, minera entre otras más, esta agua contiene una gran variedad de elementos contaminantes como insumos químicos, compuestos orgánicos, metales pesados, entre otros, siendo un alto riesgo para la salud y el medio ambiente.(Thomas & Thomas, 2022)

Las aguas residuales se clasifican en 3:

- **Aguas residuales industriales.** este tipo de efluente es generado como un producto no deseado de una actividad industrial como la química, petroquímica, farmacéutica, producción de alimentos entre otras industrias, su composición de este tipo de agua residual depende del tipo de actividad industrial, pero en su mayoría este tipo de efluentes contiene altas concentraciones de contaminantes como productos químicos, compuestos orgánicos y metales pesados. (Antonopoulou & Hiskia, 2023)
- **Aguas residuales domésticas.** es proveniente de las acciones del ser humano en el hogar, como el uso de los servicios higiénicos, cocina, lavado de platos y ropa; esta agua tiene una variedad de contaminantes como detergentes, materia orgánica y carga microbiológica. Esta a su vez se divide en aguas residuales negras que son

provenientes de los inodores e instalaciones sanitarias y aguas residuales grises son provenientes como por ejemplo por el lavado de platos y lavado de ropa.(Ramos et al., 2003)

- **Aguas residuales municipales.** Este tipo de agua residual es la mezcla de las generadas en zonas urbanas como el agua residual doméstica y el agua residual industrial, esta agua puede contener gran cantidad de carga orgánica, este tipo de aguas son recolectadas por el alcantarillado público. (Ramalho et al., 2021)

Considerando el agua como un insumo importante, los desperdicios en ella deben ser minimizados, por ello los efluentes generados deben ser propiamente minimizados mediante un proceso físico o químico para poder recuperar el recurso al medio ambiente cumpliendo con la calidad requerida por las entidades reguladoras (Bretas et al., 2020).

2.1.2 Normativa de los valores máximos admisibles

Actualmente no hay una normativa internacional que establezca los niveles máximos permitidos para la descarga de efluentes en un cuerpo receptor, sin embargo, cada país establece regulaciones las cuales especifican el valor máximo permitido de los contaminantes que pueden estar presentes, a continuación, se evidencia en la tabla 1 un resumen del valor máximo permitido en algunos países para el plomo residual en el agua residual, establecidos como decretos supremos o alguna regulación normativa.

Tabla 1

Normativa de contenido de plomo en efluentes industriales de algunos países sudamericanos

País	Unidad	Valor máximo permitido de Plomo
México	mg/L	2.0
Perú	mg/L	0.5
Argentina	mg/L	0.5
Colombia	mg/L	0.2
Bolivia	mg/L	0.6
Ecuador	mg/L	0.5

2.1.3 Decreto supremo N°010-2019-VIVIENDA

El decreto supremo N°010-2019-VIVIENDA presenta la aprobación del VMA para la descarga de aguas residuales al alcantarillado público en el Perú, siendo regulado por proveedores de servicios de saneamiento que deben verificar los límites del VMA, estos parámetros de calidad son valores establecidos de concentración de los elementos físicos o químicos, que caracterizan a un efluente ya sea domestico o industrial, y garantiza que el efluente que será descargado al sistema de alcantarillado público no causará daños inmediatos o graduales a las instalaciones sanitarias. En Lima, Sedapal es responsable de monitorear el cumplimiento de lo dispuesto en los Anexos 1 y 2 del decreto supremo N°010-2019-VIVIENDA, los cuales se observan en la tabla 2 y tabla 3. (Ministerio de Vivienda, 2019)

Tabla 2*Anexo 1 del VMA*

Parámetro	Unidad	Simbología	VMA para descarga
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	DBO_5	500
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	DQO_5	1000
Sólidos suspendidos Totales	mg/l	S.S.T.	500
Aceite y Grasas	mg/l	A y G	100

Nota: Extraída de (Ministerio de Vivienda, 2019)

Tabla 3*Anexo 2 del VMA*

Parámetro	Unidad	Simbología	VMA para descarga
Aluminio	mg/l	Al	10
Arsénico	mg/l	As	0.5
Boro	mg/l	B	4
Cadmio	mg/l	Cd	0.2
Cianuro	mg/l	CN^-	1
Cobre	mg/l	Cu	3
Cromo hexavalente	mg/l	$Cr(VI)$	0.5
Cromo total	mg/l	Cr	10
Manganeso	mg/l	Mn	4
Mercurio	mg/l	Hg	0.02
Níquel	mg/l	Ni	4
Plomo	mg/l	Pb	0.5
Sulfatos	mg/l	SO_4^{2-}	1000
Sulfuros	mg/l	S^{2-}	5
Zinc	mg/l	Zn	10
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	NH_4^+	80
Potencial Hidrógeno	Unidad	pH	6-9
Sólidos sedimentables	ml/l/h	S.S.	8.5
Temperatura	°C	T	< 35

Nota: Extraída de (Ministerio de Vivienda, 2019)

2.1.4 Parámetros de calidad del agua

Potencial hidrógeno. Esta es una medida de la alcalinidad o la acidez del agua, el potencial hidrógeno (pH) se define en la escala logarítmica con valores de 0 a 14, el agua en su estado puro (no ionizada) tiene un pH alrededor de 7, según los valores máximos admisibles para el pH de un efluente puede variar entre 6 a 9. (Canales et al., 1999)

El pH cumple una función esencial en el tratamiento de aguas, ya que el pH tiene una influencia directa sobre las cargas superficiales, cuando está por encima del punto isoeléctrico de las partículas, estas tienden a tener carga superficial negativa, por otro lado, si el pH está por debajo del punto isoeléctrico de las partículas, es posible que tengan una carga superficial positiva. (Naceradska et al., 2019)

El pH cumple una función esencial en el tratamiento de aguas, ya que el pH tiene una influencia directa sobre las cargas superficiales, cuando está por encima del punto isoeléctrico de las partículas, estas tienden a tener carga superficial negativa, por otro lado, si el pH está por debajo del punto isoeléctrico de las partículas, es posible que tengan una carga superficial positiva. (Ojeda, 2015)

Metales pesados. Dentro de todos los compuestos químicos presentes en los cuerpos de aguas los metales pesados son los que generan mayor grado de contaminación en el medio acuático alterando el equilibrio ecológico, las elevadas concentraciones de estos elementos químicos metálicos son tóxicos o venenosos generando un grave peligro para los seres humanos y la fauna acuática, estos iones metálicos no pueden ser degradados o destruidos naturalmente, es por ellos la importancia de los tratamientos fisicoquímicos o biológicos para reducir su concentración en los efluentes, los metales pesados son los siguientes: aluminio, arsénico, cadmio, cobre, hierro, mercurio, zinc y plomo. (Li et al., 2023)

El plomo. El contenido de plomo puede entrar a los cuerpos receptores de agua por varias fuentes, pero la principal es debido a los efluentes industriales. (R. Harrison & Laxen, 1981)

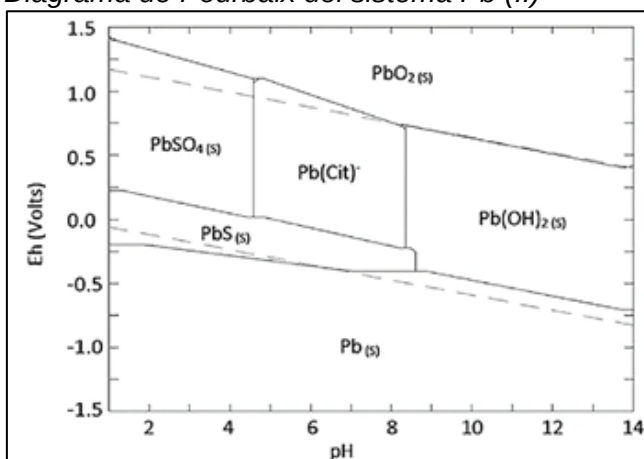
El plomo es un metal blando que se bioacumula en el cuerpo y puede causar daños al cerebro y al sistema nervioso, daño en los riñones y aumento de la presión arterial entre otras enfermedades. (Palazuelos & Hernández, 2008)

El plomo en su estado elemental no es soluble en agua en condiciones normales, pero sí en forma de carbonato o bicarbonato de plomo, es usual encontrar al plomo en formas de sulfuro y fosfatos, siendo en estas formas extremadamente insolubles en el agua. (Cornelis et al., 1997)

El plomo tiene un comportamiento ácido-base, ya que como se puede analizar en la figura 1 en el diagrama de Pourbaix a medida que aumenta el pH a valores superiores de 8.5 el plomo se vuelve estable en forma de hidróxido de plomo insoluble, asimismo también se puede precipitar el plomo mediante la oxidación de este aumentando el potencial al agregar un oxidante, obteniendo un producto insoluble de óxido de plomo. (Rojas et al., 2018)

Figura 1

Diagrama de Pourbaix del sistema Pb (II)

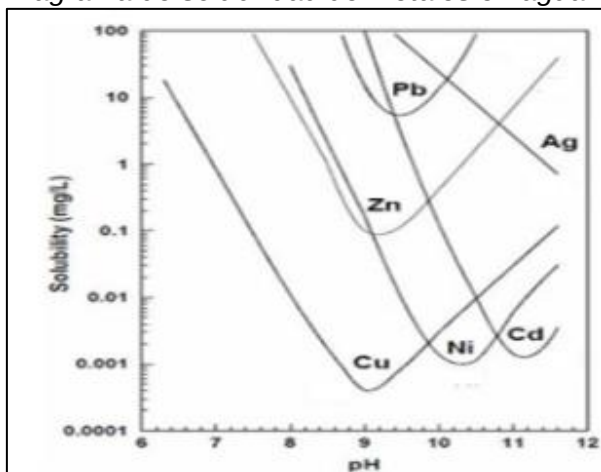


Nota: Extraído de (Rojas et al., 2018)

Asimismo, al evaluar el diagrama de solubilidad del plomo en agua en la figura 2, se puede evidenciar que para un pH alrededor de 9.5 el plomo tiene su punto máximo de insolubilidad en agua.(Ratnawati, 2020)

Figura 2

Diagrama de solubilidad de metales en agua



Nota: Extraído de (Ratnawati, 2020)

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Teoría de la coagulación y floculación

Los efluentes residuales industriales pueden contener varias impurezas, ya sea solubles e insolubles, metales y microorganismos.(Ramalho et al., 2021)

La impureza coloidal tiene una carga superficial negativa, lo que impide que las partículas se acerquen entre sí. Para eliminar estas impurezas, la carga superficial debe desestabilizarse durante el proceso de coagulación.(Aguilar et al., 2002)

La coagulación se produce normalmente al adicionar sales de hierro o sales de aluminio, este proceso se produce esencialmente por la reacción del coagulante con el agua formando en esta etapa especies hidrolizadas de carga positiva, posteriormente estas especies hidrolizadas hacen contacto con las impurezas presentes en el efluente industrial, este proceso suele ser muy rápido normalmente dura aproximadamente 100 segundos, de

acuerdo con las caracterización que presenta el agua como: pH, temperatura, cantidad de impurezas, la etapa de coagulación es muy rápida generada dentro del coagulador. (Marín, 2012)

Posterior a esta etapa el efluente con las cargas desestabilizadas pasará a un floculador, siendo esta etapa muy lenta, aquí las partículas chocaran entre sí, uniéndose y constituyendo partículas de gran tamaño llamados flóculos, los flóculos pueden ser removidos con mayor facilidad mediante un proceso de sedimentación y/o filtración. (Barrenechea, 2004)

2.2.2 Coagulación

Mecanismos de coagulación. Como se ven las partículas presentes en el agua residual presentan cargas negativas, por ello hay una repulsión entre las mismas, por tanto, la purificación del agua requiere la adición de sales de hierro o aluminio para destruir la estabilidad de esta fuerza iónica. (Sela, 2022)

Actualmente se considera cuatro mecanismos que explican el proceso de coagulación

- Compresión de la capa difusa
- Adsorción y neutralización de la carga
- Captación o captura de un hidróxido metálico por barrido.
- Adsorción y formación del puente interparticular

Compresión de la capa difusa. Este modelo físico detalla la desestabilización de la partícula coloidal al adicionar un coagulante. Este fenómeno de desestabilización se debe a que la curva de atracción de Van der Waals es fija, entretanto que la curva de repulsión se reduce cuando aumenta el número de iones con carga opuesta, por ello, si se

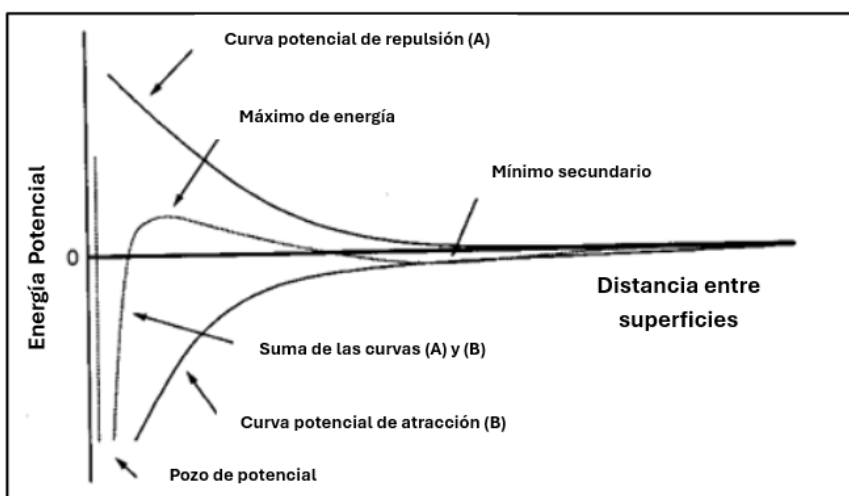
reduce la interacción resultante, las partículas pueden acercarse lo suficiente como para volverse inestables debido a las fuerzas de Van der Waals, así como se observa en la figura 3.(Cárdenas, 2000)

Según Schulze -Hardy se ha demostrado que la inestabilidad de carga causada por electrolitos neutros (electrolitos que no reaccionan con el agua) se debe a reacciones electrostáticas de atracción y repulsión de carga. (Adamson & Gast, 1997)

Los electrolitos comunes de la desestabilización de un coloide de carga negativa son Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} . Cabe destacar que esta teoría tiene sus limitaciones ya que si bien es cierto que el Na^+ y Ca^{2+} son iones indiferentes, es bien conocido que el Al^{3+} reacciona con el agua, así como también con la alcalinidad.(Morales, 2010)

Figura 3

Energía potencial de interacción entre dos coloides



Nota: Adaptado de (Tavares & Bertran, 1998)

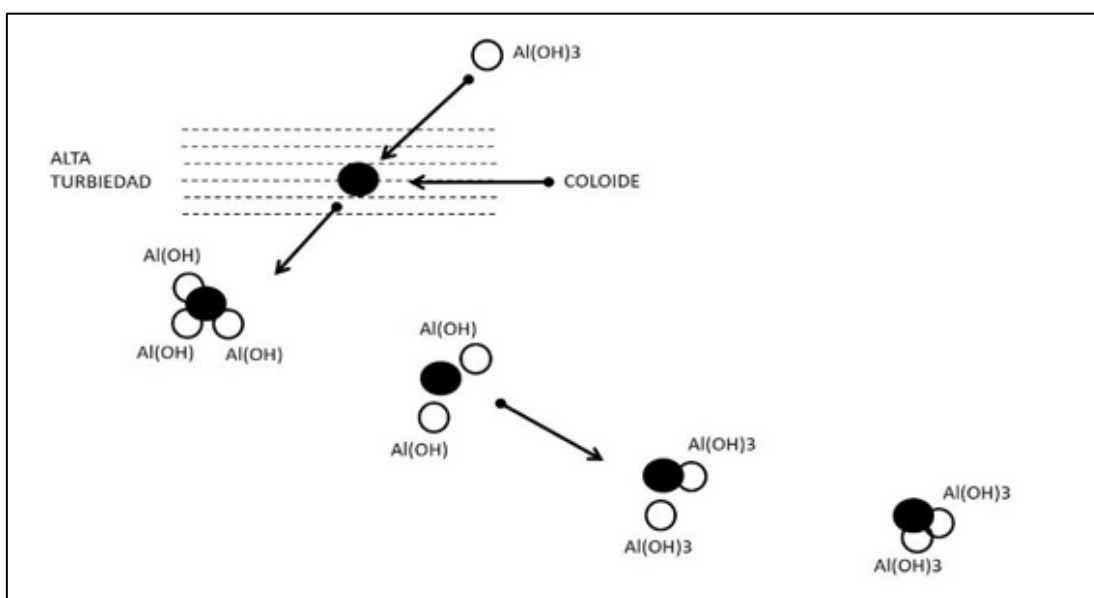
Adsorción y la neutralización de la carga superficial. Estos procesos son importantes ya que explican el mecanismo de remoción de contaminantes suspendidos o en estado coloidal, en una primera etapa se produce el fenómeno de absorción en el cual el ion del coagulante es absorbido por la superficie del contaminante, normalmente el ion del coagulante presenta una carga opuesta a las cargas superficiales de las partículas

contaminantes, es por ello que al ser absorbidas la carga superficial es neutralizada, así como se observa en la figura 4. (Cárdenas, 2000)

Este mecanismo explica como el ion el Aluminio o férrico, son importantes en el proceso de coagulación ya que una vez disueltos forman iones Al^{3+} y Fe^{3+} , son atraídos por la superficie negativa de la partícula contaminante desestabilizando su carga. (Yaniris, 2006)

Figura 4

Coagulación por adsorción

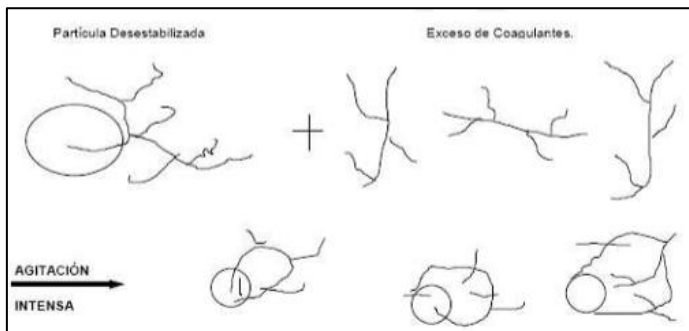


Nota: Extraído de (Valeriano et al., 2019)

El sulfato de aluminio tiene las siguientes especies hidrolizables: Al^{3+} , $Al(OH)^{2+}$, $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ y $Al(OH)_4^-$, estas superficies se adhieren al coloide y lo desestabiliza, ayudando la formación del flóculo, así como se evidencia en la figura 5. (Owodunni & Ismail, 2021)

Figura 5

Fragmentos de floc reestablecidos

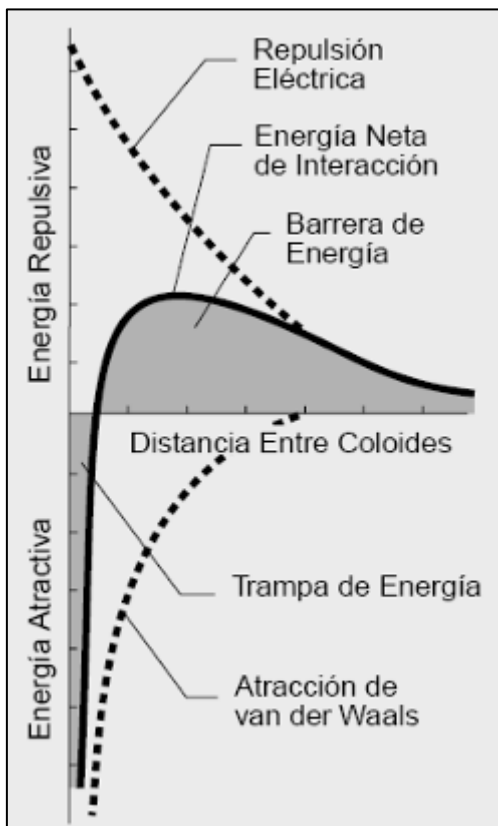


Nota: Extraído de (Barrenechea, 2004)

Si hay demasiados coloides en el agua, la distancia entre ellos es menor y por tanto la fuerza de atracción es mayor, requiriendo de este modo una menor energía para su desestabilización, en la figura 6 se observa la relación entre la energía de desestabilización la distancia entre los coloides. (Restrepo, 2009)

Figura 6

Potencial en la coagulación por adsorción



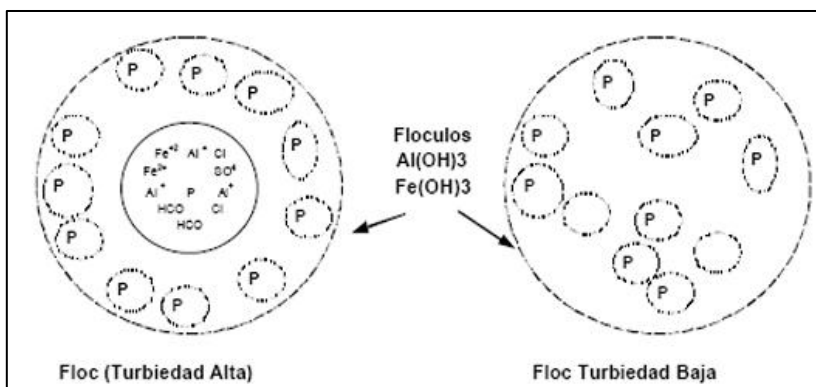
Nota: Extraído de (Restrepo, 2009)

Captura de un precipitado de hidróxido metálico o captura por barrido. La precipitación rápida de hidróxidos de aluminio y hierro ocurre cuando la concentración de sales de aluminio o hierro, como sulfato de aluminio o cloruro de hierro, excede el producto de solubilidad de los respectivos hidróxidos metálicos, tiene una estructura similar a un gel, en cuyo caso las partículas coloidales están encapsuladas por precipitados, así como se evidencia en la figura 7, este mecanismo no depende de la neutralización de las cargas como el caso anterior.(Arboleda et al., 2023)

El mecanismo de barrido señalado por Stumm y O'Melia se usa ampliamente en plantas de tratamiento de agua porque los flóculos producidos son más grandes y se sedimentan mucho más rápido que la coagulación por neutralización por adsorción.(Vargas, 2004)

Figura 7

Captura de los iones metálicos

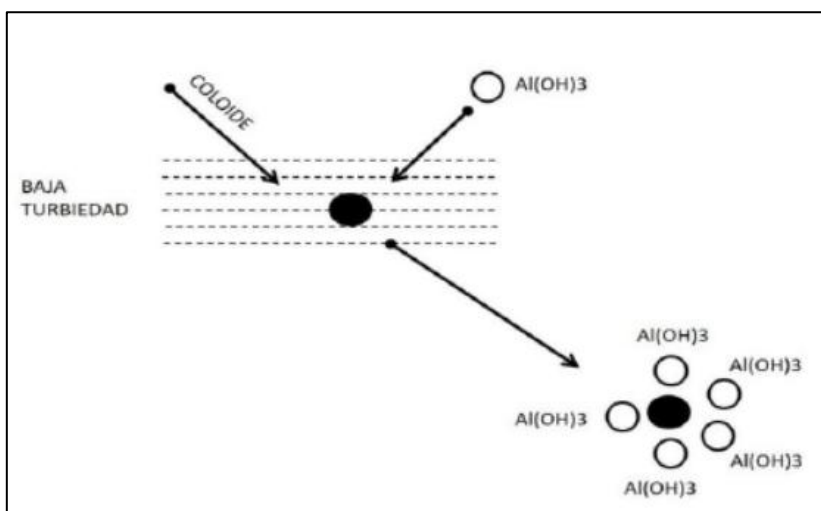


Nota: Extraído de (Vargas, 2004)

Por ejemplo, en la figura 8 se observa que a concentraciones elevadas de aluminio se formará el precipitado gelatinoso de hidróxido de aluminio, arrastrando las partículas coloidales en suspensión.(Valeriano et al., 2019)

Figura 8

Coagulación por barrido



Nota: Extraído de (Valeriano et al., 2019)

Este método de coagulación es aplicable cuando el agua a tratar presenta baja cantidad de compuestos coloidales y estos puedan ser atrapados por los hidróxidos generados.

Adsorción y formación del puente interparticular. La coagulación también puede elaborarse mediante la aplicación de compuestos orgánicos que poseen grandes cadenas moleculares, también tienen la característica de formar sitios ionizables a lo largo de la cadena polimérica donde pueden actuar como coagulantes. (Sela, 2022)

Se ha evidenciado que los polímeros de cargas positivas atraen coloides negativos a lo largo de su cadena, este fenómeno puede explicarse por los mecanismos de neutralización de cargas. Por ello se desarrolló el Mecanismo del puente interparticular el cual explica este fenómeno. (Barrenechea, 2004)

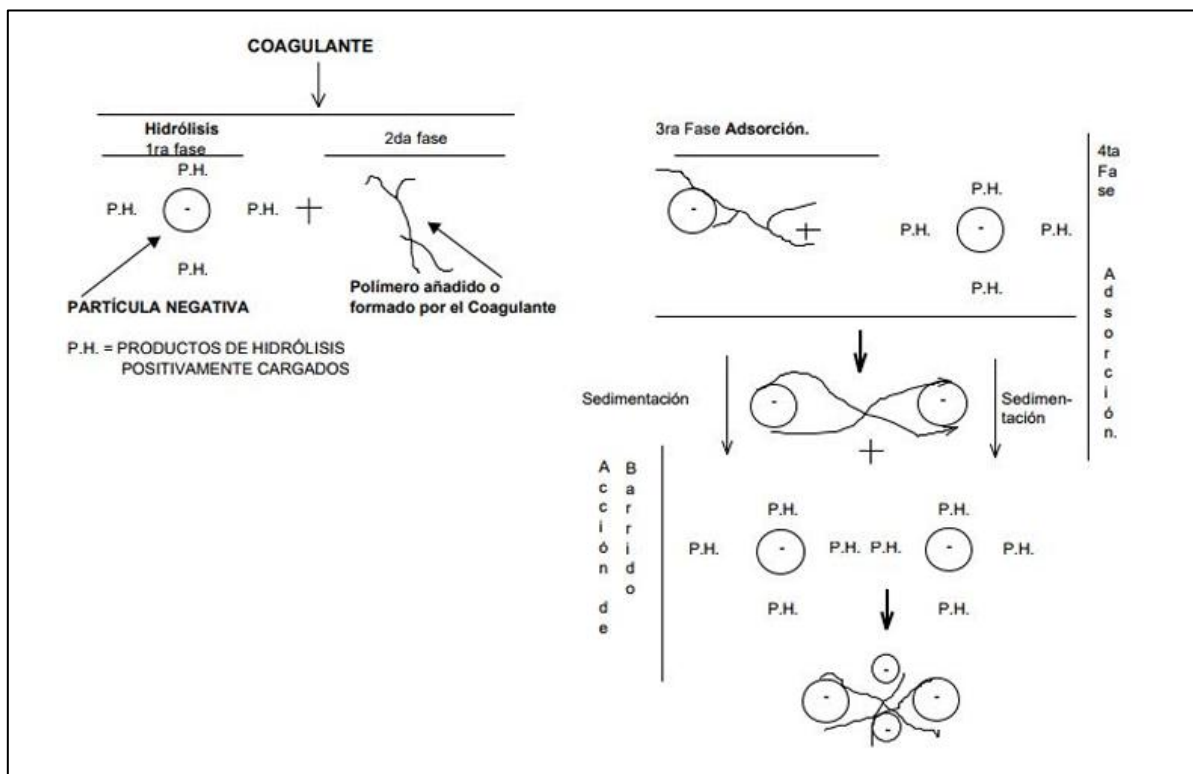
Cinética o etapas de la coagulación. Teniendo en cuenta los mecanismos antes mencionados, durante el proceso de curado se determinan las siguientes acciones. (Quintero, 2018)

- Hidrólisis de los iones metálicos polivalentes y su posterior polimerización para la obtención de especies hidrolíticas multinucleadas.
- Adsorción de sustancias hidrolíticas en la interfaz de la solución para obtener la desestabilización coloidal.
- acumulación de las partículas inestables a través de puentes.
- Aglomeración de las partículas inestables mediante el transporte de estas y las fuerzas de Van der Waals.
- Formación de los flóculos.
- Precipitación del hidróxido metálico.

En la figura 9 se observan algunas de las etapas antes mencionadas, estas pueden ocurrir de la forma secuencial según se ha planteado, pero también pueden ocurrir simultáneamente. (Huilcarema & Quizhpi, 2016)

Figura 9

Modelo del proceso de coagulación



Nota: Extraído de (Quintero, 2018)

Variables importantes en la coagulación. Los siguientes factores son los más importantes a tener en cuenta durante el proceso de coagulación:

Potencial de hidrógeno (pH). Este parámetro de control es uno de los más primordiales en los procesos de coagulación, debido a que el pH del agua residual está directamente relacionado con la dosis de coagulante, es por ello la importancia de encontrar mediante pruebas experimentales el pH óptimo con el cual el coagulante tenga una mayor eficiencia de remoción y menos consumo de este. (Naceradska et al., 2019)

Turbiedad. Este parámetro es un indirecto que sirve para calcular las concentraciones de las partículas suspendidas en un líquido, este parámetro está en relación con el número y tamaño de las partículas. (Marcó et al., 2004)

Sales disueltas. La presencia de sales disueltas en aguas residuales industriales tiene un efecto negativo sobre la coagulación y floculación, ya que cambian el rango óptimo de pH, es decir, tiempo necesario para la floculación, y también varían las cantidades de coagulantes requeridos, asimismo modifica las cantidades residuales de los coagulantes dentro del efluente. (Younker & Walsh, 2014)

Temperatura del agua. Los cambios en la temperatura de las aguas residuales industriales pueden provocar cambios en la densidad del líquido, produciendo corrientes internas que afectan a la sedimentación de floc, haciendo que el proceso de coagulación sea más lento, sin embargo, hay evidencia que al aumentar el tiempo de sedimentación mejora significativamente la eficiencia de remoción de los contaminantes. (Guan et al., 2001)

Dosis de coagulante utilizado. Se debe utilizar una dosis óptima de coagulante, ya que las partículas no se neutralizan completamente añadiendo una pequeña cantidad, caso contrario al adicionar más coagulante de lo necesario se puede producir una inversión de cargas. (Recasens, 2018)

Influencia de mezcla. La agitación es importante en la etapa de coagulación y puede ser determinante al calcular las eficiencias de los procesos, ya que de este depende la uniformidad de la distribución del coagulante en el efluente industrial, además una mezcla apropiada promueve la formación de flóculos de gran volumen y densidad, lo que facilitaría en un posterior proceso de separación.(Yukselen et al., 2006)

2.2.3 Floculación

El propósito fundamental de la floculación es la recolección de todas las cargas desestabilizadas así de este modo formar un aglomerado de mayor peso, permitiendo la sedimentación por gravedad.

Mecanismo del proceso de floculación. La floculación es el resultado del proceso generado por la colisión de partículas, que implica básicamente los siguientes mecanismos de transporte.

- Floculación Ortocinética, es inducida en el fluido por medio de una fuerza externa. (Weber, 2021)
- Floculación pericínética, es generada en el líquido en agitación por medio de un movimiento browniano.
- Sedimentación diferencial, es originado durante las sedimentaciones de las partículas más pesadas y grandes, estas colisionan con las partículas más livianas formando de esta forma una aglomeración.(Rodríguez, 2024)

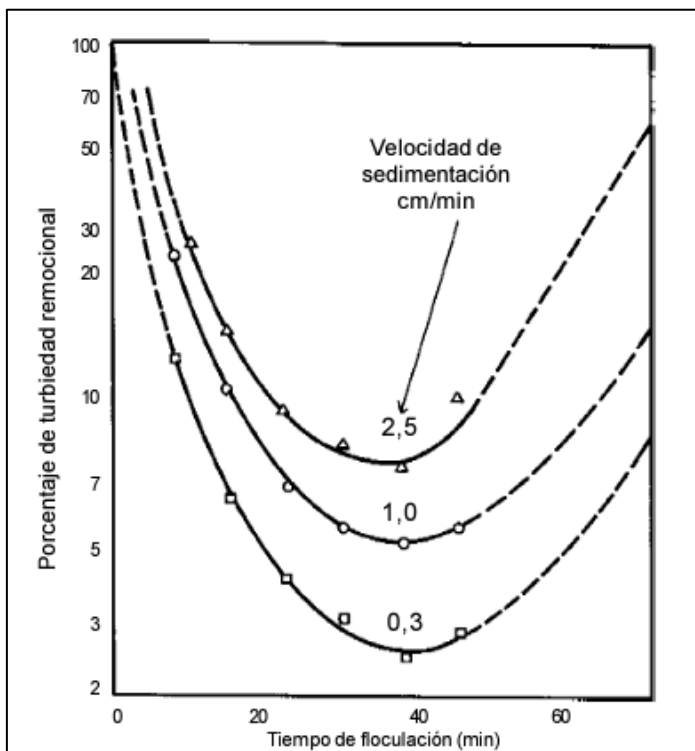
Parámetros de la floculación. Los parámetros principales de control durante la etapa de floculación son:

- **Tiempo de retención.** Este es el tiempo que el agua permanece en la unidad de floculación, es conocido que el tiempo de floculación guarda una relación directa

con la velocidad de aglomeración de los flocs, según las referencias bibliográficas en la figura 10 el tiempo óptimo para la floculación es de 20 min a 40 min. (Ramalho et al., 2021)

Figura 10

Efecto del tiempo de floculación en la sedimentación



Nota: Extraído de (Barrenechea, 2004)

- **Tamaño del floc.**

- **Volumen de lodos.** En la unidad de floculación no debe producirse sedimentación de los flóculos formados. (Villegas & Letterman, 1976)

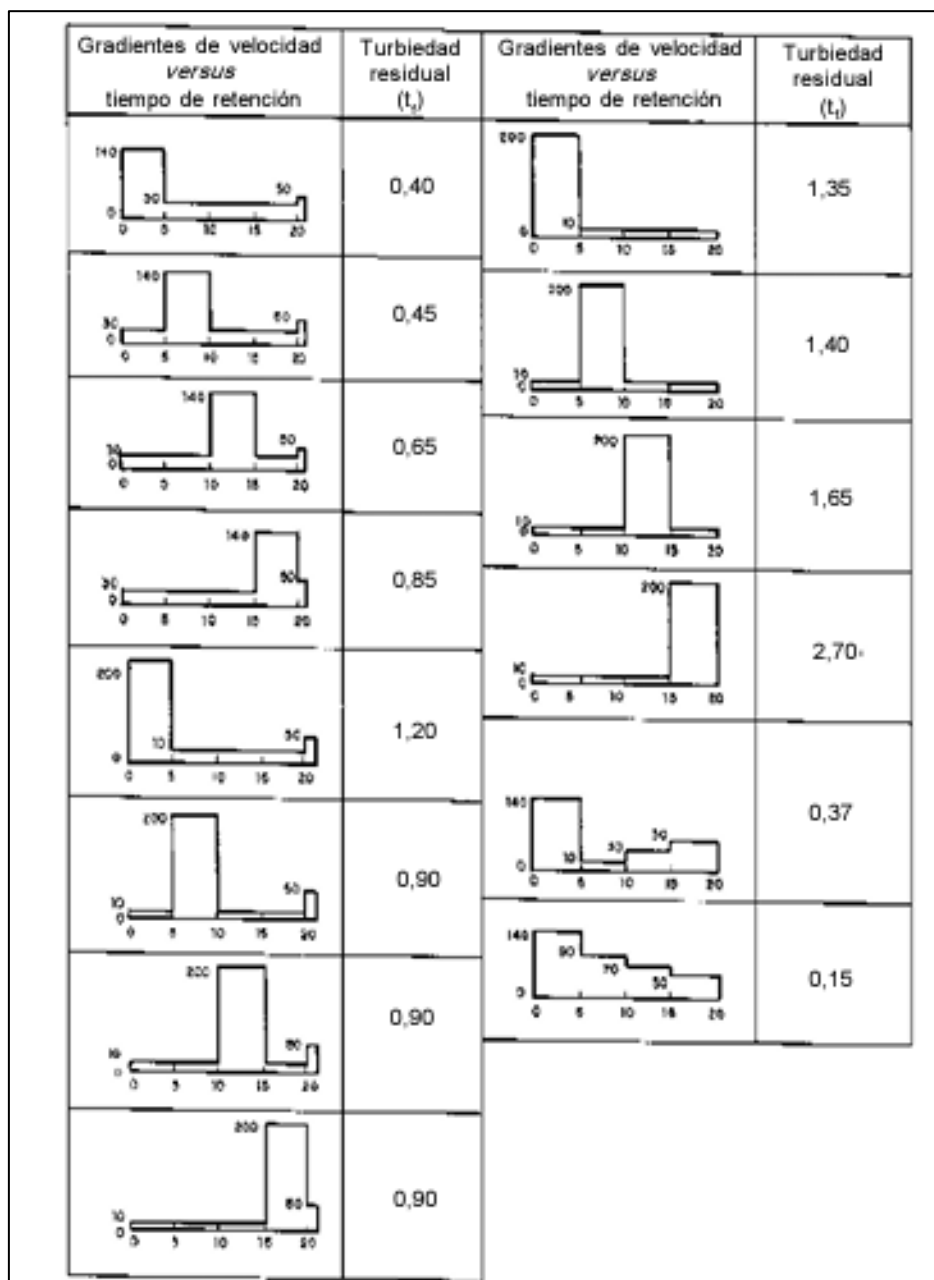
- **Naturaleza del agua.** Los procesos de floculación son muy sensibles a las características físicas y químicas del agua, como la alcalinidad, la turbiedad y el pH.

La concentración de las partículas que producen la turbiedad en el agua tiene una notable influencia sobre la floculación, ya que según la ecuación de Harris, Kaufman y Krone la velocidad de floculación tiene una vinculación directa con el tamaño inicial de la partícula. (Restrepo, 2009)

- **Gradiente de Velocidad.** La velocidad de agitación es uno de los componentes más esenciales para un proceso de floculación adecuado, ya que si la velocidad de agitación es demasiado alta esta puede ocasionar que rompan las partículas conglomeradas ya formadas, un estudio de Tekippe y Ham demuestran la relación de las variaciones de la gradiente de velocidad y la turbidez residual, la cual se observa en la figura 11. (TeKippe & Ham, 1971)

Figura 11

Efecto de la variación de la velocidad de agitación y la turbidez



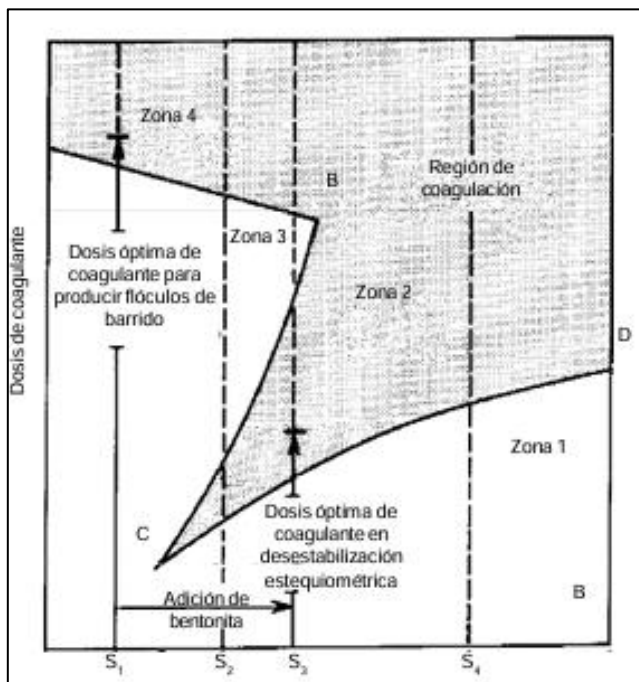
Nota: Extraído de (TeKippe & Ham, 1971)

Factores de control del proceso de coagulación y Floculación. Los más esenciales de los procesos de coagulación y floculación son los siguientes:

Dosis Óptima. Es un factor muy importante en el proceso de coagulación, como se observa en la figura 12, según las curvas de coagulación a un pH constante el diagrama se divide en cuatro zonas, a medida que aumenta la concentración de los coloides (S1-S4) en el agua residual, se requieren diferentes dosis de coagulante para que el proceso se ubique dentro de la región sombreada donde el coloide precipita. (Mojica et al., 2023)

Figura 12

Concentración del coloide, expresada como concentración de superficie

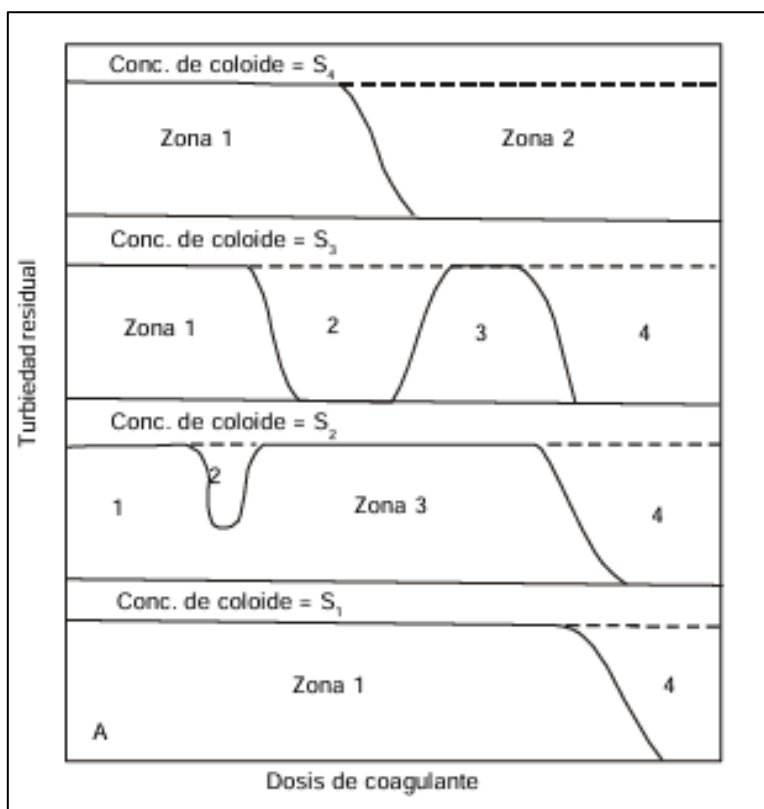


Nota: Extraído de (Barrenechea, 2004)

Asimismo, en la figura 13 se puede observar que la relación entre el coagulante con las cantidades de partículas coloidales presentes en el agua no es proporcional, ya que para un nivel S1 se necesita mayores cantidades de coagulantes que a comparación en los niveles S2 y S3, es por ello fundamental definir mediante ensayos de laboratorio la dosificación óptima para obtener la mayor eficiencia en los procesos de coagulación. (Barrenechea, 2004)

Figura 13

Diagrama de remoción



Nota: Extraído de (Barrenechea, 2004)

- **pH óptimo.** El pH es un componente muy fundamental durante los procesos de coagulación, como regla general para efluentes industriales que presentan bajo color el pH recomendado es de 4 a 6, mientras para efluentes con mayor turbiedad se recomiendan valores de 6.5 a 8.5 unidades de pH. (Sela, 2022)

2.2.4 Reactivos empleados para el proceso coagulación – floculación

Hay una variedad de sustancias química que pueden ser empleados para la coagulación y floculación.

Modificadores de pH. Es necesario la regulación del pH para obtener resultados óptimos en el proceso de coagulación, para ello se pueden usar diferentes tipos de modificadores de pH como los siguientes:

- Óxido de calcio o cal viva
- Carbonato de sodio
- Hidróxido de sodio
- Hidróxido de calcio

Óxido de calcio o cal viva. Se usa para incrementar la alcalinidad del agua, el hidróxido de calcio se obtiene apagando el óxido de calcio con agua, su rango de concentración es del 82.0% al 99.0%. Es poco soluble en agua y su solubilidad disminuye a medida que aumenta la temperatura del sistema.(Burns, 2003)

Carbonato de sodio. Se emplea para aumentar la alcalinidad del agua, su apariencia es un polvo blanco anhidro, la solubilidad del carbonato de sodio es muy baja, alrededor de 100 g/L a 20°C.(Douglas et al., 1994)

Hidróxido de sodio. Se emplea en el tratamiento de agua para aumentar el pH de un efluente, este base mediante la formación de hidróxidos insolubles disminuye la cantidad de metales presentes en el efluente como el plomo, cobre y otros metales tóxicos(Lozada et al., 2008)

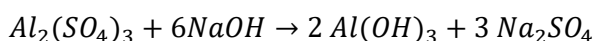
Hidróxido de calcio. El Hidróxido de calcio en solución es muy alcalino posee un pH alrededor de 12 lo cual ayuda a aumentar la basicidad de un efluente, además este compuesto es de bajo costo, además el hidróxido de calcio se comporta como coagulante trabajando en un rango de pH de 9-11, precipitando metales pesados como el arsénico, cadmio, Zinc entre otros.(Pinheiro et al., 2005)

Coagulantes. Los tipos de coagulantes se clasifican como coagulantes de modificación de pH y colaboradores de coagulación.

Los compuestos más utilizados en la industria del tratamiento de agua son: sulfato de aluminio, cloruro férrico, sulfato ferroso y clorosulfato ferroso.

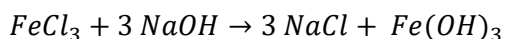
Sulfato de aluminio. La presentación del sulfato férrico puede estar presente en forma líquida o sólida, en su forma sólida su concentración es expresada en forma de alúmina Al_2O_3 , es decir aproximadamente el 17 %, mientras que en su forma líquida su concentración oscila entre 8.0 a 8.5 %. El sulfato de aluminio es una sal formada por la reacción entre hidróxido de aluminio (una base débil) y ácido sulfúrico (un ácido fuerte), por lo que su solución acuosa es ácida con un valor de PH entre 2.0 y 3.8 (Aguilar et al., 2002)

Reacción del sulfato de aluminio con el hidróxido de sodio:



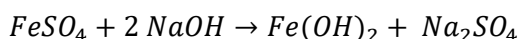
Cloruro férrico. La presentación de cloruro férrico puede estar presente en forma líquida o sólida, en la industria de tratamientos de aguas esta última es la más utilizada, siendo la presentación habitual entre 39 % a 45 % de $FeCl_3$. El cloruro férrico en presencia del hierro se reduce a cloruro ferroso $FeCl_2$, estas reacciones explican su gran poder corrosivo frente a su almacenamiento en tanques de acero, es por ello la importancia de seleccionar adecuadamente tanques para su almacenamiento.(Zerbatto et al., 2009)

Reacción del cloruro férrico con el hidróxido de sodio:



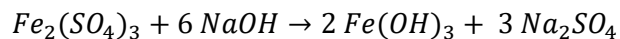
Sulfato ferroso. El sulfato ferroso para el uso de tratamiento de aguas es un polvo de color verde y tiene una alta solubilidad con el agua. El sulfato férrico en solución acuosa es de naturaleza ácida, por esta razón es aconsejable que su almacenamiento sea en materiales de plásticos.(Toapanta et al., 2021)

Reacción del Sulfato ferroso con el hidróxido de sodio:



Sulfato férrico. El sulfato férrico para el uso de tratamiento de aguas es un polvo de color blanco verdoso y presenta una alta solubilidad en el agua. El sulfato férrico en soluciones acuosas se hidroliza formando ácido sulfúrico e hidróxido férrico.(Rigola, 1989)

Reacción del Sulfato férrico con el hidróxido de sodio:



Floculantes. Los floculantes son coadyuvantes de la coagulación, pueden ser aniones, cationes o polímeros neutros utilizados para la purificación del agua, generalmente en forma de polvo o líquido, estas sustancias tienen un alto peso molecular y pueden ser de origen natural o sintético.(Cerna et al., 2023)

- **Polímeros no iónicos.** Policrilamida, Óxido de polietileno.
- **Polímeros aniónicos.** Poliacrilamida hidrolizada, sulfonato de poliestireno, Ácido poliacrílico.
- **Polímeros catiónicos.** Cat-floc (polidialildimetilamonio), Imina de polietileno.

2.2.5 Agitación y mezcla

Agitación. Es una operación unitaria que se encuentra en la mayoría de los procesos industriales y es aplicable a sistemas líquidos, sólidos y gaseosos, el proceso de agitación favorece a una óptima mezcla de reactivos mediante movimientos violentos e irregulares dentro del fluido, cuando se une más de una sustancia, el proceso se llama mezcla. (D. García & Jáuregui, 2006)

Cuando se agita un fluido normalmente sigue un patrón circular el cual se encuentra contenido dentro de un recipiente. (McCabe et al., 2007)

A menudo el objetivo del proceso de agitación es múltiple, por ello la agitación suele dividirse usualmente en 5 tipos:

- **Homogenización.** Se refiere al objetivo de equilibrar las concentraciones o la temperatura de dos o más líquidos inmiscibles.(Bailey, 1984)
- **Intensificación de la transferencia de calor.** entre los líquidos y las superficies que transfiere el calor.(D. García, 2004)
- **Suspensión.** este proceso se refiere a la mezcla de partículas sólidas dispersas en un líquido, puede que cierta porción de la parte sólida se disuelva en la fase líquida. (Rosales et al., 2024)
- **Dispersión de un gas.** este proceso se refiere a la dispersión de un gas en un líquido, este proceso es empleado en aplicaciones como tratamientos de aguas, fermentación y oxidación.(McCabe et al., 2007)
- **Emulsificación.** este se refiere cuando dos líquidos inmiscibles se mezclan y uno de los líquidos está disperso en pequeñas gotas dentro del otro líquido.(Forgiarini et al., 2009)

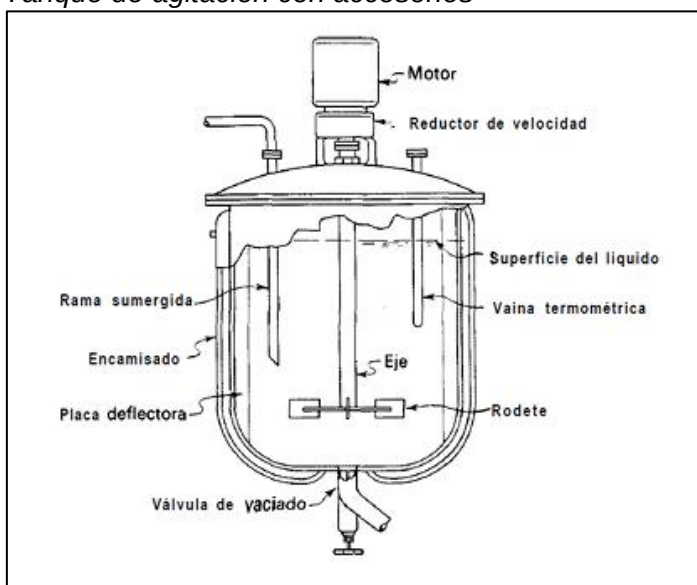
Mezcla. Es un proceso en el cual se combinan dos o más fases inicialmente separadas. El concepto de mezcla, o mezclado, se aplica a una gran variedad de operaciones que difieren ampliamente en el grado de homogeneidad del material. (Miranda, 2013)

2.2.6 Tanque de agitación

Los líquidos se agitan con gran frecuencia en tanques cilíndricos, así como se observa en la figura 14, además cuenta con un sistema externo llamado motor transfiere energía mecánica, la cual es transferida de forma directa mediante un eje vertical conectado a un impulsor en la parte inferior, el cual dependiendo del tipo impulsor generará flujos axiales, radiales o tangenciales.(McCabe et al., 2007)

Figura 14

Tanque de agitación con accesorios



Nota: Fuente (McCabe et al., 2007)

2.2.7 Componentes del tanque de agitación

El sistema de agitación en un tanque cilíndrico consta de diferentes componentes los cuales son:

- **Recipiente de agitación:** Normalmente son tanques de forma cilíndrica, con un fondo redondeado para eliminar las esquinas y permitir que las corrientes del fluido se mezclen homogéneamente en todo el recipiente.(Hernández, 2016)
- **Motor:** dispositivo mecánico que transfiere la energía necesaria a los líquidos para mezclarlos.(M. García et al., 2020)
- **Reductor:** El reductor reduce la velocidad de rotación del motor esto se logra a través de engranajes o poleas, también se puede reemplazar su uso empleando un variador de frecuencia conectado directamente al motor.(Neyra et al., 2013)
- **Eje vertical:** El eje transmite la energía mecánica del motor al impulsor.(Paul et al., 2004)

- **Impulsor:** Normalmente está instalado en la parte inferior del eje vertical, consta, existen diferentes tipos de impulsores que se pueden emplear dependiendo del tipo de fluido a mezclar. (Chambergó et al., 2017)
- **Deflectores:** Son barras ubicadas dentro del tanque, estas se emplean para prevenir la formación de vórtices, así mismo pueden tener diferentes configuraciones dentro del tanque.(McCabe et al., 2007)

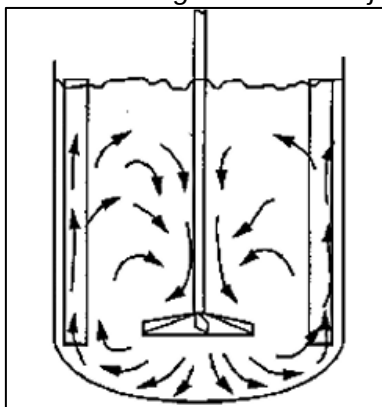
2.2.8 Patrones de flujo

Existen e tipos de patrones que puede tener un sistema de agitación, estos pueden ser flujo radial, axial o tangencial.

Flujo Axial. También es conocido como flujo longitudinal, los impulsores más representativos son los de palas inclinadas las cuales sus paletas tienen un ángulo de inclinación menor a 90° (Díaz, 2017). En la figura 15, se observa que el flujo sale de las palas y por recirculación retorna a las palas, creando un campo de ida y vuelta paralela al eje de giro, este proceso es más eficiente que el flujo radial. (Castillo, 2013)

Figura 15

Sistema de agitación con flujo axial

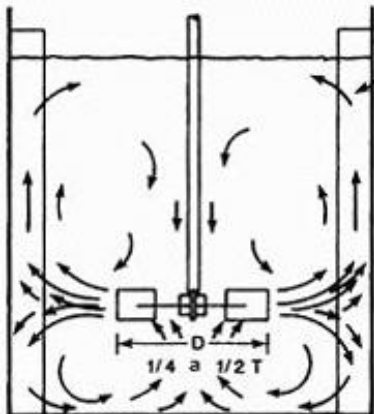


Nota: Fuente (Holguín, 2021)

Flujo radial. Los impulsores más representativos son los de palas planas, las corrientes del fluido se dirigen del impulsor hacia la pared del tanque, luego al impactar se divide hacia arriba y abajo del tanque, así como se observa en la figura 16.(Díaz, 2017)

Figura 16

Sistema de agitación con flujo radial

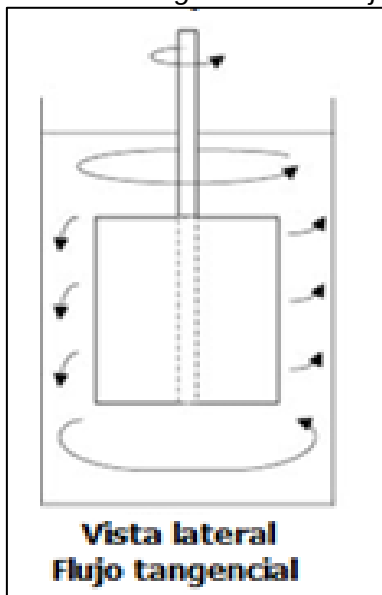


Nota: Fuente (Cortés & Haza, 2005)

Flujo tangencial. También es conocido como flujo rotacional, actúa en la dirección tangencial a la trayectoria como se observa en la figura 17, este tipo de flujo crea habitualmente un vórtice por tal motivo perjudica al mezclado. (Bagué & Álvarez, 2012)

Figura 17

Sistema de agitación con flujo tangencial



Nota: Fuente (Díaz, 2017)

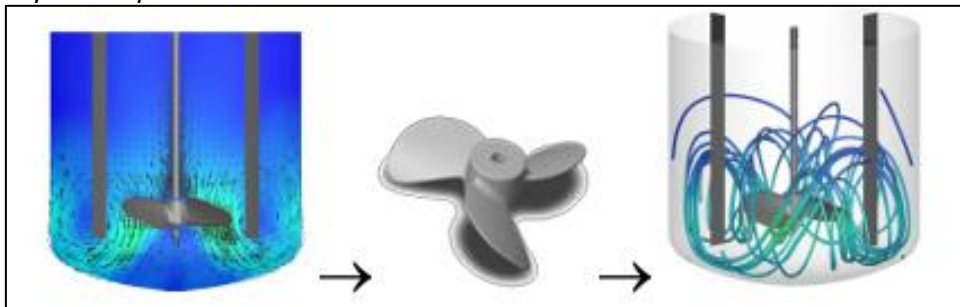
2.2.9 Tipos de Impulsor

Los impulsores pueden ser de forma hélices, palas o turbinas.

Hélice. Los impulsores tipo hélice genera flujos axiales, normalmente este tipo de impulsor es empleado cuando se requiere altas velocidades de agitación, la columna axial que crea es muy turbulenta y arrastra consigo líquido estancado. Este tipo de impulsor es útil en sistemas donde los sólidos se depositan en el fondo del tanque.(McCabe et al., 2007)

Figura 18

Impulsor tipo hélice



Nota: fuente(Uribe et al., 2012)

Palas o paletas. Este tipo de impulsor posee paletas planas unidas al eje, los cuales impulsan al fluido de forma tangencial y radial, giran a velocidades relativamente bajas entre 20 a 250 rpm, son muy útiles cuando se requiere una mezcla muy suave.(Uribe et al., 2012)

Figura 19

Impulsor tipo pala

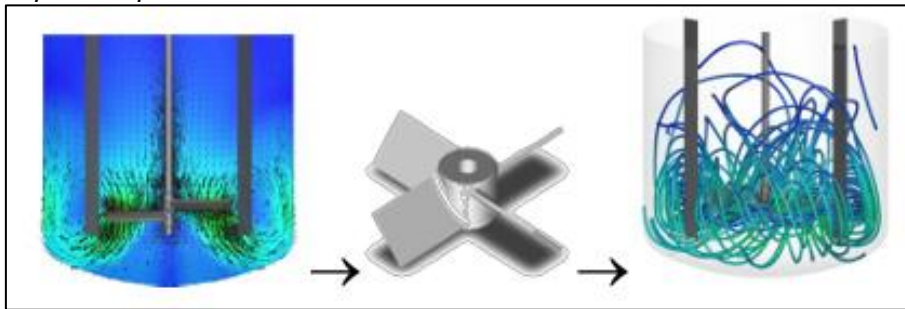


Nota: fuente (Uribe et al., 2012)

Turbinas. Están diseñados por un disco unido al eje vertical y palas que pueden ser rectas, inclinadas o curvas, dependiendo del tipo de paletas que se emplean pueden generar flujo radial, axial o tangencial. (McCabe et al., 2007) Este tipo de impulsor son muy útiles cuando se mezclan líquidos de baja viscosidad. Este tipo de impulsor produce una mayor turbulencia cerca al disco.(Uribe et al., 2012)

Figura 20

Impulsor tipo turbina



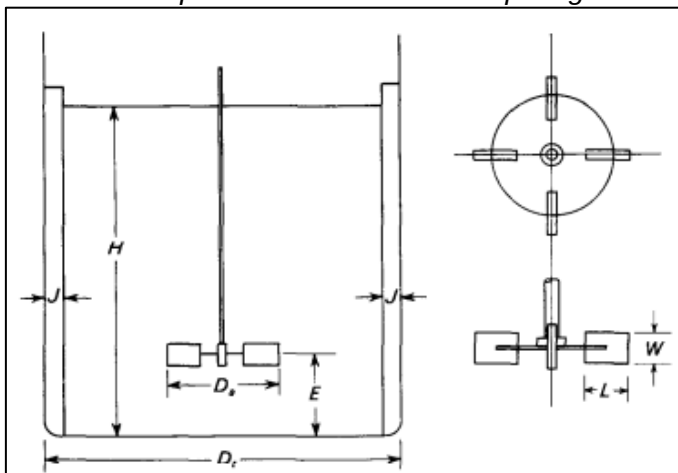
Nota: Fuente (Uribe et al., 2012)

2.2.10 Diseño de un tanque de agitación

Al diseñar un tanque de agitación de líquidos, su dimensionamiento y disposición del impulsor y deflectores son definidos por un rango básico de diseño como se evidencia en la figura 21. (Couper et al., 2010).

Figura 21

Dimensiones para el diseño de un tanque agitado



Nota: Fuente (McCabe et al., 2007)

El diseño de un tanque de agitación queda definido con las siguientes relaciones geométricas, en la tabla 4 se detallan dichas proporciones típicas:

Tabla 4

Medidas para el dimensionamiento de un tanque con agitación
Relaciones geométricas

$\frac{D_a}{D_T} = \frac{1}{3}$	$\frac{E}{D_a} = 1$
$\frac{H}{D_T} = 1$	$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$
$\frac{J}{D_T} = \frac{1}{12}$	$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$

Nota: Adaptado de (McCabe et al., 2007)

2.2.11 Diseño compuesto centrado

El diseño compuesto centrado es un diseño experimental el cual combina el diseño factorial con puntos axiales y los puntos centrales para calcular los efectos de las variables independientes en las respuestas.(Yaguas, 2017)

El diseño experimental compuesto centrado (DCC), consta de un sistema factorial 2^k en el centro, $2k$ corridas axiales y corridas replicadas en el centro n_c , quedando definido el número de corridas mediante la ecuación (1). (Montgomery, 2012)

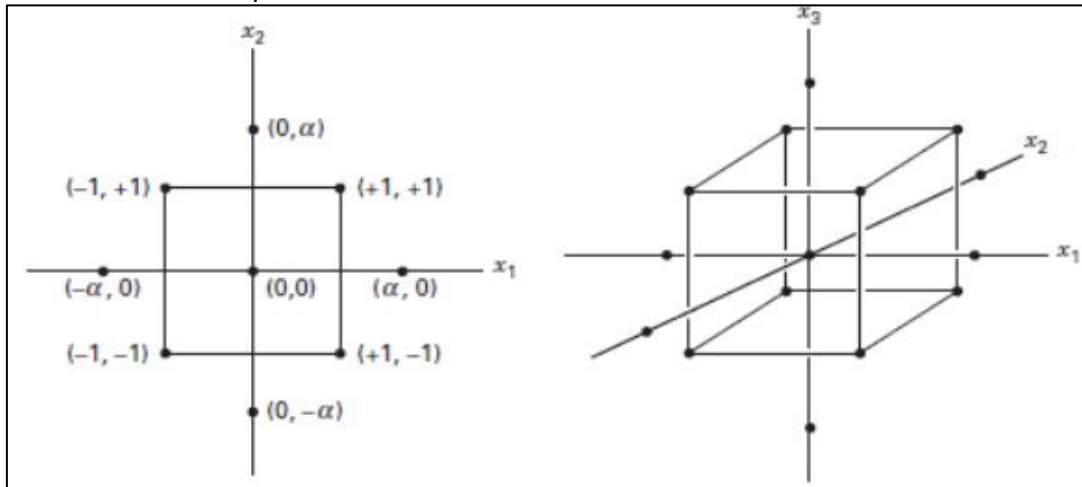
$$n_{rep} = 2^k + 2k + n_c \quad (1)$$

Al establecer el diseño DCC se requiere especificar dos parámetros: la distancia α de las corridas axiales y el número de puntos centrales.

En un diseño compuesto centrado se establen 5 niveles por factor, considerando la parte factorial, puntos centrales y axiales $(-\alpha, -1, 0, 1, + \alpha)$, en la figura 22 del diseño DCC.(De Zan et al., 2016)

Figura 22

Diseño central compuesto circunscrito.

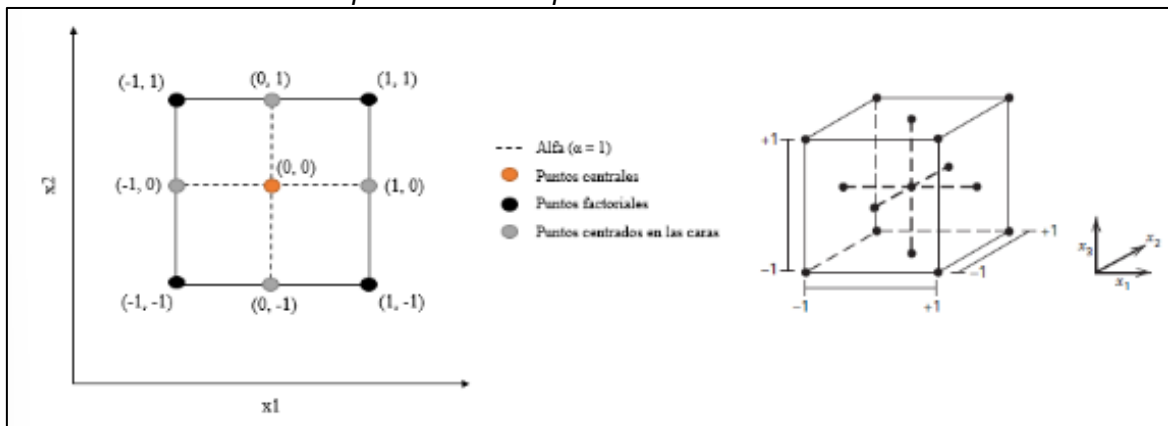


Nota: Fuente (Martínez, 2019)

El valor α es determinante para establecer los puntos axiales, estableciendo un valor $\alpha=1$ se asegura que estos puntos estén en las caras del cubo, a lo que se denomina un DCC centrado en las caras como se puede observar en la figura 23 (Montgomery, 2012).

Figura 23

Estructura de un diseño experimental compuesto centrado



Nota: Fuente (Martínez, 2019)

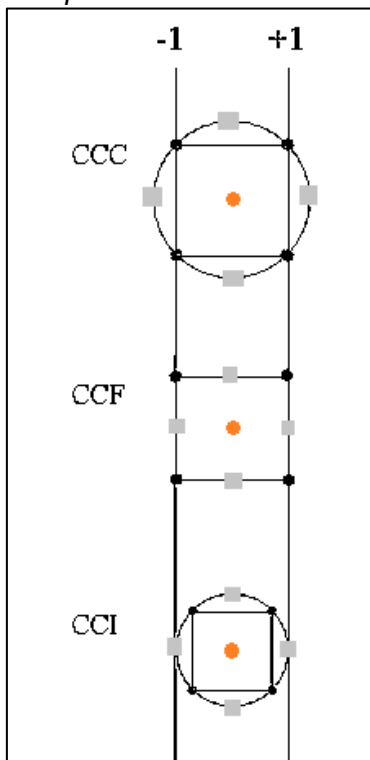
En el caso de emplear una posición menor a 1 para la parte factorial, se obtiene una versión inscrita del modelo, de este modo los límites inferior y superior están definidos por los puntos axiales $+1$ y -1 , mientras que la parte factorial se sitúa en las aristas del cubo con los valores $+1/\alpha$ y $-1/\alpha$, para este diseño inscrito se tiene que incluyendo el punto central

se obtendrán 5 niveles por cada factor establecidos de la forma $(-1, -1/\alpha, 0, +1/\alpha, +1)$. (Martínez, 2019)

En la figura 24, se puede observar la diferencia entre los modelos del diseño central compuesto circunscrito (CCC), diseño central compuesto centrado en las caras (CCF) y el diseño central compuesto centrado inscrito (CCI).

Figura 24

Comparación entre las variantes del diseño compuesto central al emplear diferentes alfa



Nota: Fuente (Martínez, 2019)

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Diseño de la investigación

3.1.1 Caracterización del agua residual

El agua residual industrial fue recolectada del laboratorio Alex Stewart International del Perú S.R.L, el cual está dedicada al rubro de análisis químico de muestras mineralógicas y concentrados, recolectando un volumen aproximado de 50 Litros para poder realizar cada una de las réplicas de coagulación-Floculación. Previamente al desarrollo de las pruebas experimentales se realizó la caracterización fisicoquímica del agua residual.

3.1.2 Diseño de las pruebas de coagulación y floculación

Se realizó el diseño de las pruebas de coagulación empleando un diseño compuesto central inscrito, con un valor de alfa igual a 2, se emplearon como variables independientes la dosis de coagulante, dosis de floculante, velocidad rápida (coagulación) y la velocidad lenta (floculación), especificado en la tabla 5.

Tabla 5

Niveles de las variables independientes

Variable independiente	Unidad	Nivel			Nivel	
		Nivel bajo	Intermedio bajo	Punto central	Intermedio alto	Nivel alto
Coagulante	ppm	10	55	100	145	190
Floculante	ppm	2	4	6	8	10
Velocidad rápida	rpm	150	175	200	225	250
Velocidad Lenta	rpm	40	50	60	70	80

En base a las variables indicadas en la tabla 5, se construyó el diseño experimental para las 35 pruebas de coagulación y floculación a nivel laboratorio, las cuales están detalladas en la tabla 6.

Tabla 6*Parámetros de la prueba de coagulación y floculación.*

Nº de corridas	Coagulante (ppm)	floculante (ppm)	Velocidad rápida (rpm)	Velocidad Lenta (rpm)
1	10	10	250	80
2	10	2	150	80
3	100	6	200	50
4	100	8	200	60
5	190	2	250	80
6	55	6	200	60
7	190	10	150	80
8	100	6	175	60
9	100	6	225	60
10	55	6	200	60
11	190	10	250	80
12	145	6	200	60
13	100	6	200	60
14	100	8	200	60
15	100	4	200	60
16	190	10	250	40
17	100	6	175	60
18	100	6	200	50
19	10	10	150	40
20	100	4	200	60
21	10	10	150	80
22	190	2	250	40
23	10	2	250	40
24	10	2	250	80
25	145	6	200	60
26	100	6	200	70
27	190	2	150	80
28	190	10	150	40
29	100	6	200	60
30	190	2	150	40
31	100	6	225	60
32	10	10	250	40
33	100	6	200	60
34	100	6	200	70
35	10	2	150	40

3.1.3 Preparación de reactivos

- **Hidróxido de Sodio -Líquido grado técnico (50 % w/w)**
- **Solución de hidróxido de sodio (1% w/w)**

Tomar una alícuota de 2 ml del hidróxido de sodio al 50% y transferir a una fiola de 100 ml, posteriormente se enrasa con agua desionizada.

- **Sulfato férrico – Líquido (45 % w/w)**
- **Solución de sulfato férrico (10 % w/w)**

Tomar una alícuota de 22.22 ml del Sulfato férrico al 45% y transferir a una fiola de 100 ml, posteriormente se enrasa con agua desionizada.

- **Polímero aniónico – Sólido**
- **Solución de polímero aniónico (0.1% w/v)**
- Pesar 0.1 gramos del polímero aniónico y diluir en 100 ml de agua desionizada.

3.1.4 Procedimiento para las pruebas experimentales

Se toma una muestra de 500 ml de los 50L muestreados, con la solución de hidróxido de sodio al 1%, empleando un gotero se realiza el aumento de pH hasta aproximadamente 9; luego se dosifica el coagulante (solución de sulfato férrico al 10%) y se agita por 2 minutos a la velocidad rápida figura 25, finalizado el tiempo se agrega el floculante (solución de polímero aniónico al 0.1% w/v) y se agita a una velocidad lenta por 5 minutos.

Culminado el tiempo de floculación la muestra tratada es transferida a un cono Imhoff y se deja sedimentar por un tiempo aproximado de 20 minutos, posteriormente se registra el volumen de lodos y se decanta una porción de agua tratada en un vaso precipitado para determinar la turbidez y pH, asimismo en un digitubo se toma una porción de 50 ml de la sección clarificada y se envía al laboratorio para la determinación de metales

por medio del equipo de espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP).

Figura 25

Sistema de agitación mecánico



3.1.5 Diseño de optimización

El diseño de optimización es desarrollado por medio del software desing expert 12 aplicando la optimización numérica, por medio de la configuración de rampas gráficas para cada variable independiente se obtiene la máxima remoción de plomo.

3.2 Diseño del tanque

3.2.1 Selección de material de construcción

Para la selección del material se revisó diferentes tipos de acero comerciales empleados para la construcción de tanques, en la tabla 7 se realizó una comparación de sus propiedades químicas, así como mecánicas, se evaluó 3 tipos de aceros, aplicando la ecuación del carbono equivalente.

Tabla 7

Composición química de los aceros

Elemento	Tipo de Acero		
	ASTM A36	AISI 304	AISI 316
C (%)	0.26	0.07	0.08
Mn (%)	----	2.00	2.00
Cr (%)	----	18.00	17.00
Mo (%)	----	----	2.50
V (%)	----	----	----
Cu (%)	0.20	----	----
Ni (%)	----	9.25	12.00
Si (%)	0.40	0.75	0.75
P (%)	0.040	0.045	0.045
S (%)	0.05	0.030	0.030

Nota: Adaptado de (Material mundial, 2024)

Al analizar la composición de química de cada acero se evaluó adicionalmente la soldabilidad, mediante el parámetro de carbono equivalente siguiendo la ecuación (2) de la norma ASM International (1994)

$$C.E. = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Cu + \%Ni}{15} \quad (2)$$

En la tabla 8 se observan los valores de carbono equivalente, de estos resultados se deduce que el acero ASTM A36, tiene una mejor factibilidad para soldar.

Tabla 8

Carbono equivalente en cada tipo de acero

Tipo de Acero	C.E. (%)
ASTM A36	0.27
AISI 304	4.62
AISI 316	5.11

Asimismo, en la tabla 9 se evaluó las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión, en la cual se observó que los 3 aceros evaluados tienen propiedades similares; considerando su resistencia a la corrosión y soldabilidad se utilizará como material el acero AISI 304.

Tabla 9

Propiedades mecánicas y su resistencia a la corrosión de los aceros

Tipo de Acero	Esfuerzo de tracción σ_t (Mpa)	Límite de elasticidad σ_f (Mpa)	Resistencia a la corrosión
ASTM A36	400-550	250	No es resistente a la corrosión en ambientes húmedos, marinos o industriales, puede presentar corrosión significativa.
AISI 304	515	205	Resistencia a la corrosión, en medios marinos e industriales agresivos, pero es corroído cuando existe la presencia del ion cloruro.
AISI 316	580	290	Alta resistencia a la corrosión, en medios marinos e industriales agresivos.

Nota: Adaptado de (Material mundial, 2024)

3.2.2 Dimensionamiento del tanque

En la tabla 10, se estableció los requerimientos para el diseño del tanque de agitación.

Tabla 10

Requerimientos para el diseño del tanque

Parámetro	Agua residual industrial
Caudal de ingreso	3.3 m^3 por día
Horas de operación	9 horas
pH	4.61
Plomo	14.91 mg/L

Por el espacio disponible el volumen para el diseño del tanque será 1.1 m^3 , se realizará 3 tratamientos diarios, por lo tanto, se realizará 3 tratamientos diarios.

Para el dimensionamiento de la altura y diámetro del tanque se tomó como base (Doran, 2012) el cual indica que, para los tanques con sistema de agitación, la relación entre el diámetro/altura es 1:1, con esta relación es posible determinar las dimensiones del tanque:

$$V_T = \frac{\pi * \phi_T^2}{4} * H_T \quad (3)$$

Donde:

V_T : Volumen del tanque (m^3)

H_T : Altura del tanque (m)

ϕ_T : Diametro del tanque (m)

De la relación anterior $\phi_T = H_T$, obteniendo finalmente la ecuación (3).

$$V_T = \frac{\pi * \phi_T^3}{4}$$

De la ecuación anterior se obtiene un diámetro y una altura de tanque de 1.12, asimismo la norma API 650 considera un margen de seguridad por sobrellenado, además se consideró un 20% del volumen efectivo para garantizar una mezcla adecuada. (Perry & Green, 2008)

En la tabla 11, se presentan las dimensiones estimadas para el diseño del tanque de agitación:

Tabla 11

Dimensiones del diseño del tanque de agitación

Parámetro de dimensión	Magnitud
Altura del fluido	1.12 m
Altura del tanque	1.34 m
Diámetro del tanque	1.12 m
Volumen efectivo	1.10 m^3
Volumen Real	1.32 m^3

3.2.3 Cálculo del espesor de pared del tanque

Para la estimación del espesor de la pared del tanque se tomó como referencia la norma American Petroleum Institute (2013), la cual mediante factores críticos y parámetros ambientales estima un espesor mínimo requerido para el diseño del tanque de agitación.

La norma API 650 propone la estimación de dos parámetros para el cálculo del espesor: el esfuerzo máximo permisible de diseño y el esfuerzo máximo permisible de la prueba hidrostática.

$$S_d = \text{Min} \left[\frac{2}{3} \sigma_f, \frac{2}{5} \sigma_t \right] \quad (4)$$

$$S_t = \text{Min} \left[\frac{3}{4} \sigma_f, \frac{3}{7} \sigma_t \right] \quad (5)$$

Donde:

S_d : Esfuerzo maximo permisible de diseño (Mpa)

S_t : Esfuerzo maximo permisible de la prueba hidrostática (Mpa)

σ_f : Limite elastico (Mpa)

σ_t : Resistencia a la tracción (Mpa)

Reemplazando los valores de limite elástico y resistencia a la tracción en la ecuación (4) y en la ecuación (5) se tiene lo siguiente.

$$S_d = \text{Min} \left[\frac{2}{3} (205 \text{ MPa}), \frac{2}{5} (515 \text{ MPa}) \right] = \text{Min}[136.7, 206.0]$$

$$S_t = \text{Min} \left[\frac{3}{4} (205 \text{ MPa}), \frac{3}{7} (515 \text{ MPa}) \right] = \text{Min}[153.7, 220.7]$$

Siendo $S_d = 136.7 \text{ Mpa}$ y $S_t = 153.7 \text{ Mpa}$

a) Estimación del espesor por el método de 1 pie

Este método de 1 pie es aplicable cuando se tienen diámetros menores de 60m, consiste en estimar el espesor del tanque a 1 pie del fondo, se emplean la ecuación (6) y la ecuación (7) de las cuales se escoge el resultado de mayor valor:

$$t_d = \frac{4.9 * D(H - 0.3)G}{S_d} + C.A \quad (6)$$

(7)

$$t_t = \frac{4.9 * D(H - 0.3)}{S_t}$$

Donde:

t_d : Espesor de diseño de la pared (mm)

t_t : Espesor de la prueba hidrostática (mm)

D: Diámetro del tanque (m)

H: Altura del fluido en el tanque (m)

G: Gravedad específica

C. A: Corrosión admisible

De la tabla 12, se consideró una clase de corrosión 4, estableciendo los valores de ST y LT para el cálculo de la C.A.

Tabla 12

Clase de corrosión en el acero inoxidable

Corrosión class	Steel	
	ST	LT
1	<0.5	<0.1
2	0.5-2	0.1-1.5
3	2-10	1.5-6
4	10-35	6-20
5	>35	>20

Nota: Adaptado de (American Petroleum Institute, 2013)

Considerando un periodo de vida del tanque de agitación de 25 años, mediante la ecuación (8) se estima la C.A.

(8)

$$C.A. = ST + LT$$

$$C.A. = \frac{35}{1000} * 10 + \frac{20}{1000} * 15 = 0.650 \text{ mm}$$

Reemplazando los valores en la ecuación (6) y la ecuación (7) respectivamente se obtiene:

$$t_d = \frac{4.9 * 1.12 (1.12 - 0.3) * 0.998}{136.7} + 0.650 = 0.683 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4.9 * 1.12(1.12 - 0.3)}{153.7} = 0.029 \text{ mm}$$

De los cálculos obtenidos el espesor del tanque debe tener un espesor mínimo de 0.683 mm, sin embargo, la norma API 650 indica que para diámetros menores de 15 m el espesor mínimo recomendado es de 5 mm, por ende, se considerará 5 mm el espesor de la pared del tanque.

3.2.4 Cálculo de deflectores

Según el libro Perry & Green (2008) cuando se tienen números de Reynolds muy altos y bajas viscosidades no es necesario considerar en el diseño la adición de placas deflectoras.

El diseño final del tanque de agitación se puede observar en la figura 26, asimismo el plano del tanque se encuentra especificado en el anexo 4.

Figura 26

Diseño del tanque de agitación



3.2.5 Diseño del sistema de agitación

Estimación de la potencia del motor.

Como primera etapa del tratamiento del agua residual, se debe mezclar el agua residual con el sulfato férrico mediante una agitación intensa de 202.88 rpm, por ello la importancia de estimar la potencia necesaria del motor conectado al eje del impulsor, la estimación de la potencia requería se calculó mediante la ecuación (9).

$$P = N_p \cdot \rho \cdot N'^3 \cdot D_a^5 \quad (9)$$

Donde:

P : Potencia requerida (watts).

N_p : Constante de potencia del impulsor o mezclador

ρ Densidad del fluido (998 Kg/m³).

N' : Velocidad de rotación del impulsor (rps).

D_a : Diámetro del impulsor (m).

De los rpm establecidos en las pruebas experimentales se estimará el número de revoluciones por segundo, es calculado mediante la ecuación (10).

$$N' = \frac{N}{60} = 3.381 \text{ rps} \quad (10)$$

Con los datos anteriores se estimará el número de Reynolds (Re), mediante la ecuación (11):

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 N' \rho}{\mu} \quad (11)$$

Donde:

N_{Re} : número de Reynolds

μ : Viscosidad del agua ($0.001002 \frac{Kg}{m} \cdot s$)

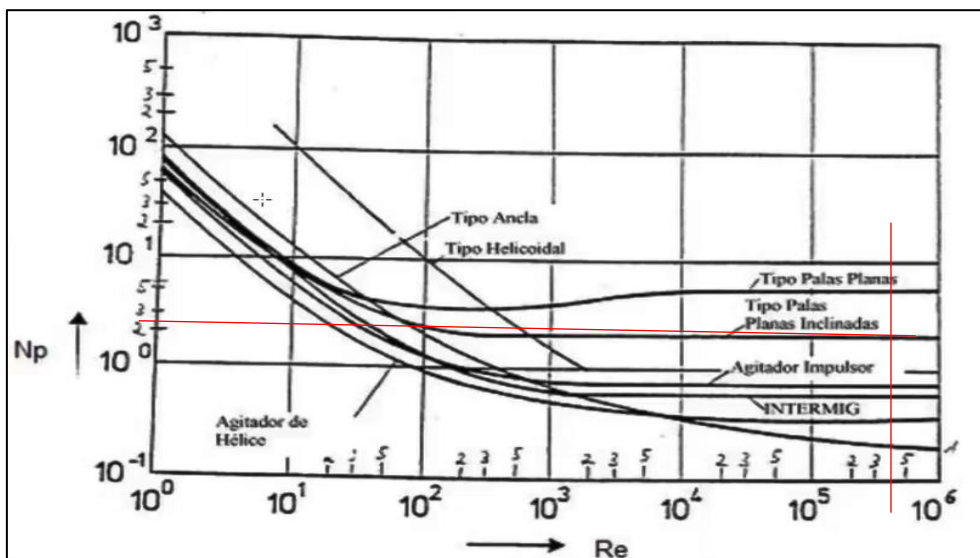
Reemplazando los valores en la ecuación (11), se obtiene:

$$N_{Re} = \frac{0.38^2 \times 3.381 \times 998}{0.001002} = 486315.37$$

De la relación gráfica entre el número de Reynolds y el número de potencia para los diferentes impulsores, considerando la curva de palas inclinadas y el número de Reynolds anteriormente calculado, le corresponde un número de potencia de 2.1.

Figura 27

Correlación del número de Reynolds y el número de potencia (N_p)



Nota: Adaptado de (Acuña, 2021)

Se procedió a estimar la potencia del motor, reemplazando los valores en la ecuación (9).

$$P = N_p \cdot \rho \cdot N'^3 \cdot D_a^5$$

$$P = 2.1 \times 998 \times 3.381^3 \times 0.38^5$$

$$P = 642.00 \text{ Watts}$$

Considerando una eficiencia del motor del 70% y una pérdida de potencia por fricción del 30%.

$$P' = \frac{642.00 \text{ Watts}}{0.70} \times 1.30$$

$$P' = 1192.28 \text{ Whatts} \equiv 1.60 \text{ Hp}$$

Calculando el momento torsor sería:

$$M_t = \frac{\omega}{P'} = \frac{N' * 2\pi}{P'} = \frac{21.25}{1192.28} = 56.12 \text{ N.m}$$

Selección del motor de agitación

Para la selección de la fuerza mecánica del sistema de agitación, se ha seleccionado un motor con las siguientes características:

- Potencia: 2 HP
- Eficiencia: 89.5 %
- Frecuencia: 220V / 380V / 440V/ 60HZ,
- Sistema trifásico
- Revoluciones: 1750 rpm

En la figura 28 se muestra la imagen del motor que será acoplado directamente al eje de agitación de forma vertical.

Figura 28

Motor de trifásico de 2 HP



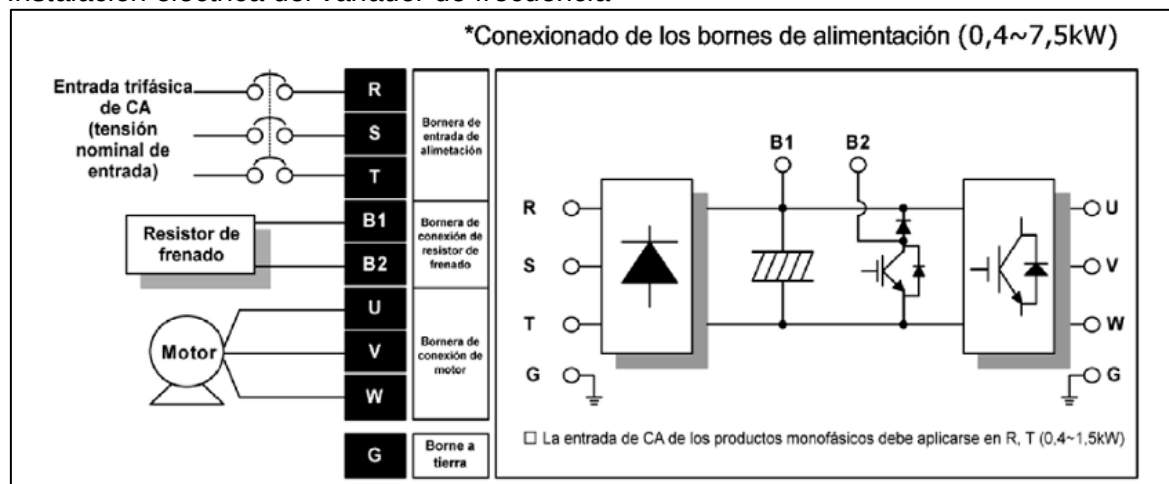
Nota: fuente (Berklín, 2024)

Selección de variador de frecuencia

Debido a que el motor cuenta con 1750 rpm a una frecuencia de 60Hz, se ha visto en la necesidad de incorporar un variador de frecuencia, para modificar la velocidad de rotación del motor y establecer la velocidad de rotación para la coagulación y la velocidad de rotación de la floculación, requeridas para el tratamiento del agua residual industrial, dentro del mercado seleccionó el variador de frecuencia iG5A, en la figura 29, se muestra el diagrama de instalación al motor.

Figura 29

Instalación eléctrica del variador de frecuencia



Nota: fuente (Industrial Systems, 2016)

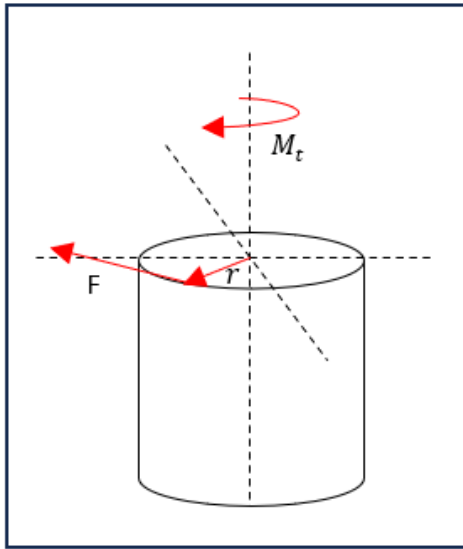
3.2.6 Diseño del eje.

Para realizar el dimensionamiento del eje es necesario realizar el análisis de cuerpo libre de las fuerzas que están actuando sobre el eje. Para el siguiente diagrama de cuerpo libre (D.C.L.) no se considera las fuerzas provenientes del peso ya que son contrarrestados con el empuje del fluido y con los pernos con el acople eje reductor.

La fuerza que produce el momento torsor se puede calcular por la distancia del centro del eje hacia el brazo torsor según la figura 30.

Figura 30

Diagrama de cuerpo libre del momento torsor



Se tiene que el momento torsor M_t queda por la ecuación (12)

$$M_t = F * r \quad (12)$$

Donde:

M_t : Momento torsor

F : Fuerza tangencial aplicada en el eje

r : Radio del eje

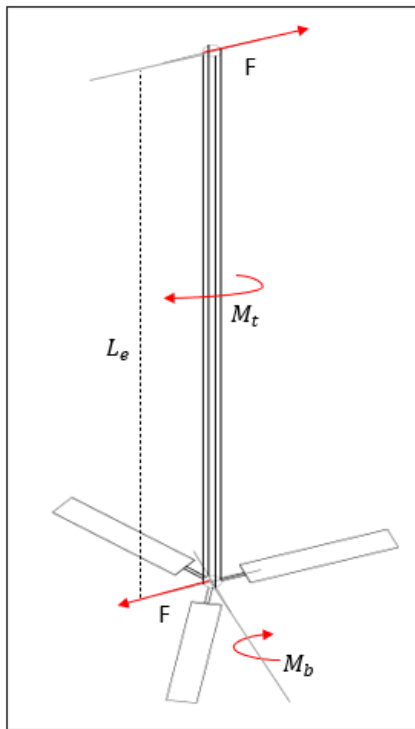
Entonces, despejando la ecuación (12), la fuerza (F) queda definida de la siguiente forma:

$$F = \frac{M_t}{r} = \frac{2 * M_t}{d} = \frac{2 * 56.12}{d} = \frac{112.24}{d} N \quad (13)$$

En la figura 31 se muestra el diagrama de fuerzas y momentos que se aplican sobre el eje de agitación.

Figura 31

Diagrama de fuerzas y momentos sobre el eje de agitación



Se tiene que el momento flector M_b queda por la ecuación (14)

$$M_b = F * L_e \quad (14)$$

Donde:

M_b : Momento de flexión en una viga.

F : Fuerza aplicada.

L_e : Longitud del eje (m).

Reemplazando los valores en la ecuación (14) lo siguiente:

$$M_b = \frac{112.24}{d} * 0.96$$
$$M_b = \frac{107.7504}{d} \quad (15)$$

Cálculo del diámetro por resistencia.

El material seleccionado para el diseño del eje es acero inoxidable 304, para la estimación del diámetro óptimo del eje se aplicó la ecuación (16) para ejes macizos (Zapata, 2013).

$$d^3 = \frac{16}{\pi S_s} \sqrt{(K_b * M_b)^2 + (K_t * M_t)^2} \quad (16)$$

Donde:

d: Diametro del eje

S_s: esfuerzo permisible

K_b: Factor de choque y fatiga, aplicado al momento flector

K_t: Factor de choque y fatiga, aplicado al momento de torsión.

M_b: Momento flector

M_t: Momento torsor

Esfuerzo de fluencia del acero en barra (σ_f): 235 MPa

Esfuerzo de tracción del acero en barra (σ_t): 585 MPa

Para el diseño de los ejes es necesario evaluar la teoría de esfuerzo cortante máximo, por ello se debe según la norma ASME se debe calcular el esfuerzo de diseño, los cuales son 30 % del esfuerzo de fluencia y el 18% del esfuerzo de tracción. (American Society of Mechanical Engineers, 1985)

$$S_d = 0.3 * S_f = 70.5 \text{ MPa} \quad y \quad S_d = 0.18 * S_t = 105.3 \text{ MPa}$$

Se escoge el menor valor y según la ASME cuando el eje está sometido a un sistema de rosca se debe reducir a un 75% el esfuerzo por diseño obteniendo un valor de:

$$S_s = 0.75 * 70.5 = 52.875 \text{ MPa}$$

Del libro de diseño de elementos de máquinas I pág. 78 se tiene la siguiente tabla 13, la cual establece los valores de factor de choque y fatiga, aplicado al momento flector (K_b) y torsor (K_t).

Tabla 13

Valores de factor de choque y fatiga

Tipo de movimiento	K_b	K_t
Para ejes estacionarios		
Carga aplicada gradualmente	1.0	1.0
Carga aplicada repentinamente	1.5 2.0	1.5 2.0
Para ejes en rotación		
Carga aplicada gradualmente	1.5	1.5
Carga repentina (choques ligeros)	1.5 a 2.0	1.5 a 2.0
Carga repentina (choques fuertes)	2.0 a 3.0	2.0 a 3.0

Nota: Adaptado de (Zapata, 2013)

Según la tabla anterior se considerará un K_b y un K_t de 3.0, reemplazando los datos y la ecuación (15) en la ecuación (16).

$$d^3 = \frac{16}{\pi (52.875)} \sqrt{\left(3 * \frac{107.7504}{d}\right)^2 + (3 * 56.12)^2}$$

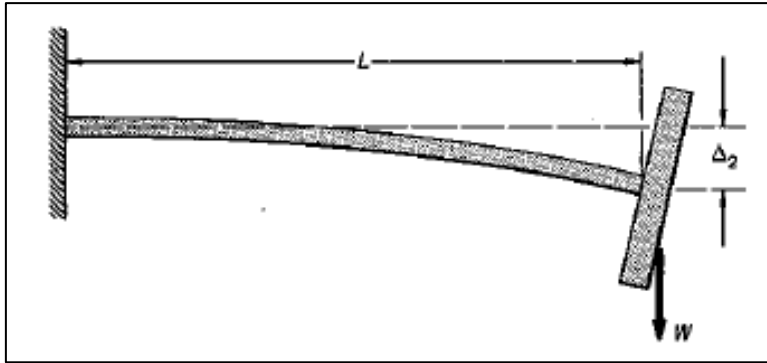
Resolviendo la ecuación por métodos numéricos se obtiene que el diámetro del eje mínimo debe ser: 27.088 mm, debido a la disponibilidad de ejes en la empresa se empleó un eje de diámetro de acero 304 de 28.575 mm (1-1/8").

Cálculo de la curvatura del eje por flexión.

Se evaluó la deflexión máxima según el libro Liquid Agitación de chemineer el cual establece que un eje puede deformarse según la figura 32.(Ramsey & Zoller, 1985)

Figura 32

Deflección del eje durante la agitación



Nota: fuente (Ramsey & Zoller, 1985)

De la figura 32, la variable w en nuestro caso es definida por F, la curvatura máxima se calcula mediante la ecuación (17):

$$\Delta_2 = \frac{FL_s^3}{3EI} \quad (17)$$

Donde:

Δ₂: Deformación respecto al eje

E: Módulo de elasticidad 193 x 10⁹ N/m²

I: Momento de inercia de la sección transversal del eje respecto al eje neutro (m⁴)

Reemplazando los valores en la ecuación (17).

$$\Delta_2 = \frac{3770.79 * 0.96^3}{3 * 193 * 10^9 I}$$

El momento de inercia de la sección transversal está definido por la ecuación (18):

$$I = \int y^2 dA \quad (18)$$

Donde:

y: Es la distancia desde el eje neutro al elemento de área dA

dA: Es un elemento diferencial de área de la sección transversal.

Considerando coordenadas polares para la integración $y = r \cos(\theta)$

La ecuación (18) queda definida por:

$$I = \int_0^{2\pi} \int_0^r (r \cos(\theta))^2 r dr d\theta = \int_0^{2\pi} \cos^2(\theta) \int_0^r r^3 dr d\theta = \int_0^{2\pi} \cos^2(\theta) \frac{r^4}{4} d\theta$$

$$I = \frac{r^4}{4} \int_0^{2\pi} \cos^2(\theta) d\theta = \frac{r^4}{4} \int_0^{2\pi} \frac{1 + \cos(2\theta)}{2} d\theta = \frac{r^4}{4} (\pi)$$

$$I = \pi \frac{r^4}{4} \approx \pi \frac{D^4}{64}$$

Reemplazando en la ecuación (17).

$$\Delta_2 = \frac{3770.79 * 0.96^3}{3 \times 10^9 \pi \frac{0.028575^4}{64}}$$

$$\Delta_2 = 0.176 \text{ mm}$$

La deflexión máxima permitida es 1.5 mm por metro lineal, para nuestro caso la longitud es de 0.96, por lo tanto, la deflexión máxima permitida es: 1.44 mm, siendo mucho mayor al valor obtenido. (Zapata, 2013)

Cálculo de la deflexión por torsión

La deflexión por torsión excesiva puede generar un desgaste en el eje, por ello es importante estimar la deformación por torsión, la deflexión generada por torsión se estimó mediante siguiente ecuación (19):

$$\theta_{\max} = \frac{M_t * L_s}{G * J} \quad (19)$$

Donde:

L_s = Longitud del eje (m)

$\theta_{m\acute{a}x}$ = Torsi3n m\acute{a}xima (rad)

M_t = Momento de torsi3n N.m

J = Momento de inercia polar (m⁴)

G = M3dulo de corte del acero inoxidable (73.1×10^9 N/m²)

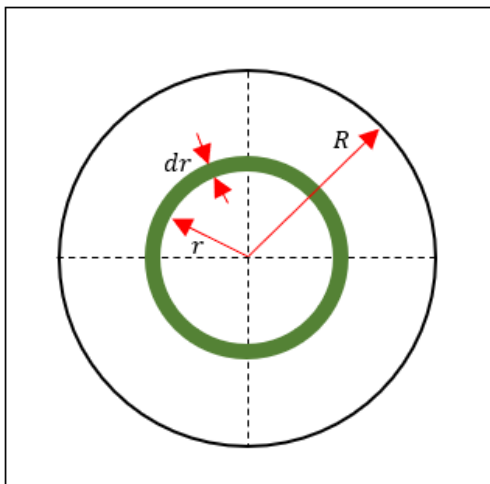
El momento polar de inercia est\`a definido por la ecuaci3n (20):

$$J = \int r^2 dA \quad (20)$$

Para realizar el c\`alculo el momento polar de inercia, se tom3 un diferencial del radio, as\`i como se muestra en la figura 33:

Figura 33

Secci3n dr de un eje macizo



Reemplazamos $dA = 2\pi r dr$, en la ecuaci3n (20)

$$J = \int r^2 dA = \int_0^R r^2 \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr = 2\pi \int_0^R r^3 dr$$

$$J = \frac{\pi R^4}{2}$$

Reemplazando en la ecuaci3n (19):

$$\theta = \frac{56.12 * 0.96}{73.1 \times 10^9 * \frac{\pi * 0.028575^4}{2}}$$

$$\theta = 0.00070 \text{ rad}$$

La deflexión por torsión máxima permitida es 0.026° por centímetro lineal, para nuestro caso la longitud es de 0.96 m, por lo tanto, la deflexión máxima permitida es 2.50° (0.0436 rad.), siendo este valor máximo permitido mucho mayor al valor obtenido. (Zapata, 2013)

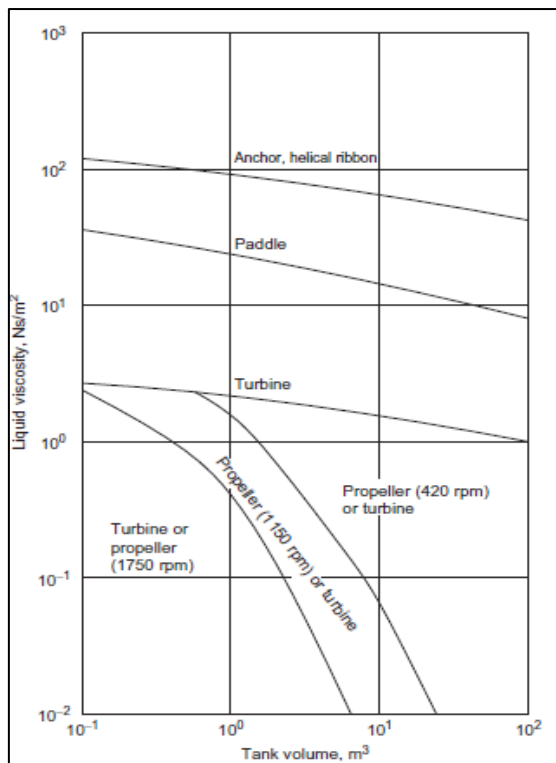
3.2.7 Diseño del impulsor

Selección de impulsor.

Para la selección del impulsor se empleó la figura 34, con el cual se selecciona la recomendación del impulsor requerido:

Figura 34

Diagrama viscosidad – Volumen de tanque para determinar el tipo de impulsor



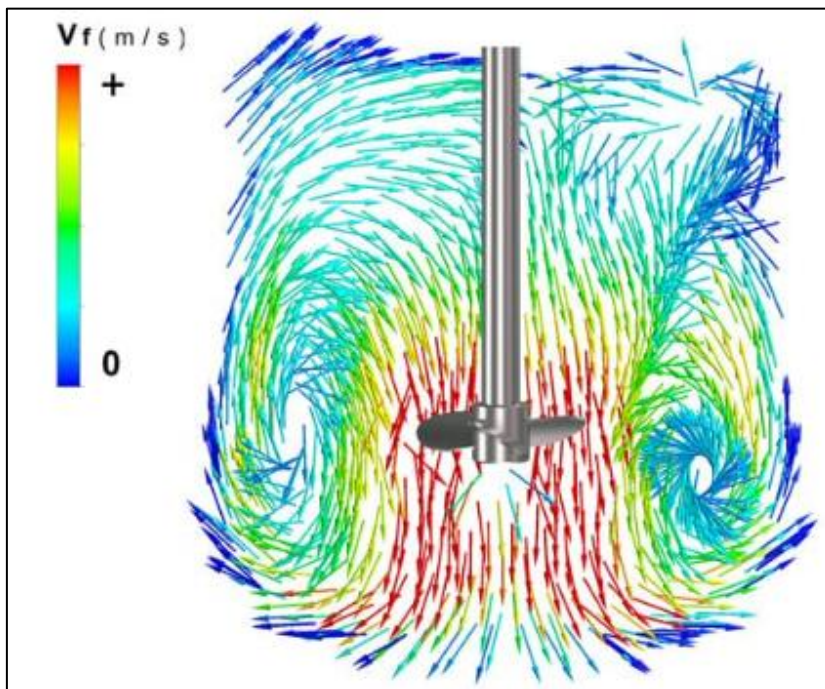
Nota: fuente (Portales, 2015)

Según la figura 34, los posibles impulsores para el sistema de agitación son de tipo turbina y tipo hélice.

La página Fluidmix (2023) realizó la evaluación de la velocidad del fluido mediante el software ANSYS 2020 R2 empleando un impulsor tipo hélice y uno tipo turbina de palas inclinadas, según la figura 35 el impulsor tipo hélice genera un flujo de agua axial con velocidades del fluido medianamente bajas, en comparación cuando se empleó un impulsor tipo turbina de palas inclinadas, según la figura 36 este tipo de impulsor genera un flujo de agua axial y radial con altas velocidades del fluido, De acuerdo al proceso de coagulación se requiere velocidades altas en la primera velocidad de mezcla, para lograr una mezcla homogénea con el sulfato férrico, debido a ello se empleará un impulsor tipo turbina.

Figura 35

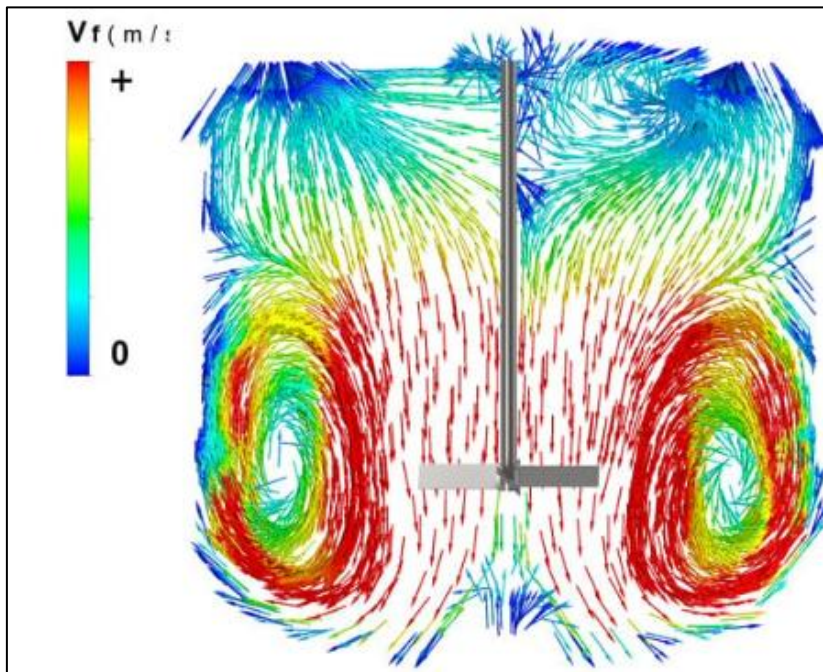
Impulsor tipo hélice



Nota: fuente (Fluidmix, 2023)

Figura 36

Impulsor tipo turbina de palas planas inclinadas



Nota: fuente (Fluidmix, 2023)

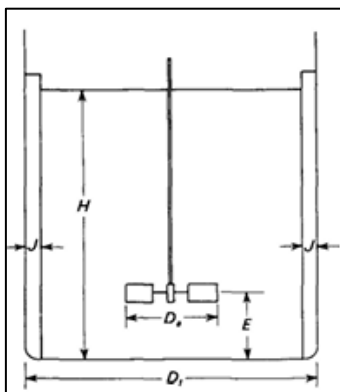
Dimensionamiento de impulsor.

Diámetro del impulsor según las relaciones geométricas.

Para el dimensionamiento del diámetro del impulsor se emplearon las relaciones geométricas del diseño para un tanque con agitación, en la figura 37 se muestra las relaciones de diseño establecidas para el impulsor.

Figura 37

Dimensiones para el diseño de un impulsor tipo turbina



Nota: fuente (McCabe et al., 2007)

empleando la siguiente relación geométrica:

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}$$

Donde:

D_a : Diametro del Impulsor

D_t : Diametro del tanque

Se obtuvo un diámetro del impulsor de 0.373m $\approx$ 380 mm

Ancho de la placa del impulsor.

Para la estimación del ancho del impulsor se consideró la relación:

$$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$$

Donde:

W: Ancho de la placa del impulsor

Obteniendo un ancho de la placa del impulsor de 0.076m $\approx$ 80 mm

Largo de la placa del impulsor.

Para la estimación del largo de la placa del impulsor se consideró la relación:

$$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

Donde:

L: Largo de la placa del impulsor

Obteniendo un ancho del impulsor de 0.10m $\approx$ 100 mm.

Espesor de la placa del impulsor.

La determinación del espesor mínimo de las hojas del impulsor es crucial para garantizar su resistencia estructural al ser sometido bajo cargas del fluido en el proceso de mezcla, se consideró los siguientes datos previamente calculados.

Longitud de la hoja (L): 100 mm

Ancho de la hoja (W): 80 mm

Material: Acero inoxidable 304

La carga máxima esperada sobre las hojas del impulsor se determina mediante la ecuación (21).

$$M_t = F \cdot r \quad (21)$$

Donde:

M_t : Momento torsor en N. m

F: Fuerza aplicada en dirección tangencial al radio

r: Radio efectivo del impulsor.

Se calculó la fuerza máxima debido a la carga aplicada en el centro de la hoja, en la figura 38 y en la figura 39, se muestra la fuerza que se ejerce sobre el impulsor.

Figura 38

Vista axial del impulsor

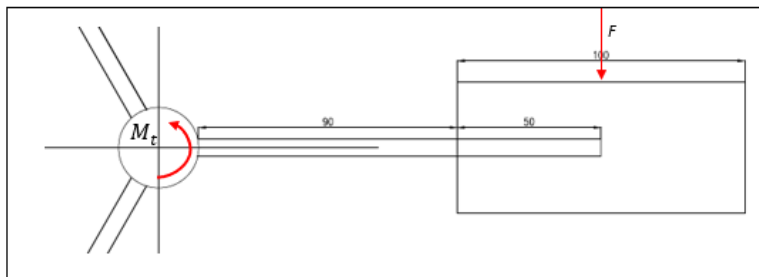
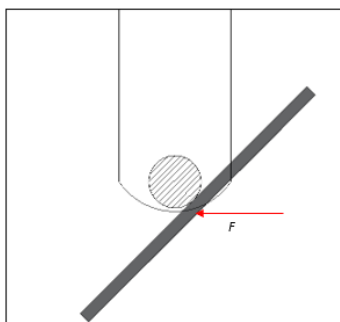


Figura 39

Vista de perfil de la hoja del impulsor



Reemplazando los valores en la ecuación (21), se obtiene lo siguiente.

$$F = \frac{M_t}{r} = \frac{56.12 \text{ N.m}}{0.142875 \text{ m}} = 392.79 \text{ N}$$

Para una hoja rectangular, se calculó el segundo momento de área mediante la ecuación (22):

$$I = \frac{W \cdot e^3}{12} \quad (22)$$

Donde

e: espesor de la hoja.

Considerando un espesor mínimo comercial de 0.3 cm

$$I = \frac{8 \times 10^{-2} \times (3 \times 10^{-3})^3}{12} = 1.8 \times 10^{-10} \text{ m}^4$$

Momento de flexión evaluado en uno de los extremos de la hoja

$$M = 392.79 \text{ N} \times 5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$M = 19.64 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Cálculo del esfuerzo de flexión máximo

$$\sigma_{flexión} = \frac{M \times c}{I}$$

Donde:

$\sigma_{flexión}$: Tensión de flexión en la sección transversal.

M: Momento flector aplicado a la placa, (Nm).

c: Distancia desde el eje neutro (m).

I: Momento de inercia de la sección transversal con respecto al eje neutro (m⁴).

$$\sigma_{flexión} = \frac{19.64 \times 1.5 \times 10^{-3}}{1.8 \times 10^{-10}}$$

$$\sigma_{flexión} = 163.67 \text{ Mpa}$$

Para el acero inoxidable

Para el esfuerzo de flexión $\sigma_{flexión \text{ acero } 304} = 210 \text{ MPa}$

Ya que el esfuerzo de flexión máximo es menos al esfuerzo de flexión del acero se empleará un espesor de 0.3 cm.

Angulo de inclinación de las placas del impulsor.

Las placas del impulsor estarán inclinadas en 45° con respecto a la vertical ya que este valor optimiza eficientemente la agitación del fluido, garantizando de esta forma una correcta mezcla. (Paul et al., 2004)

Posición del impulsor sobre el eje

La altura en la cual se colocará el impulsor sobre el eje se consideró las referencias de diseño mencionadas por McCabe et al. (2007), la cual indica que la relación de altura del impulsor es igual al diámetro del impulsor, por lo tanto, se consideró una altura de 380 mm desde la base del tanque hasta el impulsor.

3.3 Diseño del tanque ecualizador

En el diseño de la planta piloto se agregó un tanque ecualizador, el cual sirve como almacenamiento del agua residual industrial mientras el tanque de agitación está en funcionamiento, se adoptó la siguiente configuración especificada en la tabla 14:

Tabla 14

Dimensiones del tanque ecualizador

Parámetro de dimensión	Magnitud
Altura del fluido	1.12 m
Altura del tanque	1.34 m
Diámetro del tanque	1.12 m
Volumen efectivo	1.10 m ³
Volumen Real	1.32 m ³
Espesor del tanque	5 mm
Material	Acero inoxidable 304

Asimismo, se consideró una tubería de conexión de 2" entre el tanque agitado y el tanque ecualizador, con la finalidad que el rebose no sobrepase la altura del fluido establecido en el diseño; la entrada y salida del agua residual se realizará por medio de una tubería de 2" en la parte superior e inferior respectivamente, así como se puede apreciar en el anexo 3.

3.4 Diseño del sedimentador de base cónica

Se consideró la etapa de sedimentación de los flóculos formados se decidió diseñar un sedimentador circular de base cónica.

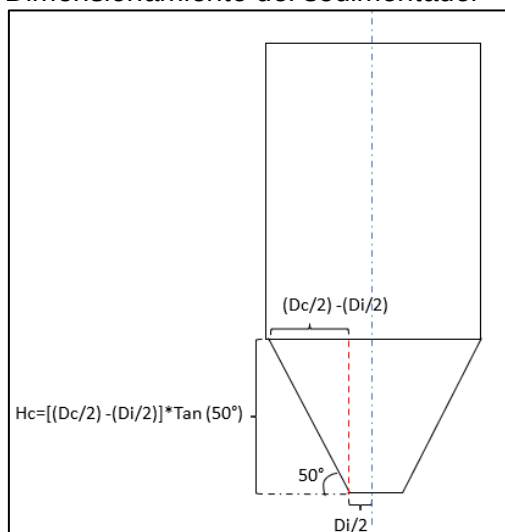
Conforme la Organización panamericana de salud en su libro “Plantas de filtración rápida” establece que la forma cónica de la parte inferior del sedimentador debe tener una pendiente entre 45° a 60°, esto puede variar de acuerdo con la naturaleza del tipo de agua y tratamiento aplicado; se realizó las pruebas de laboratorio y se determinó que el Angulo estático de reposo para los Floc es de 46° a 48°, por tal motivo se escogió como pendiente un ángulo de 50°.

3.4.1 Dimensiones del sedimentador

Para el dimensionamiento del sedimentador se dividió en dos secciones, la sección cilíndrica y la sección cónica, según la universidad de granada en un artículo “Diseño de tanques de almacenamiento”, indica que la relación del diámetro y la altura de la sección cilíndrica es de 2/3, en la figura 40, se observa la relación del diámetro del cilindro y la altura del cono.

Figura 40

Dimensionamiento del sedimentador



De la siguiente relación se tiene:

$$\frac{D_c}{H_c} = \frac{2}{3}$$

Donde:

D_c : Diámetro del cilindro

H_c : Altura del cilindro

El volumen total del sedimentador quedó definido por:

$$V_{sed} = V_{cilindro} + V_{cono}$$

$$V_{sed} = \frac{\pi * D_c^2}{4} * H_c + \frac{1}{3} * \pi * H_{cono} * \left(\frac{D_i^2}{4} + \frac{D_i * D_c}{4} + \frac{D_c^2}{4} \right)$$

Donde:

H_{cono} : Altura del cono

D_i : Diámetro inferior del cono

Considerando un diámetro de salida del sedimentador de 2", asimismo se consideró un sobredimensionamiento del 20% del volumen inicial de 1.10 m^3 , reemplazando en la ecuación, se tiene:

$$1.20 * 1.10 \text{ m}^3 = \frac{\pi * D_c^2}{4} * \frac{3}{2} D_c + \frac{1}{3} * \pi * \left[\frac{D_c}{2} - \frac{D_i}{2} \right] * \tan(50^\circ) * \left(\frac{D_i^2}{4} + \frac{D_i * D_c}{4} + \frac{D_c^2}{4} \right)$$

$$1.20 * 1.10 \text{ m}^3 = \frac{\pi * D_c^2}{4} * \frac{3}{2} D_c + \frac{1}{3} * \pi * \left[\frac{D_c}{2} - \frac{0.05479}{2} \right] * \tan(50^\circ) * \left(\frac{0.05479^2}{4} + \frac{0.05479 * D_c}{4} + \frac{D_c^2}{4} \right)$$

$$D_c = 1.00 \text{ m}$$

$$D_i = 0.05479 \text{ m}$$

$$H_c = 1.50 \text{ m}$$

$$H_{cono}: 0.57 \text{ m}$$

3.4.2 *Espesor del sedimentador*

La presión total ejercida en el fondo del sedimentador es la suma de presión hidrostática y la presión atmosférica, entonces se tiene la siguiente expresión:

$$P_t = P_h + P_{atm}$$

$$P_t = \rho * g * h + P_{atm}$$

Donde:

P_t : Presión Total

P_h : Presión hidrostática

P_{atm} : Presión atmosférica

ρ : Densidad del fluido

g : Gravedad ($9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$)

h : Altura del fluido

Reemplazando los datos en la expresión anterior se tiene:

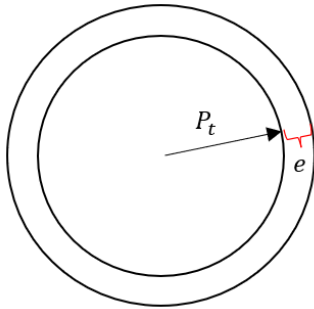
$$P_t = 998 * 9.81 * 2.07 + 1.013 * 10^5$$

$$P_t = 1.21566 * 10^5 \text{ N/m}^2$$

Posteriormente se evaluó el efecto de la presión sobre la sección transversal en la base del cono, así como se muestra en la figura 41.

Figura 41

Diferencial de espesor



De la ecuación de resistencia de materiales se tiene lo siguiente:

$$\sigma = \frac{P_t * D}{2 * e}$$

Se evaluará el espesor de diseño en las dos bases del cono:

Considerando que el material seleccionado para el sedimentador es acero inoxidable 304, se tiene lo siguiente:

- **Base inferior del cono**

$$227.5 * 10^6 = \frac{1.21566 * 10^5 * 0.05}{2 * e}$$

$$e = 0.013 \text{ mm}$$

- **Base superior del cono (Unión cilindro – cono)**

$$227.5 * 10^6 = \frac{1.21566 * 10^5 * 1.00}{2 * e}$$

$$e = 0.2671 \text{ mm}$$

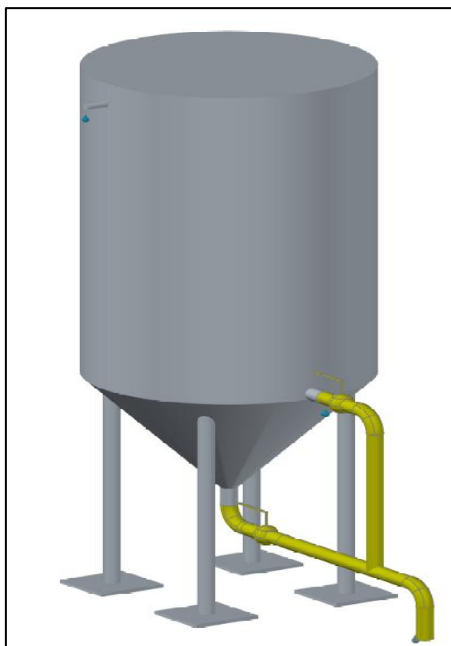
Considerando el máximo espesor obtenido, se consideró por diseño un espesor mínimo de 0.269 mm, sin embargo, según la norma API 650 indica que para diámetros

menores de 15 m el espesor mínimo recomendado es de 5 mm, por ende, se consideró este espesor la construcción del sedimentador. (American Petroleum Institute, 2013)

Los soportes del sedimentador fueron diseñados mediante el software AutoCAD Plant 3D; para la alimentación del sedimentador se consideró una tubería de 1" a 80 mm de la parte superior del equipo, por otro lado, para la salida del agua residual una vez culminado el proceso de sedimentación se instaló una tubería de 2" en la parte inferior de la sección cilíndrica del sedimentador, mientras que los lodos son retirados por una tubería de 2" instalada en la parte inferior del sedimentador, así como se puede apreciar en la figura 42, los planos del diseño del sedimentador son detallados en el anexo 6.

Figura 42

Sedimentador cilíndrico de base cónica



3.5 Diseño del sistema de bombeo

El objetivo principal en esta sección es determinar la potencia necesaria que se debe suministrar a la bomba del sistema, la potencia de la bomba se puede estimar en función del caudal, densidad del fluido y altura manométrica. (Perry & Green, 2008)

$$P_{Hp} = \frac{Q * \rho * g * Hm}{746 * \eta} \quad (23)$$

Donde se tienen los siguientes datos:

Caudal de bombeo (Q): 1.83 L/s

Densidad del agua (ρ): 998 Kg/m³

Gravedad (g): 9.81 m/s²

Eficiencia de la bomba (η): 50%

Tiempo de bombeo (t): 10 min

Altura Manométrica (Hm)

Potencia de la bomba (P_{Hp})

3.5.1 Determinación del diámetro de succión e impulsión

- Estimación del diámetro de succión.

De la ecuación de continuidad de la dinámica de fluidos estriada de (Cengel & Cimbala, 2012), se tiene:

$$A_s * V_s = A_2 * V_2$$

$$A_s = \frac{Q}{V_s}$$

$$\frac{\pi D_s^2}{4} = \frac{Q}{V_s}$$

$$D_s = 1.1284 \sqrt{\frac{Q}{V_s}}$$

$$D_s = 1.1284 \sqrt{\frac{1.83}{0.75 * 1000}} = 0.0557 \text{ m}$$

Escogiendo un diámetro comercial empleamos un diámetro de 0.0544 m (2.00”), según la tabla 15 la velocidad de succión debe estar entre 0.3 y 0.9 m/s, se realiza el cálculo de la velocidad de succión con el nuevo diámetro para verificar esta condición.

$$V_s = \frac{4 * Q}{\pi * D_s^2}$$

$$V_s = \frac{4 * 1.83}{\pi * 0.0544^2} = 0.787 \text{ m/s}$$

Tabla 15

Velocidades recomendadas para fluidos en tuberías

Fluido	Tipo de Flujo	Velocidad	
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0.5-1.0 ft/s	0.15-0.30 m/s
	Entrada de bomba	1-3 ft/s	0.30-0.90 m/s
	Salida de bomba	4-10 ft/s	1.20 – 3.0 m/s
Líquidos viscosos	Entrada de bomba	0.2-0.5 ft/s	0.06 -0.15 m/s
	Salida de bomba	0.5 – 2-0 ft/s	0.15 – 0.60 m/s

(Universidad de granada, 2023)

- Estimación del diámetro de impulsión.

La estimación del diámetro de impulsión se realiza mediante la ecuación de Bresse se tiene la ecuación (24)

$$D_i = K_3 * \left(\frac{t}{60 * 24} \right)^{0.25} * \sqrt{Q} \quad (24)$$

Donde:

K_3 : Constante de la ecuación de Bresse 1.2 a 1.5

Reemplazando las variables en la ecuación:

$$D_i = 1.3 * \left(\frac{10}{60 * 24} \right)^{0.25} * \sqrt{\frac{1.83}{1000}} = 0.0161 \text{ m}$$

Escogiendo un diámetro comercial empleamos un diámetro de 0.0294 m (1.00”), según la tabla 15 la velocidad de impulsión debe estar entre 1.20 y 3.0 m/s, se realizó el cálculo de la velocidad de impulsión con el nuevo diámetro para verificar esta condición.

$$V_s = \frac{4 * Q}{\pi * D_i^2}$$

$$V_s = \frac{4 * 1.83}{\pi * 0.0294^2} = 2.696 \text{ m/s}$$

3.5.2 Estimación de la pérdida de carga en la succión

El cálculo de la pérdida en la succión se realizó por medio de la relación de Hazen-Williams se tiene la ecuación (25):

$$H_{fs} = 10.67 \frac{L}{C^{1.852} D_s^{4.87}} Q^{1.851} \quad (25)$$

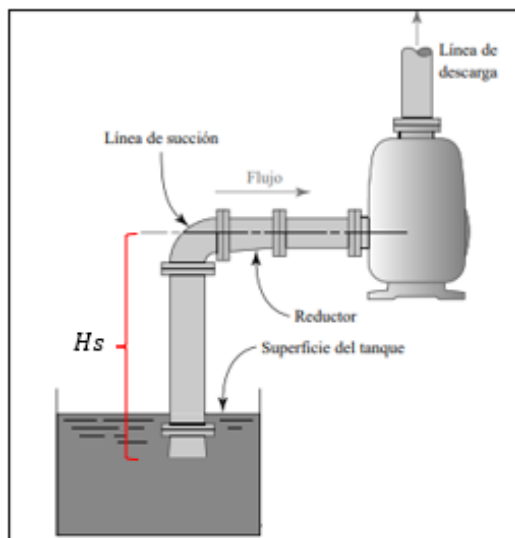
Donde L queda definido por la ecuación (26):

$$L = H_s + \sum L_e \quad (26)$$

De acuerdo con la figura 43 del sistema de succión, H_s es definida como la altura estática de succión y la $\sum L_e$ es la longitud equivalente de los accesorios y recorrido de tubería.

Figura 43

Sistema de succión



Nota: fuente (Mott & Untener, 2019)

Se tiene que: $H_s = H_{atm} - NPSH_{req} - H_{vap} - H_{fs}$, reemplazando en la ecuación (26)

$$L = H_{atm} - NPSH_{req} - H_{vap} - H_{fs} + \sum Le$$

Luego reemplazando la ecuación en la ecuación (25)

$$H_{fs} = 10.67 \frac{(H_{atm} - NPSH_{req} - H_{vap} - H_{fs} + \sum Le) * Q^{1.851}}{C^{1.852} D_s^{4.87}}$$

$$H_{fs} = 10.67 \frac{(H_{atm} - NPSH_{req} - H_{vap} - H_{fs} + \sum Le) * Q^{1.851}}{C^{1.852} D_s^{4.87}}$$

$$H_{fs} + \frac{H_{fs} * (C^{1.852} D_s^{4.87})}{Q^{1.851}} = H_{atm} - NPSH_{req} - H_{vap} + \sum Le$$

$$H_{fs} = \frac{H_{atm} - NPSH_{req} - H_{vap} + \sum Le}{1 + \frac{C^{1.852} D_s^{4.87}}{10.67 * Q^{1.851}}} \quad (27)$$

Luego se estima los componentes del H_{fs}

- **Cálculo de la presión atmosférica.**

Considerando que la planta piloto se desarrolló en el distrito de surquillo se tomó como referencia una altura de 105 msnm, la presión atmosférica se puede calcular en función de la altitud mediante la siguiente ecuación:

$$H_{atm} = 10.3297 * \left(\frac{293 - 0.0065 * msnm}{293} \right)^{5.26}$$

$$H_{atm} = 10.3297 * \left(\frac{293 - 0.0065 * 105}{293} \right)^{5.26} = 10.203 mca$$

- **Cálculo la presión de vapor de vapor de agua.**

Midiendo la temperatura del tanque ecualizador, se obtuvo un valor de 19.98 °C, con ello se determinó la presión de vapor de agua mediante la formula empírica de Antoine:

$$H_{vap} = 0.06105 * e^{\frac{17.27 * T}{T + 237.5}}$$

$$H_{vap} = 0.06105 * e^{\frac{17.27*(19.98)}{19.98 + 237.5}} = 0.198 \text{ mca}$$

- **Longitudes equivalentes por accesorios en la succión.**

Para la estimación de la pérdida de carga en la succión es necesario determinar la pérdida por fricción de los accesorios, esto se puede realizar mediante la longitud equivalente empleando la figura 44.

Figura 44

Resistencias de válvulas y accesorios expresados como longitud equivalente de diámetro de tubería.

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D
Válvula de globo —totalmente abierta	340
Válvula de ángulo —totalmente abierta	150
Válvula de compuerta —totalmente abierta	8
—abierta $\frac{3}{4}$	35
—abierta $\frac{1}{2}$	160
—abierta $\frac{1}{4}$	900
Válvula de retención —tipo oscilante	100
Válvula de retención —tipo bola	150
Válvula de mariposa —totalmente abierta, 2-8 in	45
—10-14 in	35
—16-24 in	25
Válvula de pie —tipo disco de vástago	420
Válvula de pie —tipo disco de bisagras	75
Codo estándar de 90°	30
Codo de 90° y radio largo	20
Codo de 90° para calle	50
Codo estándar de 45°	16
Codo de 45° para calle	26
Doble de retorno cerrado	50
Te estándar —con flujo por la línea principal	20
—con flujo por la ramificación	60

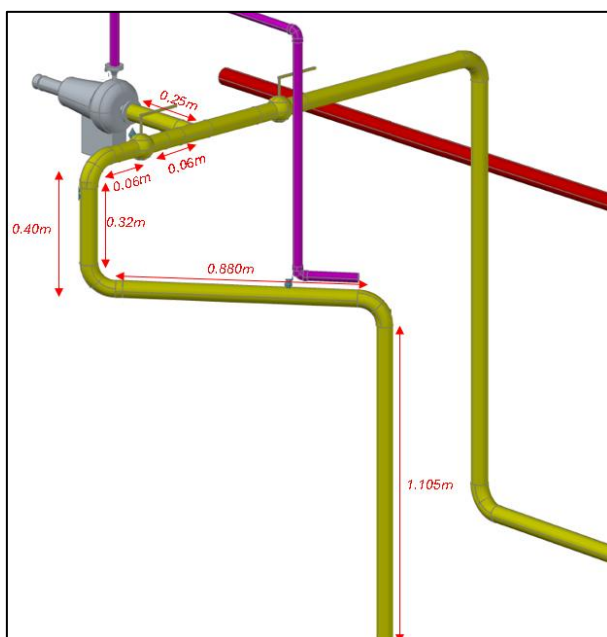
(Reproducido con autorización de Crane Co. *Flow of Fluids through Valves, Fittings and Pipe*, artículo técnico núm. 410, 2011. Todos los derechos reservados).

Nota: fuente (Mott & Untener, 2019)

Mediante el software AutoCAD Plant 3D se realizó la distribución de la tubería de la succión de la bomba (desde la toma de agua hasta la bomba) sigue la siguiente distribución que se muestra en la figura 45.

Figura 45

Diseño de la distribución de la tubería en la succión de la bomba



En base a la distribución de la tubería de la figura 45 se consideró la pérdida de carga de cada accesorio de la sección de succión mediante la longitud equivalente, los resultados se muestran en la tabla 16.

Tabla 16

Longitud equivalente de los accesorios en la succión.

Accesorios	Cantidad	K	Le=K*D
Tubo en T	1	60	3.264
llave globo de 2"	1	340	18.496
Codo estándar de 90° de 2"	3	30	4.896
Total			26.656 m

Asimismo, se consideró la longitud del recorrido de la tubería desde la toma del agua hasta la entrada de la bomba es 2.675 m y la altura estática de succión es 1.505 m.

Para el sistema de bombeo se empleará tubos de plástico (PVC) por ello se empleará como Constante de Hazen – Williams el valor de 150, de acuerdo con la figura 46.

Figura 46

Constante de Hazen – Williams para diversos materiales de tubería

Material, clase y estado del tubo	c
Tuberías de plástico nuevas	150
Tuberías muy pulidas (fibrocemento)	140
Tuberías de hierro nuevas y pulidas	130
Tuberías de hormigón armado	128
Tuberías de acero nuevas	120
Tuberías de palastro roblonado nuevas	114
Tuberías de acero usadas	110
Tuberías de fundición nuevas	100
Tuberías de palastro roblonado usadas	97
Tuberías de fundición usadas	90-80

Nota: fuente (Universidad Tecnológica Nacional, 2020)

Reemplazando en la ecuación (27) se obtiene:

$$H_{fs} = \frac{10.203 - 3.0 - 0.198 + (26.656 + 2.675)}{1 + \frac{(150)^{1.852} 0.0544^{4.87}}{10.67 * (\frac{1.83}{1000})^{1.851}}}$$

$$H_{fs} = 0.437m$$

Luego se determinó la altura de succión máxima, según la siguiente relación

$$H_s < H_{atm} - (NPSH_{req.} + H_{vap} + H_{fs})$$

$$H_s < 10.203 - (3.0 + 0.198 + 0.437)$$

$$H_s < 6.57 m$$

Para nuestro caso se está empleando una altura de succión de 1.505m, la cual cumple con la condición de altura de succión, con este dato se recalculará la pérdida de carga por succión mediante la siguiente ecuación de Hazen-Williams:

$$H_{fs} = 10.67 * \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852} \frac{\sum L_e}{D_s^{4.87}}$$

$$H_{fs} = 10.67 * \left(\frac{1.83}{150}\right)^{1.852} \frac{29.331}{0.0544^{4.87}}$$

$$H_{fs} = 0.3573 \text{ m}$$

Con el dato de la perdida por fricción en la succión se determinará la altura Neta de Succión Positiva disponible (NSPH):

$$NPSH_{disponible} = H_{atm} - H_{vap} - H_{fs} - H_s$$

$$NPSH_{disponible} = 10.203 - 0.198 - 0.3573 - 1.505$$

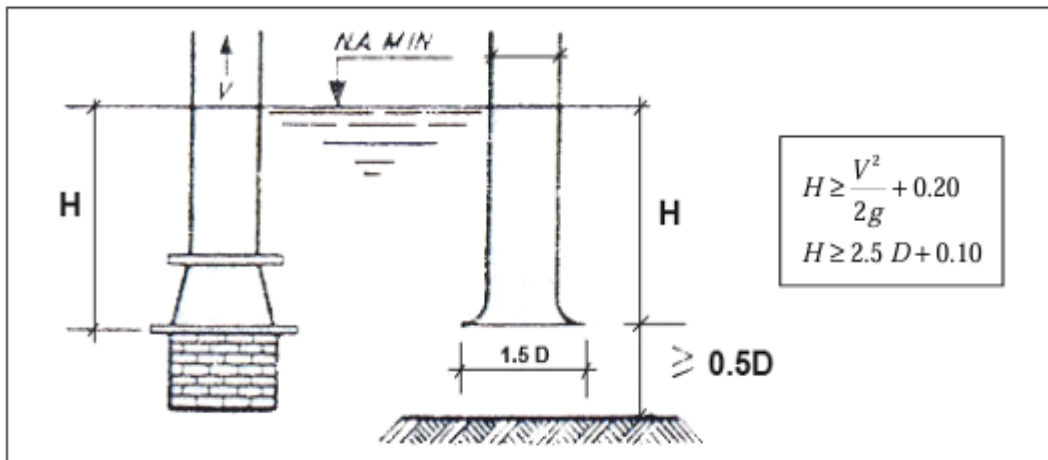
$$NPSH_{disponible} = 8.143 \text{ m}$$

3.5.3 Altura mínima de la tubería de succión

Es necesario para que un equipo de bombeo funcione correctamente, se debe evitar la entrada de aire, por ello es muy importante estimar la profundidad mínima la cual debe estar sumergida la tubería; dicha estimación se realiza considerando el máximo valor de las siguientes dos expresiones según la figura 47. (Organización panamericana de la salud, 2005)

Figura 47

Altura mínima de tubería sumergida para evitar ingreso de aire en la tubería de succión



Nota: fuente (Organización panamericana de la salud, 2005)

Reemplazando los valores de velocidad, gravedad y diámetro en las siguientes ecuaciones.

$$H \geq \left(\frac{V_s^2}{2 * g} \right) + 0.20$$

$$H \geq \left(\frac{0.621^2}{2 * 9.81} \right) + 0.20$$

$$H \geq 0.220 \text{ m}$$

$$H \geq 2.5 D_s + 0.10$$

$$H \geq 2.5(0.050) + 0.10$$

$$H \geq 0.225 \text{ m}$$

De los dos resultados, se considera que la altura mínima la cual debe estar sumergida la tubería es 0.225 m, por lo tanto, se consideró que la longitud del tubo sumergido dentro del tanque de agitación sea de 1.105m, separado 1.5 cm del fondo de tanque.

- **Perdida de carga de la impulsión.**

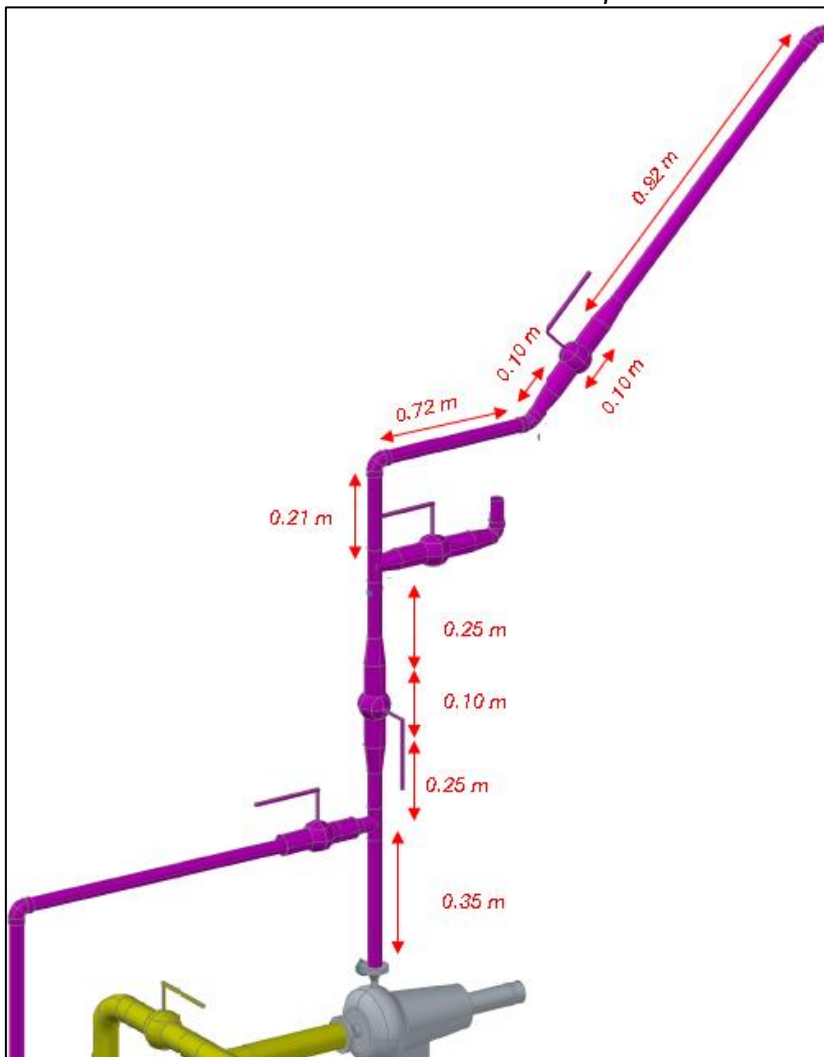
La pérdida por carga de la impulsión se determina mediante relación de Hazen-Williams:

$$H_{fi} = 10.67 * \left(\frac{Q}{C} \right)^{1.852} \frac{\sum L_e + L_i}{D_i^{4.87}} \quad (28)$$

De igual forma se realizó la distribución de la tubería de la impulsión (desde la bomba hasta el tanque de sedimentación) sigue la siguiente distribución que se muestra en la figura 48.

Figura 48

Diseño de la distribución de la tubería en la impulsión de la bomba



De la figura 48, se tiene que la longitud de impulsión es 2.80 m, en base a los accesorios considerados se estimó en la tabla 17 la longitud equivalente de los accesorios en la sección de impulsión.

Tabla 17

Longitud equivalente de los accesorios en la sección de impulsión

Accesorios	Cantidad	K	Le=K*D
Tubo en T	2	20	1.176
llave globo de 1"	2	340	19.992
Codo estándar de 90° de 1"	1	30	0.882
Codo estándar de 45° de 1"	2	16	0.941
Total			22.991

Reemplazando en la ecuación (28)

$$H_{fi} = 10.67 * \left(\frac{1.83}{150} \right)^{1.852} \frac{22.991 + 2.80}{0.0294^{4.87}}$$

$$H_{fi} = 6.29 \text{ m}$$

- Estimación de la carga dinámica o altura manométrica total

La altura manométrica representa la energía necesaria para transferir el fluido desde el punto de succión hasta el tanque de descarga, está definida por la carga de succión más la carga de impulsión.

$$H_m = H_i + H_s + H_{fs} + H_{fi}$$

Reemplazando los valores en la ecuación anterior.

$$H_m = 2.09 + 1.505 + 0.3573 + 6.29$$

$$H_m = 10.24 \text{ mca}$$

3.5.4 Estimación de la curva característica del sistema

La curva característica del sistema queda definida mediante la ecuación (29):
(Karassik. Igor et al., 2008)

$$H_m = M + K * Q^{1.852} \quad (29)$$

Donde:

H_m : Altura manométrica (m)

M : Es la altura estática de descarga y la altura de succión

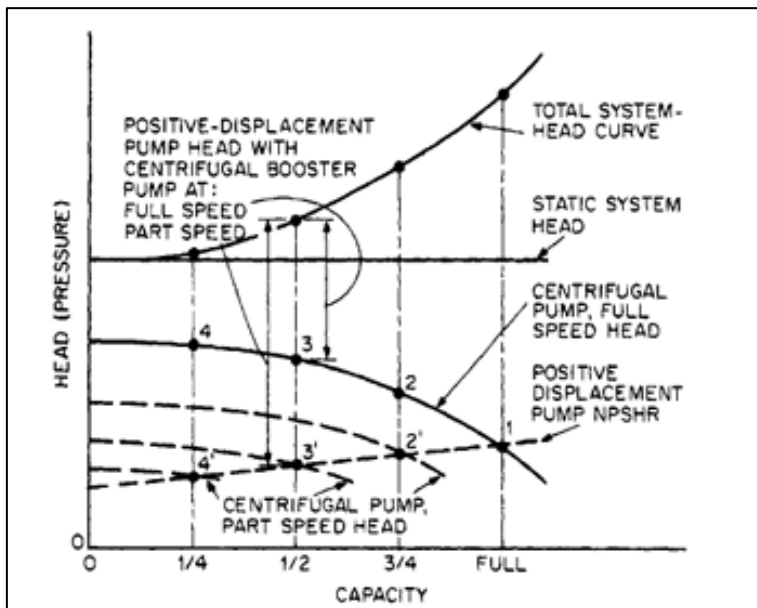
K : Coeficiente de pérdida de carga (en metros por unidad de flujo)

Q : Caudal (L/s)

Como se puede apreciar en la figura 49 la constante M , es la suma de la altura estática de descarga y la altura de succión.

Figura 49

Curva característica del sistema de bombeo



Nota: fuente (Karassik, Igor et al., 2008)

$$M = H_i + H_s$$

$$M = 2.09 + 1.505 = 3.60$$

La determinación de la constante K se realiza por medio de la ecuación de Hazen-Williams:

$$K = 10.67 * \left(\frac{1}{C_s}\right)^{1.852} \frac{(\sum L_e + L_s)}{D_s^{4.87}} + 10.67 * \left(\frac{1}{C_i}\right)^{1.852} \frac{(\sum L_e + L_i)}{D_i^{4.87}}$$

$$K = 10.67 * \left(\frac{1}{150}\right)^{1.852} \frac{29.331}{0.0544^{4.87}} + 10.67 * \left(\frac{1}{150}\right)^{1.852} \frac{25.79}{0.0294^{4.87}}$$

$$K = 780997.15$$

Reemplazando los valores en la ecuación de curva característica del sistema se obtuvo lo siguiente:

$$H_m = 3.60 + 780997.15 * Q^{1.852}$$

En la tabla 18 se realizó la tabulación de la altura manométrica a diferentes caudales desde 0 a 5.0 l/s y se graficó en la figura 50.

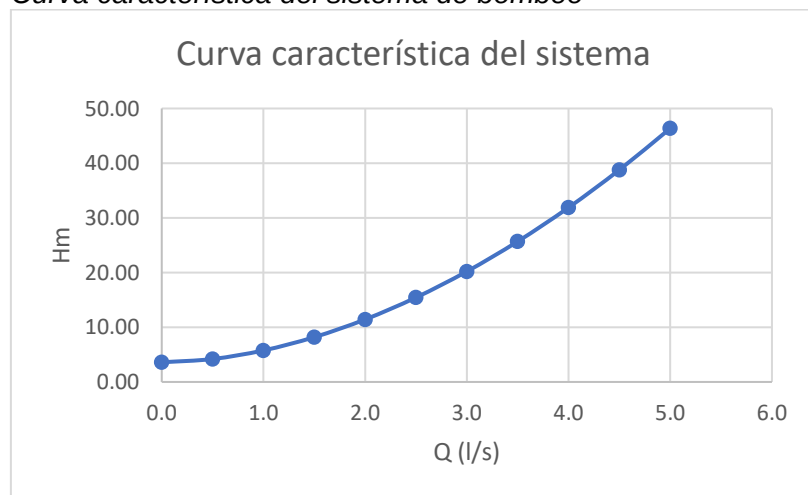
Tabla 18

Tabulación de los resultados de altura manométrica a diferentes caudales

Q(L/s)	Hm (m)
0.0	3.60
0.5	4.20
1.0	5.77
1.5	8.20
2.0	11.43
2.5	15.44
3.0	20.20
3.5	25.69
4.0	31.89
4.5	38.78
5.0	46.37

Figura 50

Curva característica del sistema de bombeo



3.5.5 Determinación de la potencia de la bomba

La potencia suministrada al sistema se calcula a partir de la altura manométrica y el caudal, mediante la siguiente expresión. (Perry & Green, 2008)

$$P_{Hp} = \frac{Q * \rho * g * Hm}{746 * \eta}$$

Donde:

P_{Hp} : Potencia de la bomba (HP).

Q : Caudal (L/s).

ρ : Densidad del líquido (kg/m³).

g : Aceleración de la gravedad, aproximadamente 9.81 m/s².

Hm : Altura manométrica (m).

η : Eficiencia de la bomba, la bomba seleccionada debe impulsar el agua con una eficiencia mayor al 50%. (Organización panamericana de la salud, 2005)

$$P_{Hp} = \frac{\left(\frac{1.83}{1000}\right) * 998 * 9.81 * 10.24}{746 * 0.50}$$

$$P_{Hp} = 0.49 Hp$$

Requerimiento de la bomba

Caudal (Q): 1.83 l/s

Altura manométrica (Hm): 10.24 m

NPSH disponible: 8.14 m

Rendimiento min: 50 %

Potencia mínima de la bomba: 0.49 Hp $\approx$ 365.39 W

3.5.6 Selección de la bomba

Según los requisitos establecidos en el ítem anterior, se evaluó diferentes bombas encontrando que el siguiente modelo se acerca a los requisitos establecidos:

Tipo de Bomba: C 4/1/A

Potencia: 0.75 Hp

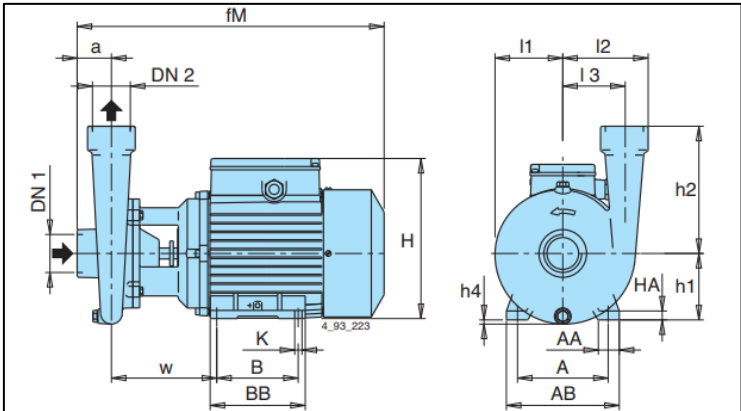
Revoluciones: 2900 rpm

Dimensiones: las dimensiones están establecidas en la siguiente figura 51 y en la

Tabla 19.

Figura 51

Vistas de la Bomba centrífuga



Nota: fuente (Calpeda, 2024)

Tabla 19

Dimensiones de la bomba centrífuga

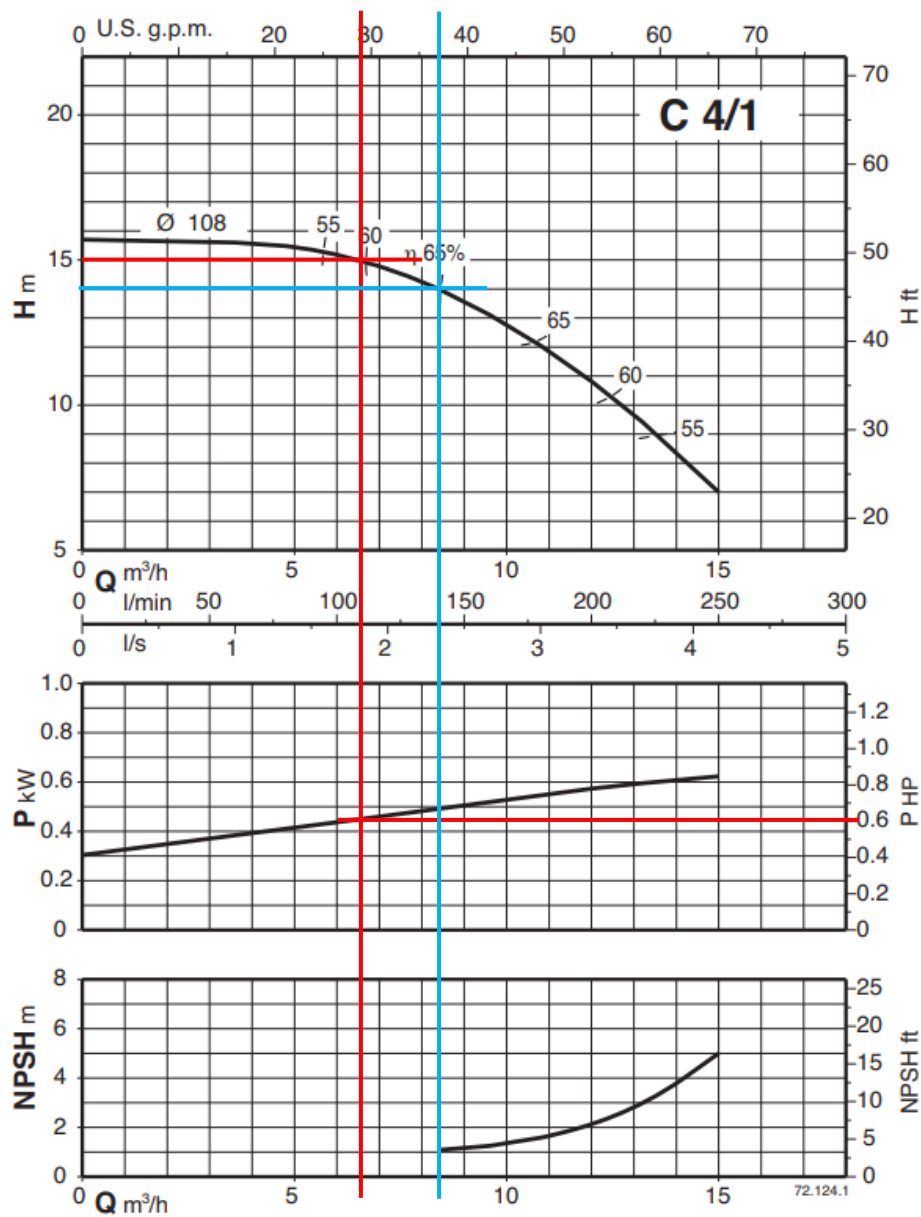
Tipo	DN1	DN2	mm																
C 4/1/A	1 ½"	1 ½"	a	fM	h1	h2	H	h4	BB	B	AB	A	AA	K	l1	l2	l3	w	HA
			43	304	71	160	182	18	106	90	134	112	22	7	85	108	78	100	10

Nota: fuente (Calpeda, 2024)

Del catálogo del productor se extrajo la curva característica de la bomba, el cual se muestra en la figura 52, asimismo se realizó la evaluación de las condiciones requeridas por el sistema.

Figura 52

Curvas características de la bomba



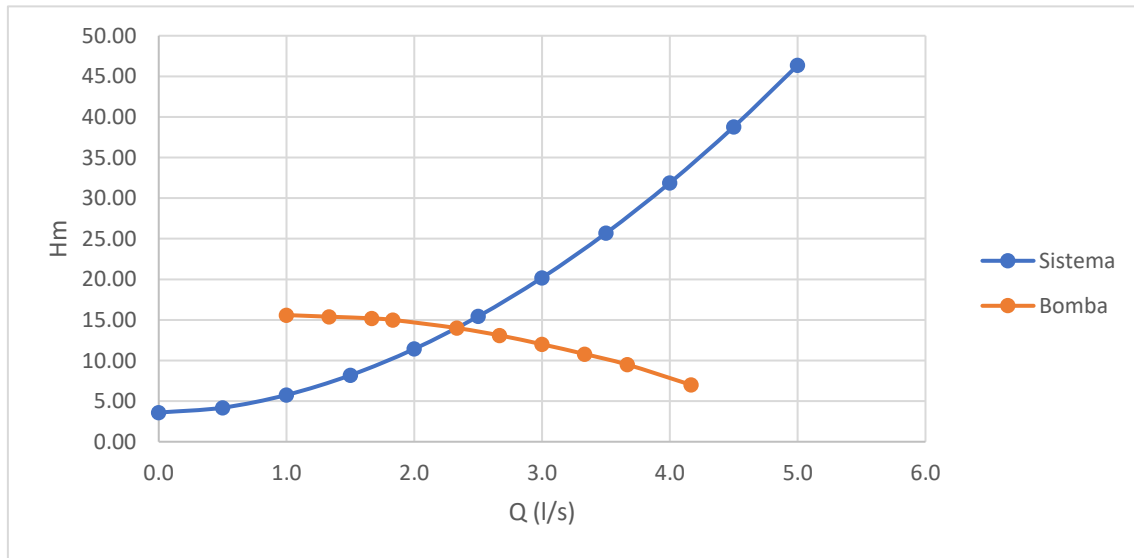
Nota: fuente (Calpeda, 2024)

De la figura anterior se observa que para un flujo aproximado de 1.8 L/s, se obtiene una eficiencia mayor de 50% y una altura manométrica de 15 m, cumpliendo con los requisitos solicitados por el diseño de la bomba.

Asimismo, en la figura 53, se determinó el punto de operación para el sistema de bombeo implementado.

Figura 53

Punto de operación del sistema de bombeo



Determinando que el sistema trabajará con un caudal de 2.3 l/s, una altura manométrica de 14.0 m y 65% de eficiencia.

3.5.7 Distribución de las tuberías

Distribución de las tuberías en el reciclo

Debido a que se ha considerado un solo tanque de agitación, es necesario la implementación de un ducto de reciclo, el cual mediante el juego de llaves llevará el agua residual industrial almacenada en el tanque ecualizador hacia el tanque de agitación para su posterior tratamiento, la distribución de las tuberías se detalla en la figura 54 y figura 55, para los cuales en la sección de impulsión se consideró un tubo de PVC de 1" y un tubo de PVC de 2" de diámetro para la sección de succión.

Figura 54

Distribución de la tubería para el reciclo (zona de impulsión)

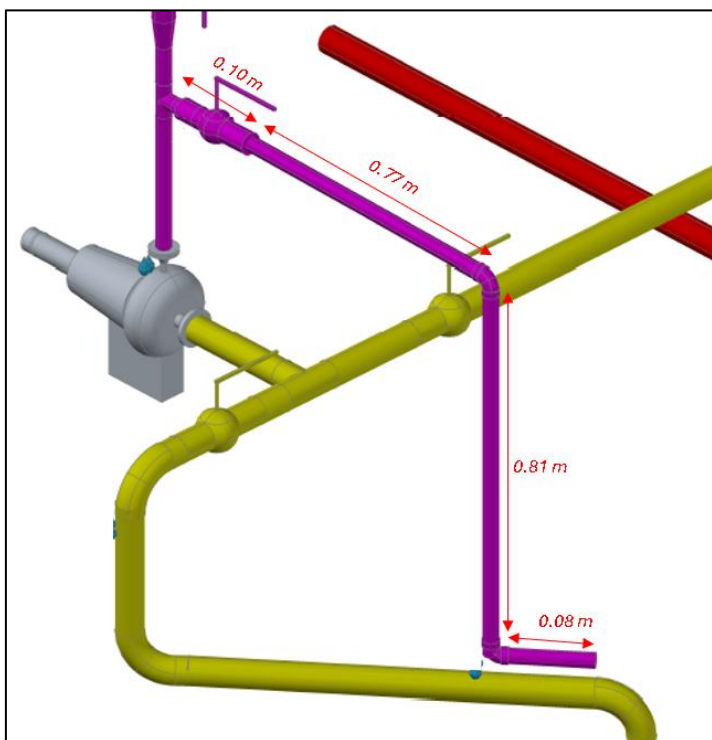
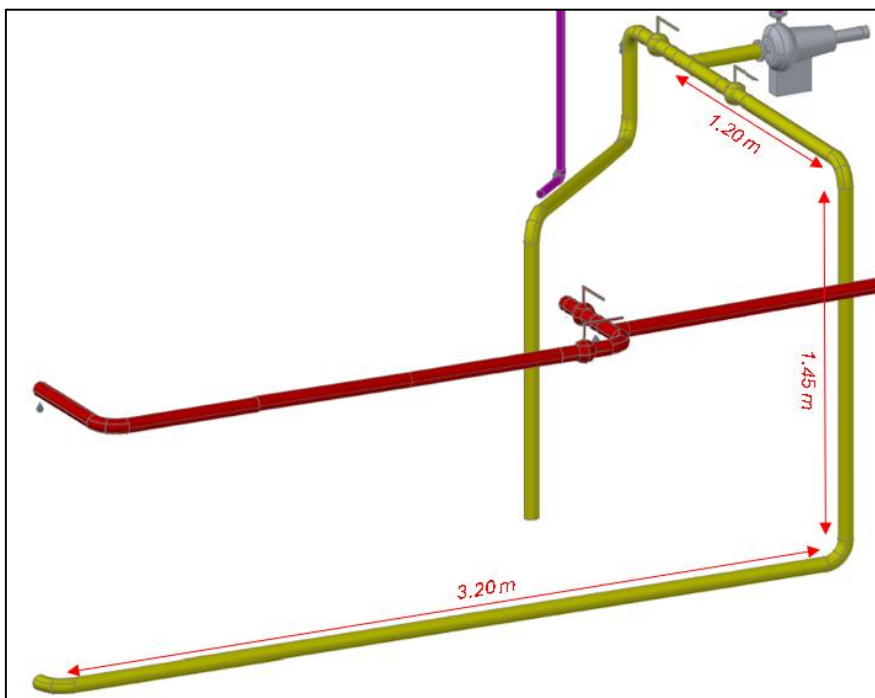


Figura 55

Distribución de la tubería para el reciclo (zona de succión)

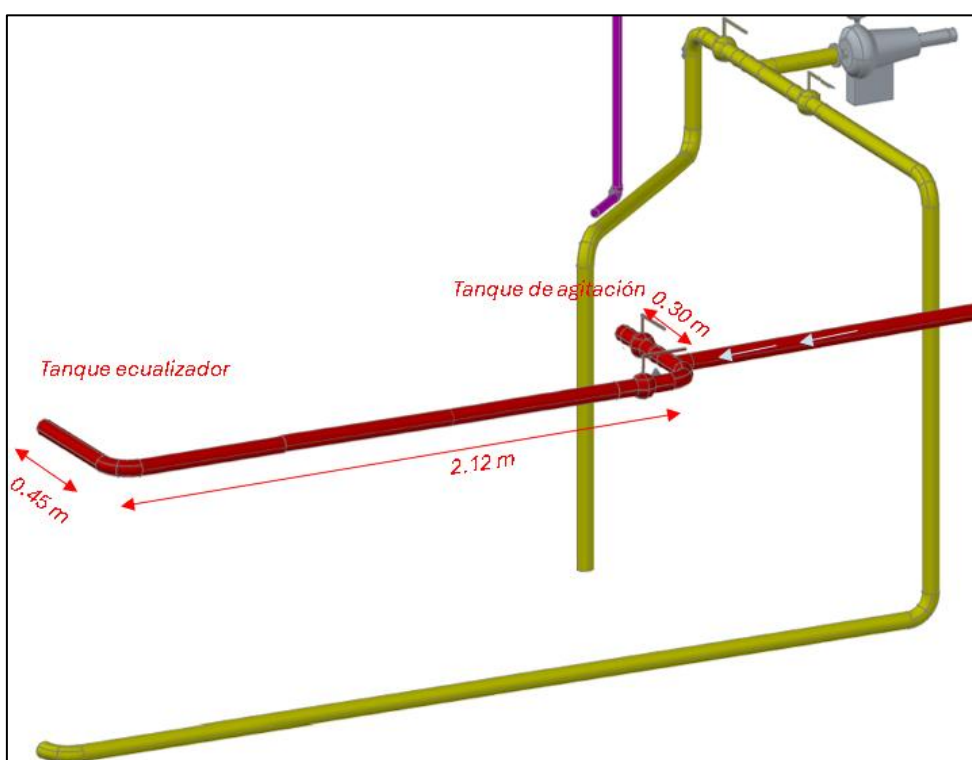


Distribución de las tuberías para el ingreso del Agua residual

Para el ingreso del agua residual a la planta piloto se consideró utilizar un tubo de PVC de 2" de diámetro, además se agregó 2 llaves de control, ya que en caso el tanque esté en funcionamiento, se cerraría la llave del tanque de agitación y se abriría el ingreso al tanque ecualizador para almacenar el agua hasta culminar el tratamiento, como se puede observar en la figura 56.

Figura 56

Distribución de la tubería para el ingreso del agua residual a la planta piloto

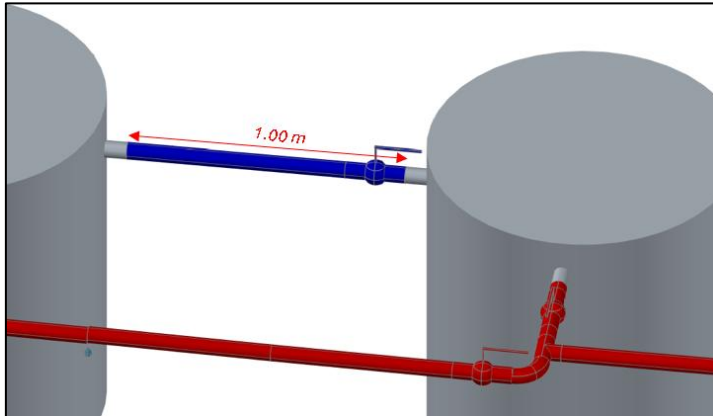


Distribución de las tuberías para el control de reboce

Se instaló una tubería de PVC de 2" de diámetro que conecta el tanque de agitación con el tanque ecualizador, posicionado una altura de 158 mm del nivel superior en ambos tanques, con la finalidad que en caso el nivel del líquido superara el establecido por diseño, este se transfiera al tanque ecualizador como almacenamiento, en la figura 57 se establece la longitud de la tubería entre ambos tanques y una válvula globo de control.

Figura 57

Tubería de unión entre el tanque agitado y el tanque ecualizador

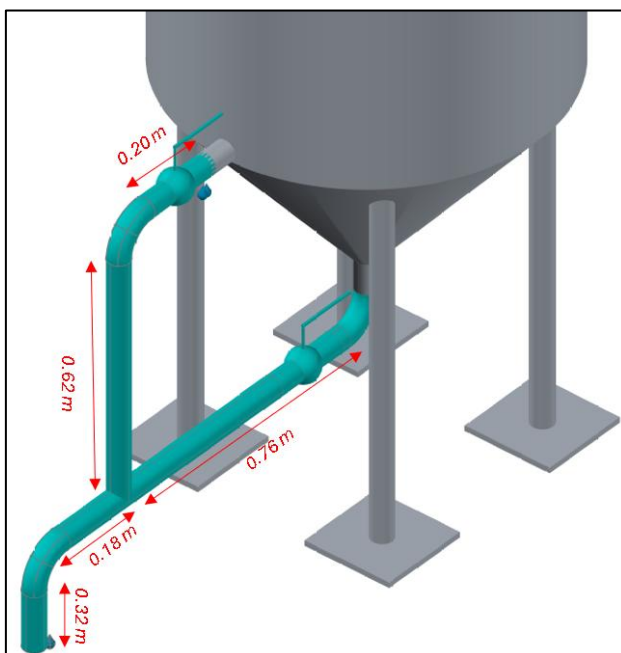


Distribución de la tubería para la salida del sedimentador

Se instaló dos tuberías de PVC de 2" en el sedimentador, una para la salida del agua sin sedimento y la otra para recolectar los lodos, en la figura 58, se puede observar que están unidas mediante un accesorio T, su funcionamiento es en serie, inicialmente se descarga el agua clarificada al abrir la válvula superior, luego se extraen los lodos al abrir la válvula ubicada en la parte inferior del cono.

Figura 58

Distribución de la tubería a la salida del sedimentador



Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Resultados descriptivos

4.1.1 Resultados de las características fisicoquímicas del agua residual del laboratorio de servicio.

Según los análisis realizados a la muestra de agua residual, se describió en la tabla 20 las características fisicoquímicas antes del tratamiento de coagulación y floculación con el sulfato férrico y el polímero aniónico respectivamente.

Tabla 20

Caracterización fisicoquímica del agua residual antes del tratamiento

Parámetros	Unidad	Resultado	Limite
Potencial Hidrógeno	Unidad	4.61	6-9
Temperatura	°C	20.31	<35
Turbidez	NTU	37.7	---
Sólidos sedimentables	ml/l	3.5	8.5
Sólidos suspendidos totales	mg/l	72	500
Aluminio (Al)	mg/l	0.89	10
Arsénico (As)	mg/l	<0.003	0.5
Boro (B)	mg/l	0.650	4
Cadmio (Cd)	mg/l	<0.001	0.2
Cromo (Cr)	mg/l	0.016	10
Cobre (Cu)	mg/l	0.223	3
Manganeso (Mn)	mg/l	0.080	4
Mercurio	mg/l	0.015	0.02
Níquel	mg/l	0.015	4
Plomo	mg/l	14.91	0.5
Zinc	mg/l	0.327	10
Sulfatos	mg/l	140.8	1000
Sulfuros	mg/l	<0.0010	5

De los resultados mostrados en el cuadro anterior se puede observar que el agua residual presenta un carácter ácido y un alto contenido de plomo, estos dos parámetros están fuera de los valores máximos admisibles.

4.1.2 Resultados descriptivos del tratamiento a nivel laboratorio

Al realizar las pruebas de coagulación y floculación a nivel laboratorio, se registró los parámetros de Plomo, Turbidez, pH final y volumen de lodos encontrándose estos datos en el anexo 1.

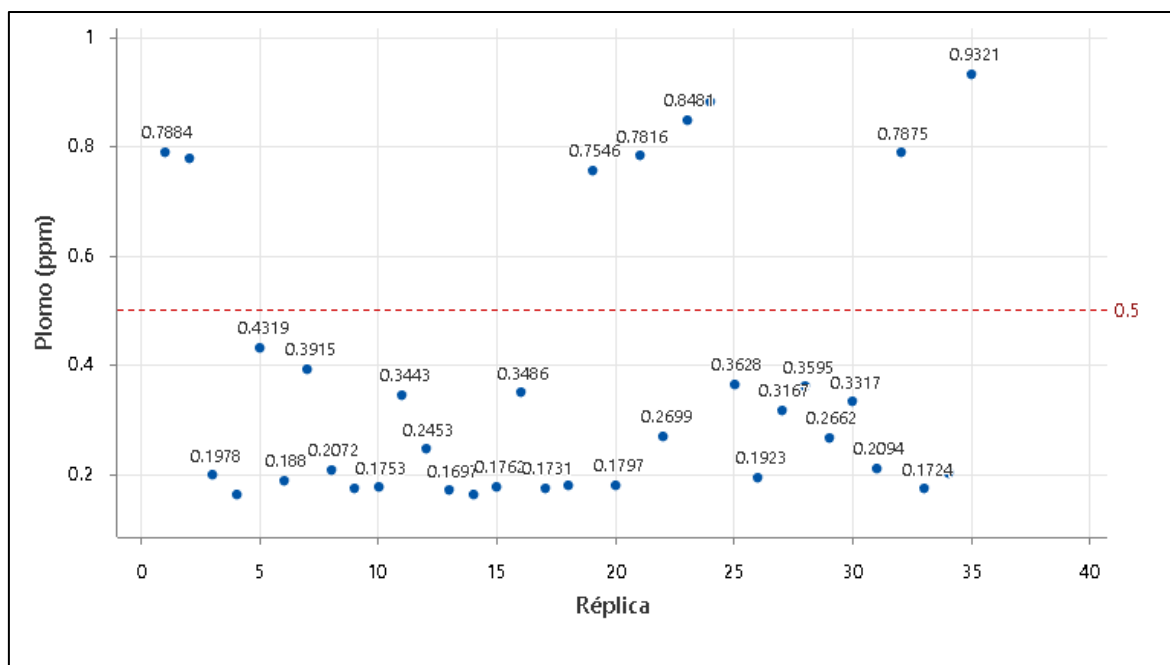
Cada una de las variables dependientes tiene diferente comportamiento respecto a las variables independientes:

Resultados descriptivos del Plomo.

Los datos recolectados de plomo presentan una media de 0.37 ppm entre las 35 réplicas experimentales, asimismo en la figura 59 se puede observar que algunos tratamientos evidencian trazas de plomo superior al valor máximo admisible de 0.5 mg/l.

Figura 59

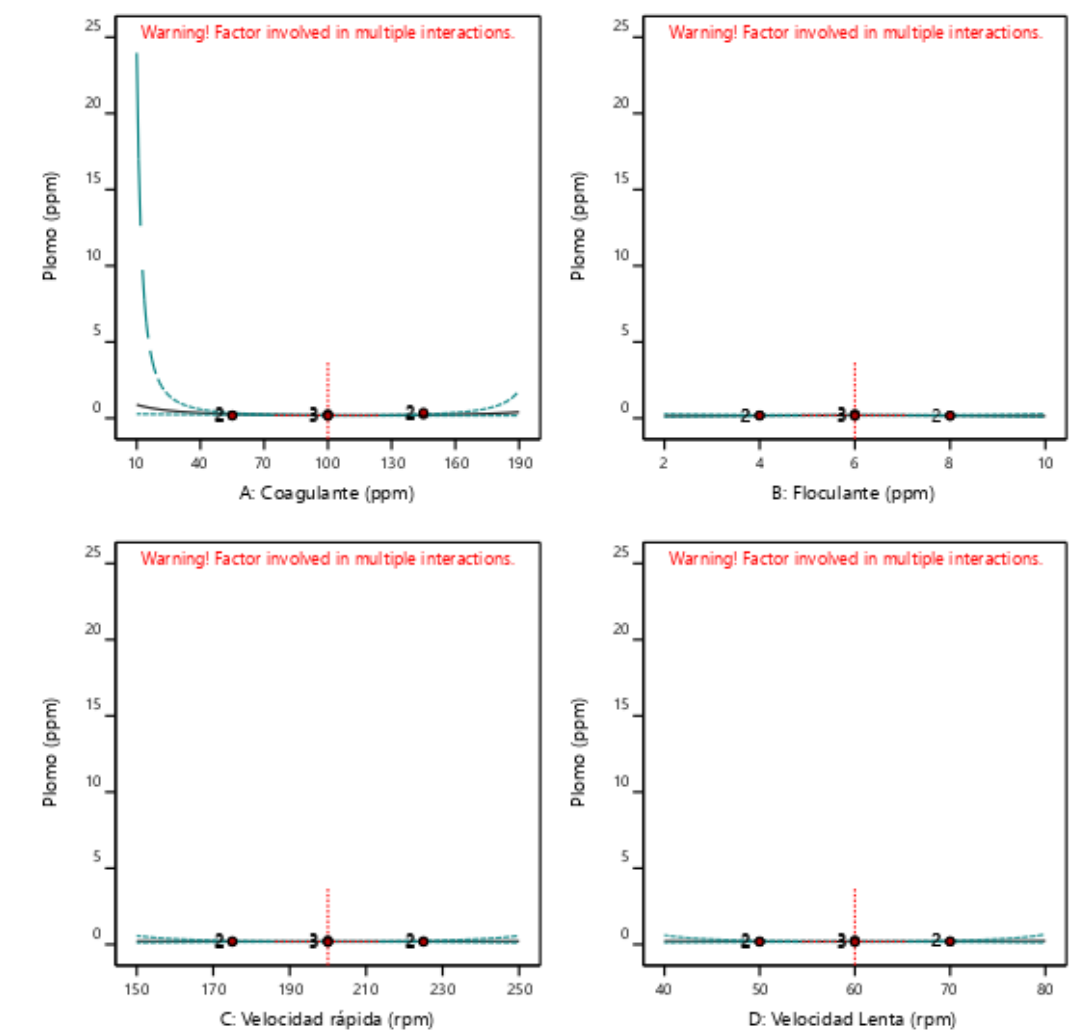
Resultados descriptivos de plomo



Asimismo, en la figura 60, se observa que al aplicar bajas y altas dosis de coagulante se obtienen altos valores de plomo, estableciéndose aparentemente un valor óptimo de remoción a una dosis de coagulante aproximada de 100 ppm.

Figura 60

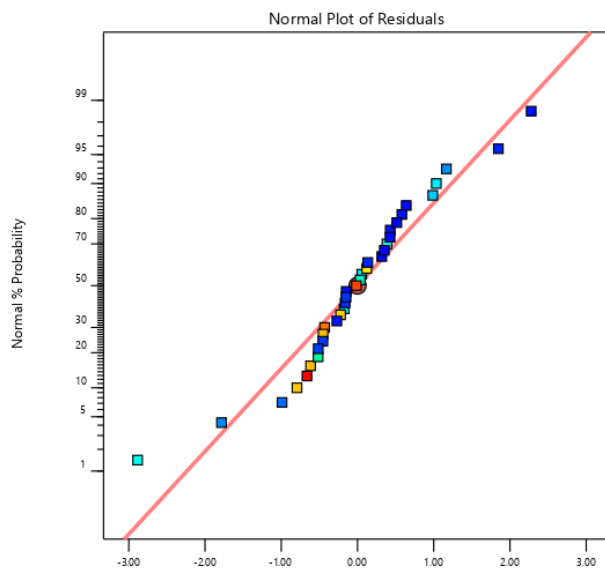
Evaluación de las variables de operación respecto a la remoción de plomo.



Asimismo se evaluó los resultados de la prueba experimental mediante el diseño central compuesto empleando el software Desing Expert 12 y el software Minitab 19, se realizó la evaluación de la normalidad de los residuos, en la figura 61 se observa que los datos no presentan desviaciones significativas con la recta de la normalidad, asimismo cuando se evaluó los datos en el software Minitab se obtuvo un p-valor > 0.05 , al cumplir el supuesto de normalidad se efectuó el análisis por medio del análisis de varianza.

Figura 61

Prueba de normalidad de los valores de plomo

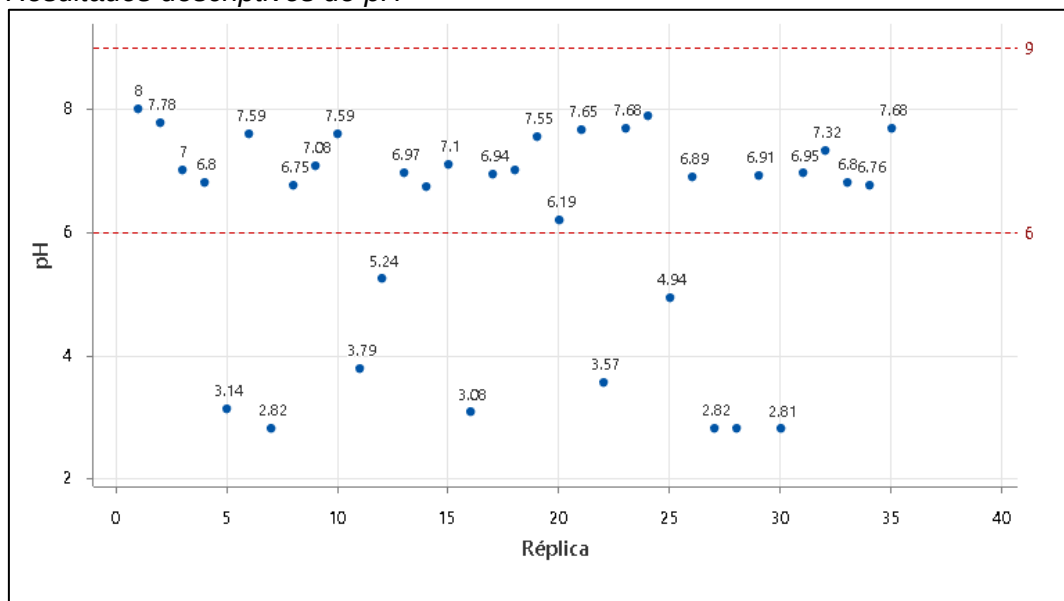


Resultados descriptivos del pH final del agua.

Los datos recolectados del pH del agua tratada presentan una media de 7.59 entre las 35 réplicas experimentales, asimismo en la figura 62 se puede observar que en algunos tratamientos los valores de pH están por debajo de las 6 unidades de pH.

Figura 62

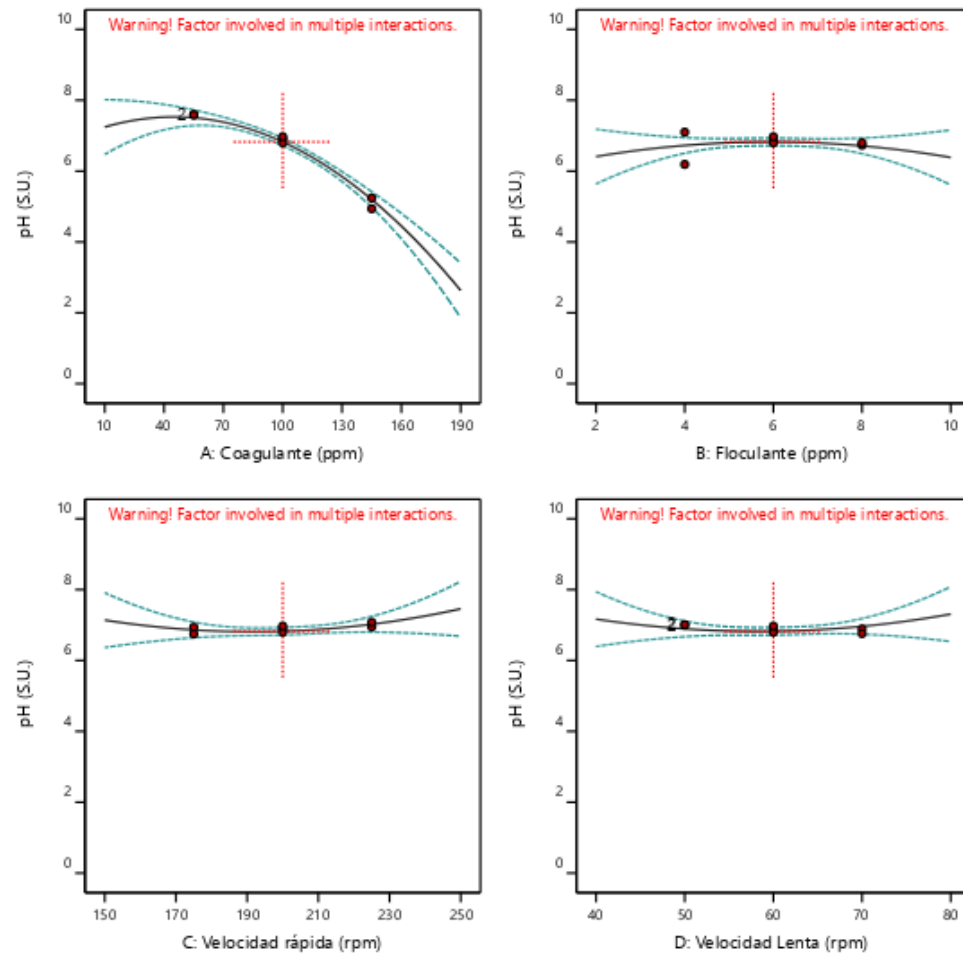
Resultados descriptivos de pH



En la figura 63, al evaluar cada una de las variables de operación independientemente se observa que la dosis del coagulante tiene una relación inversa con el pH del agua luego del tratamiento, mientras que la velocidad de agitación rápida no tiene un comportamiento tan marcado sobre la variable dependiente pH.

Figura 63

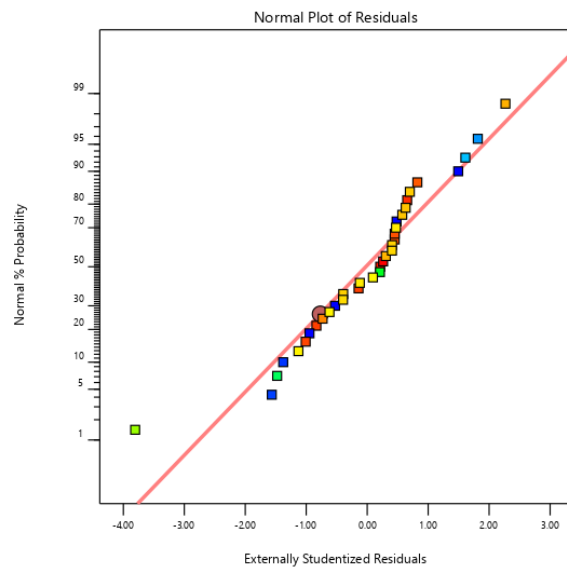
Evaluación de las variables de operación respecto al pH.



Mediante el software Desing Expert 12 y el software Minitab 19, se realizó la evaluación de la normalidad de los residuos, en la figura 64 se observa que los datos no presentan desviaciones significativas con la recta de la normalidad, asimismo cuando se evaluó los datos en el software Minitab se obtuvo un p-valor > 0.05 , al cumplir el supuesto de normalidad se efectuó el análisis por medio del análisis de varianza.

Figura 64

Prueba de normalidad de los valores de pH.

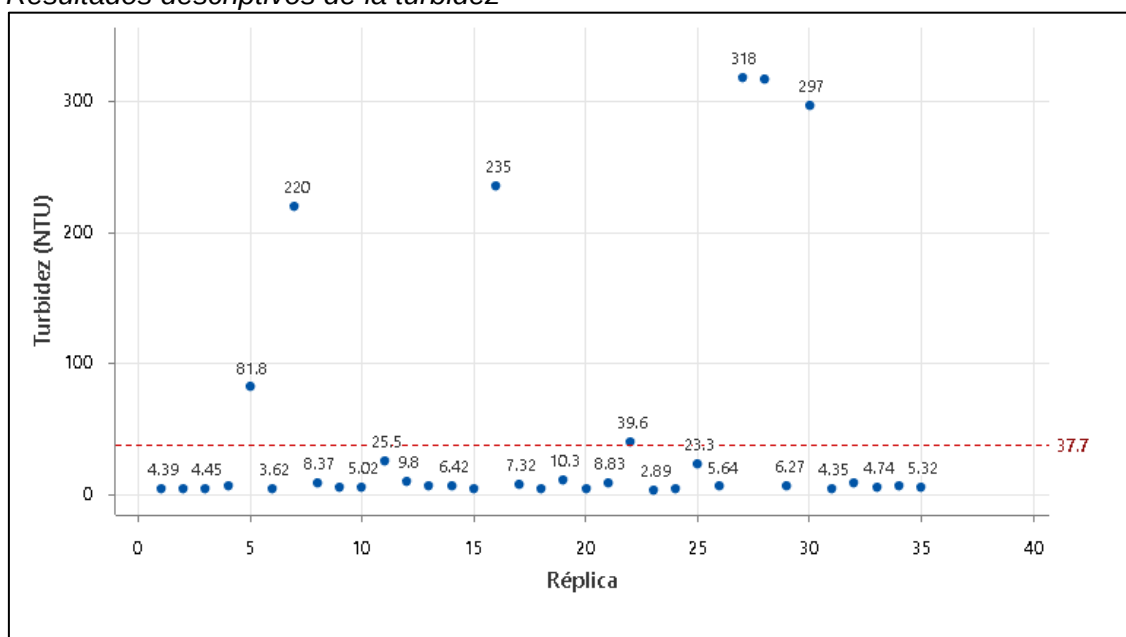


Resultados descriptivos de la turbidez.

Los datos recolectados de la turbidez del agua tratada presentan una media de 48.732 NTU y una mediana 6.27 NTU entre las 35 réplicas experimentales, asimismo en la figura 65 se puede observar que el 80% de los tratamientos presentan una turbidez menor a la turbidez inicial del agua de 37.7 NTU.

Figura 65

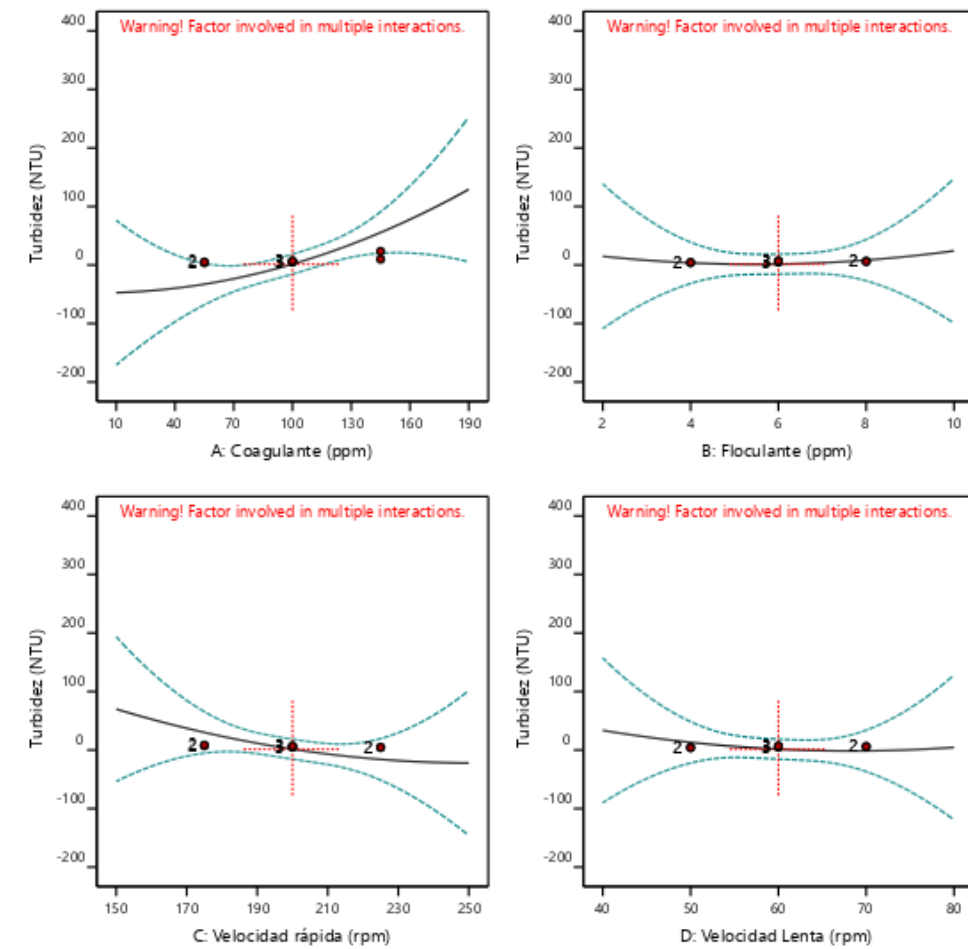
Resultados descriptivos de la turbidez



En la figura 66, al evaluar cada una de las variables de operación independientemente se observa que la dosis del coagulante tiene una relación directamente proporcional de forma cuadrática con la turbidez, mientras que la velocidad de agitación rápida tiene una relación inversamente proporcional con la turbidez.

Figura 66

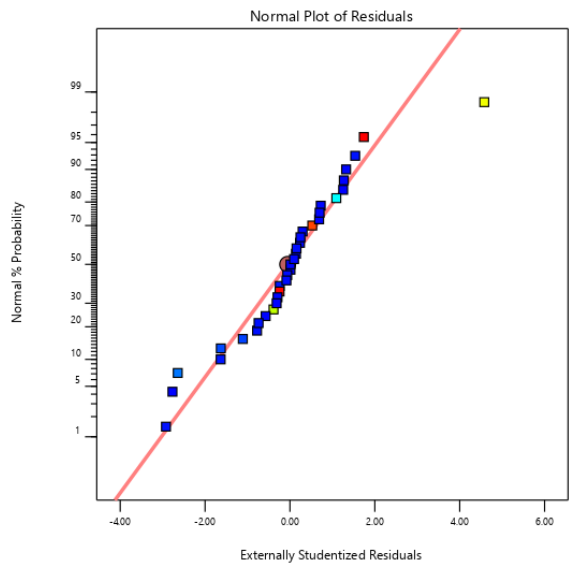
Evaluación de las variables de operación respecto a la turbidez.



Del software Desing Expert 12 y minitab 19, se realizó la evaluación de la normalidad de los residuos, en la figura 67 se observa que los datos no presentan desviaciones significativas con la recta de la normalidad, asimismo cuando se evaluó los datos en el software Minitab se obtuvo un p-valor > 0.05 , cumpliendo el supuesto de normalidad.

Figura 67

Prueba de normalidad de los valores turbidez (NTU).

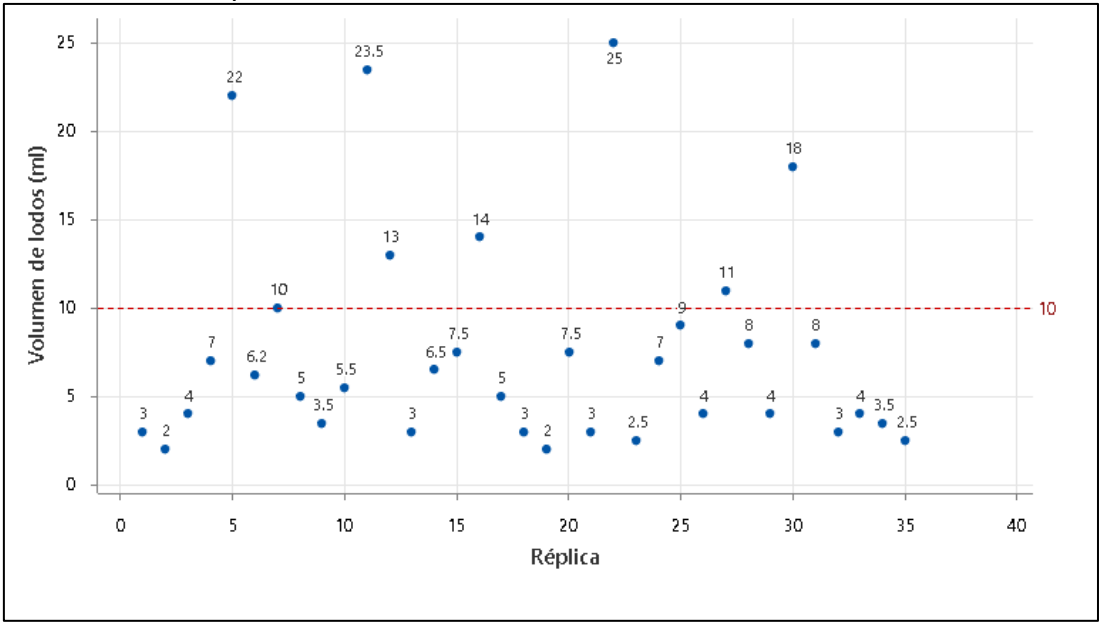


Resultados descriptivos del volumen de lodos.

Los datos recolectados del volumen de lodos presentan una media de 7.5914 ml y entre las 35 réplicas experimentales, asimismo en la figura 68 se puede observar que el 77% de los tratamientos presentan volúmenes de lodos por debajo de 10 ml.

Figura 68

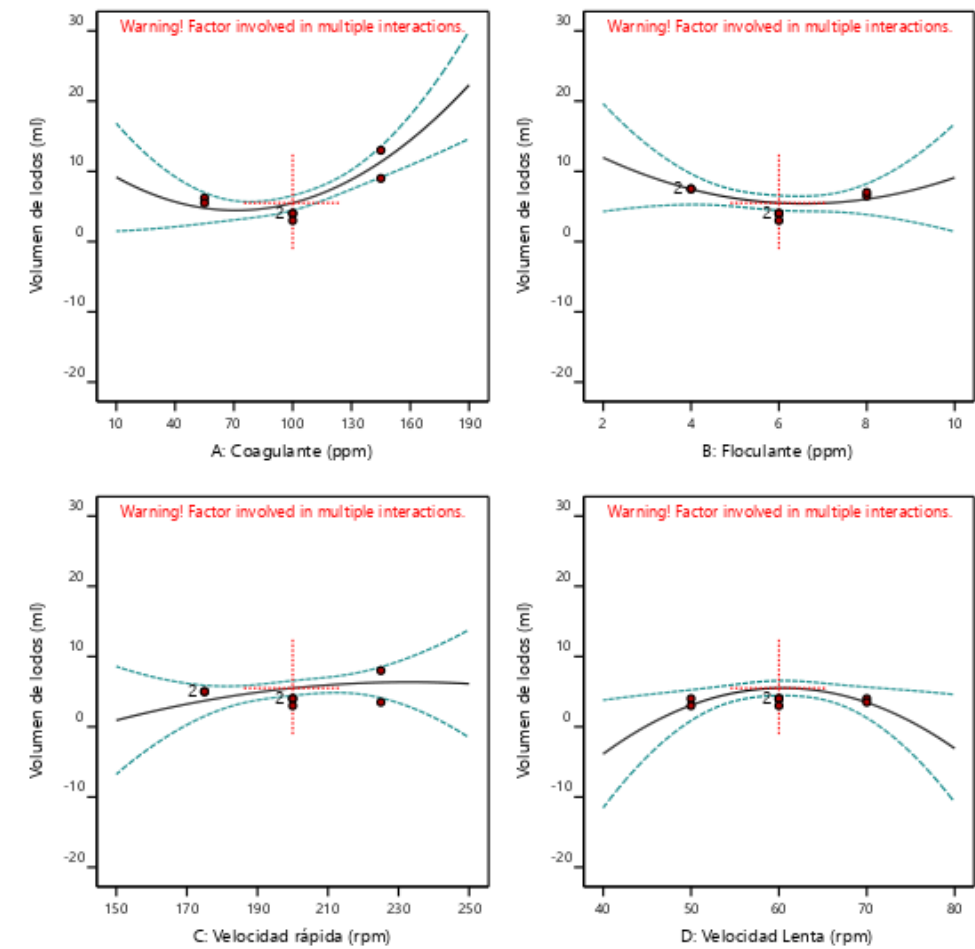
Resultados descriptivos de la turbidez



En la figura 69, al evaluar independientemente las variables operacionales se observa que la dosis del coagulante y floculante tienen un comportamiento parabólico, mientras que las velocidades de agitación rápida y lenta tienden a un comportamiento parabólico invertido.

Figura 69

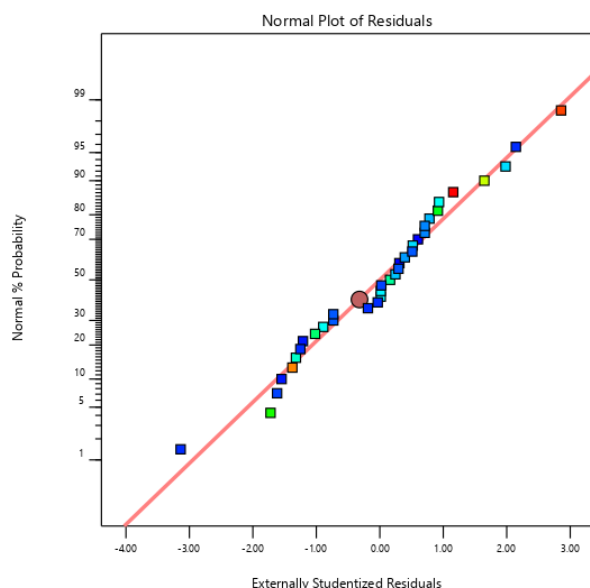
Evaluación de las variables de operación respecto al volumen de lodos.



En la figura 70 se observa que los datos no presentan desviaciones significativas con la recta de la normalidad, asimismo cuando se evaluó los datos en el software Minitab se obtuvo un $p\text{-valor} > 0.05$, cumpliendo el supuesto de normalidad se efectuó el análisis por medio del análisis de varianza.

Figura 70

Prueba de normalidad de los valores de volumen de lodos generados.



4.1.3 Resultados descriptivos de la comprobación de los parámetros óptimos

Posterior a las 35 pruebas experimentales se realizaron 8 réplicas a nivel laboratorio con los parámetros óptimos especificados en la tabla 25, cuantificando el contenido de plomo, el volumen de lodos, turbidez y pH, en la tabla 21 se muestra los valores de estas variables medidas.

Tabla 21

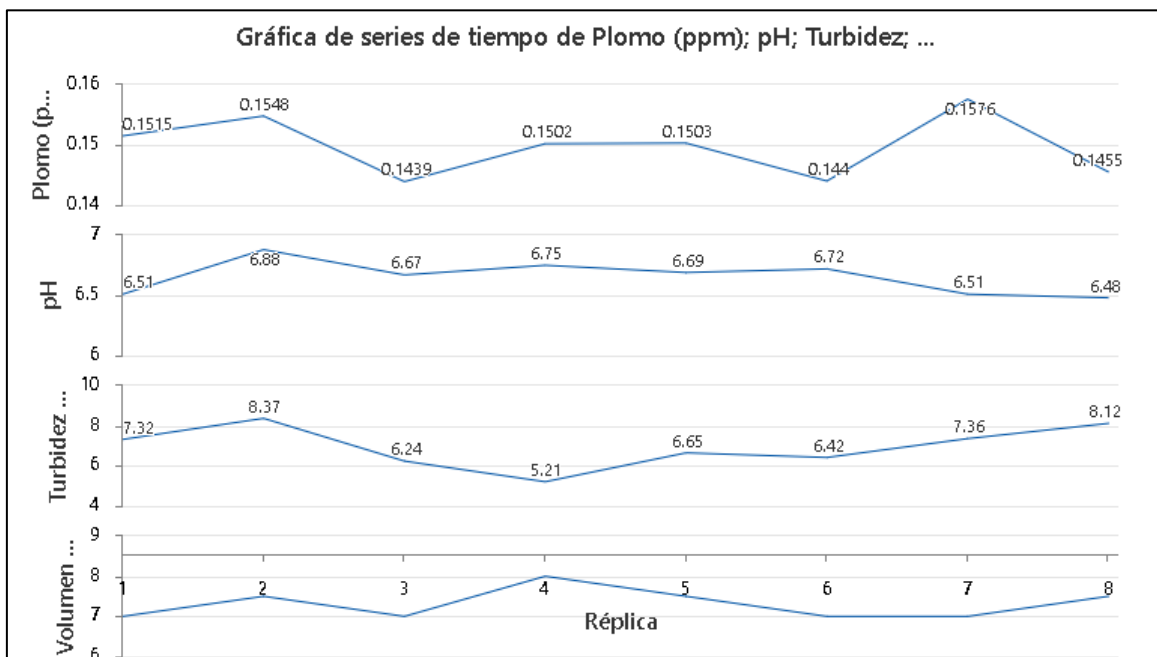
Resultados de las variables dependientes empleando los parámetros óptimos

Nº replica	Plomo (ppm)	Remoción de plomo (%)	Volumen de lodos (ml)	Turbidez (NTU)	pH
1	0.1515	98.98	7.0	7.32	6.51
2	0.1548	98.96	7.5	8.37	6.88
3	0.1439	99.03	7.0	6.24	6.67
4	0.1502	98.99	8.0	5.21	6.75
5	0.1503	98.99	7.5	6.65	6.69
6	0.1440	99.03	7.0	6.42	6.72
7	0.1576	98.94	7.0	7.36	6.51
8	0.1455	99.02	7.5	8.12	6.48

Al evaluar los resultados se puede observar en la figura 71 que al mantener constantes los parámetros óptimos de operación, las variables dependientes como el pH y el plomo se encuentran dentro de los valores máximos admisibles, asimismo, la turbidez tiene un valor promedio de 6.961 NTU, siendo este valor 5 veces menor que el valor inicial de turbidez, asimismo el volumen de lodos producidos se mantiene por debajo de los 10 ml.

Figura 71

Datos descriptivos de la comprobación de los parámetros óptimos



Por otro lado, en la figura 72 se evaluó la distribución de la normalidad de los datos, donde se encontró que las variables de plomo, pH y turbidez presentan una distribución paramétrica o normal, ya que su p-valor es mayor a 0.05, mientras que el volumen de lodos presenta un comportamiento no normal, ya que presenta un valor menor a 0.05, esto se debe a que las magnitudes de volumen medidas en el cono imhoff son valores discretos, asimismo se evaluó la distribución de la normalidad del porcentaje de remoción de plomo en la figura 73 se puede observar que los datos obtenidos son normales.

Figura 72

Evaluación de la normalidad de la comprobación de los parámetros óptimos

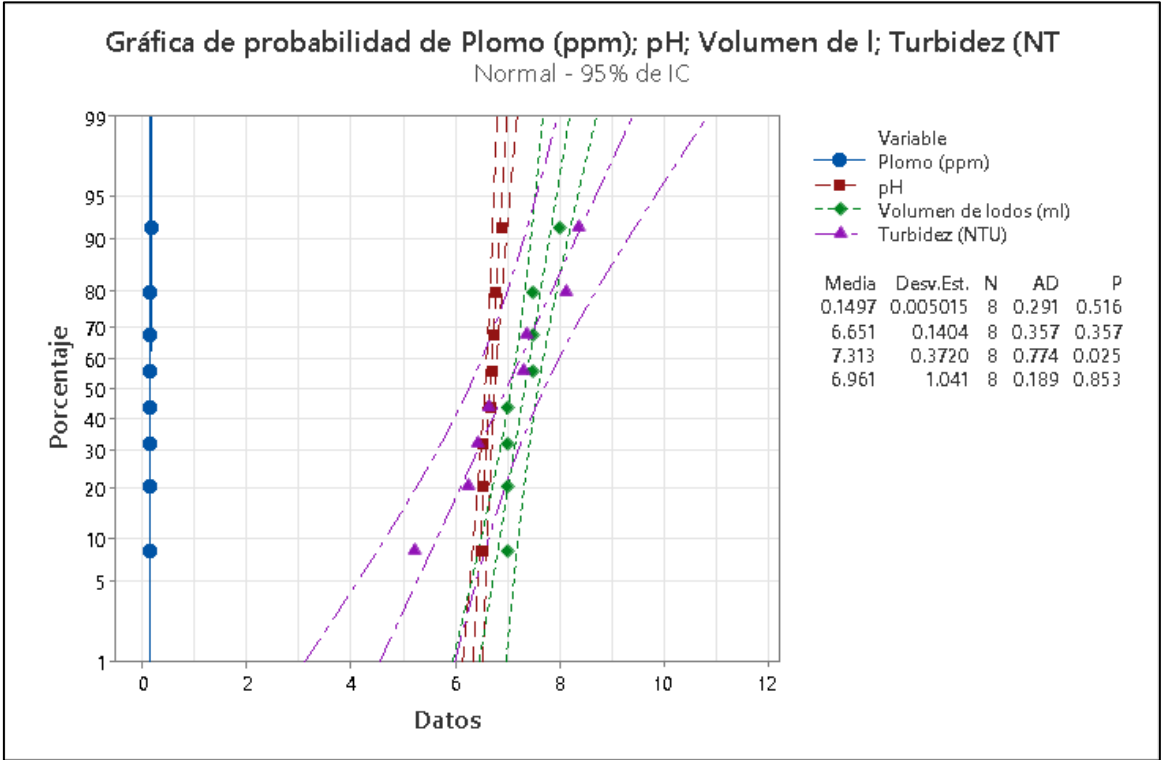
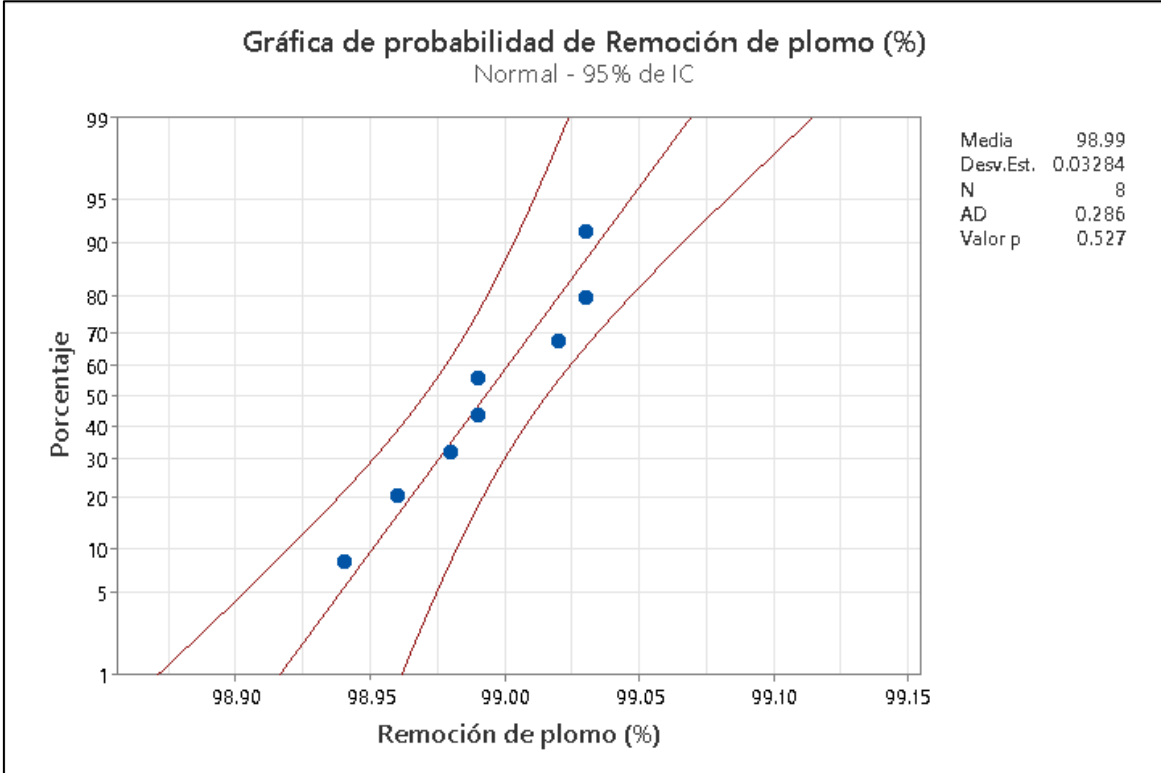


Figura 73

Evaluación de la normalidad del porcentaje de remoción de plomo



4.1.4 Resultados descriptivos del tratamiento a nivel planta piloto.

Posteriormente a la comprobación de los parámetros óptimos a nivel laboratorio, se realizó las pruebas a nivel planta piloto en los cuales se monitorio los resultados de plomo entre el 1/7/2024 al 8/8/2024 obteniendo en total 15 datos, los cuales como se observa en la figura 74 presentan valores menores a 0.5 mg/L, asimismo tomando como base la caracterización del agua residual del día 8/8/2024 se observa en la figura 75 que los porcentajes de remoción de plomo fueron mayores a 99%.

Figura 74

Datos descriptivos de plomo del monitoreo de la planta piloto

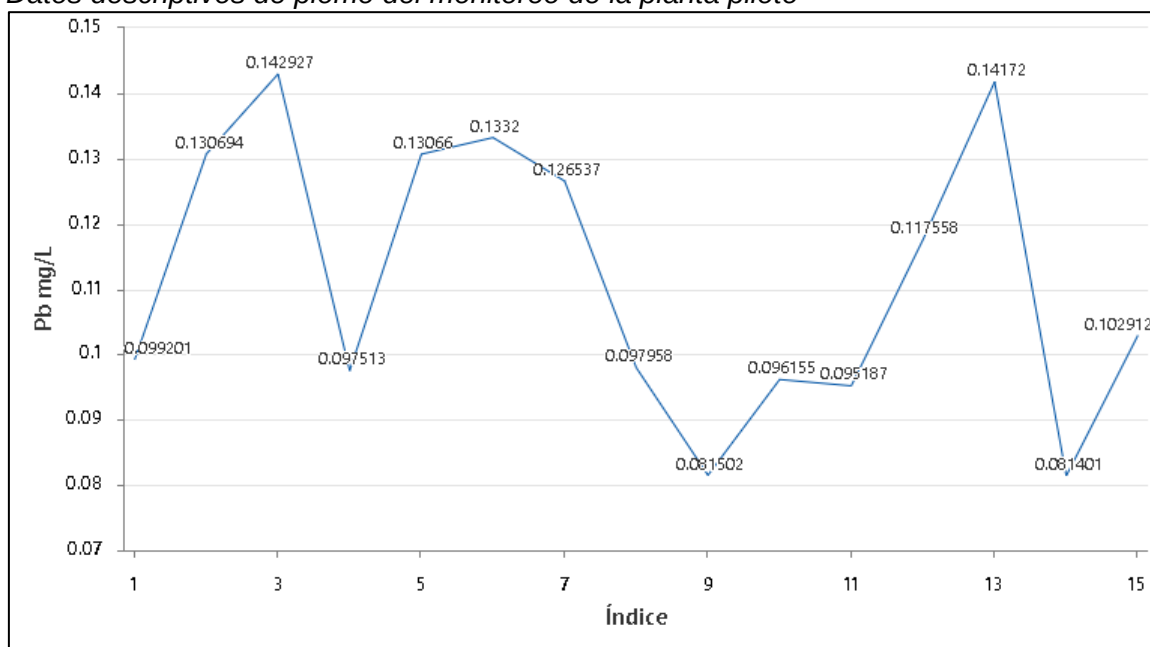
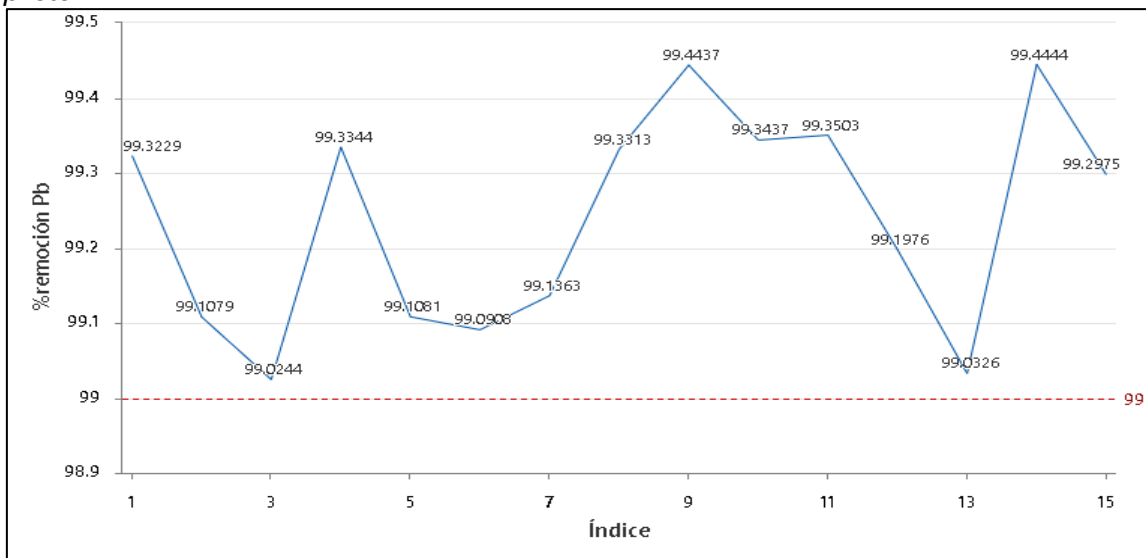


Figura 75

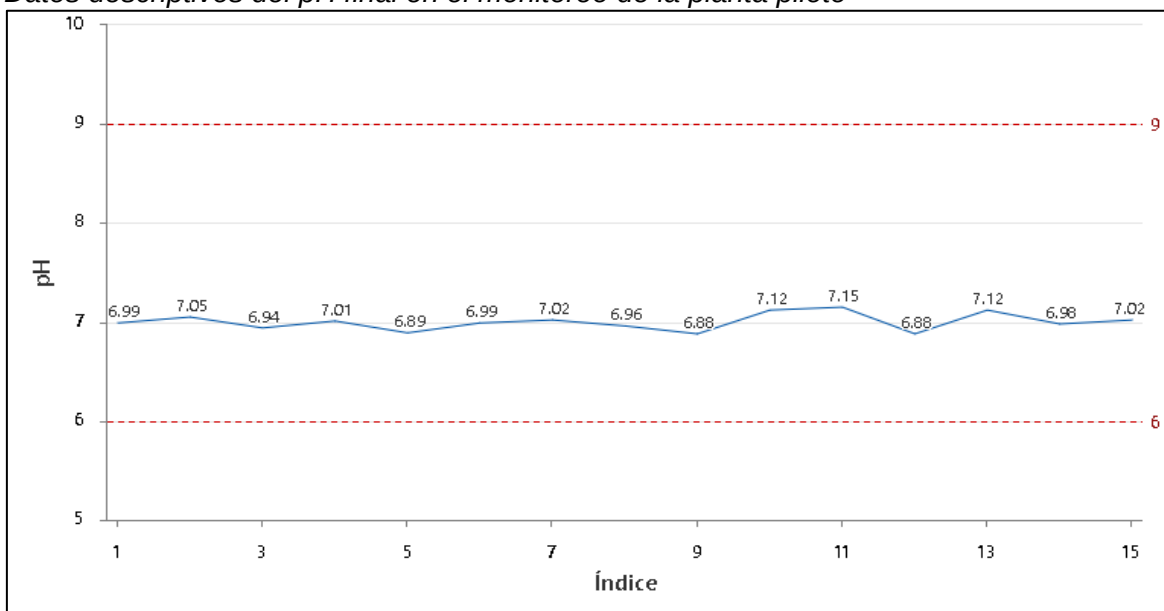
Datos descriptivos del porcentaje de remoción de plomo en el monitoreo de la planta piloto



Asimismo, durante el monitoreo de la planta piloto también se registró el pH, en la figura 76 se observa que los valores se encuentran dentro de los valores máximos admisibles (6- 9 pH), los 15 valores en promedio están en 7.00 unidades de pH.

Figura 76

Datos descriptivos del pH final en el monitoreo de la planta piloto

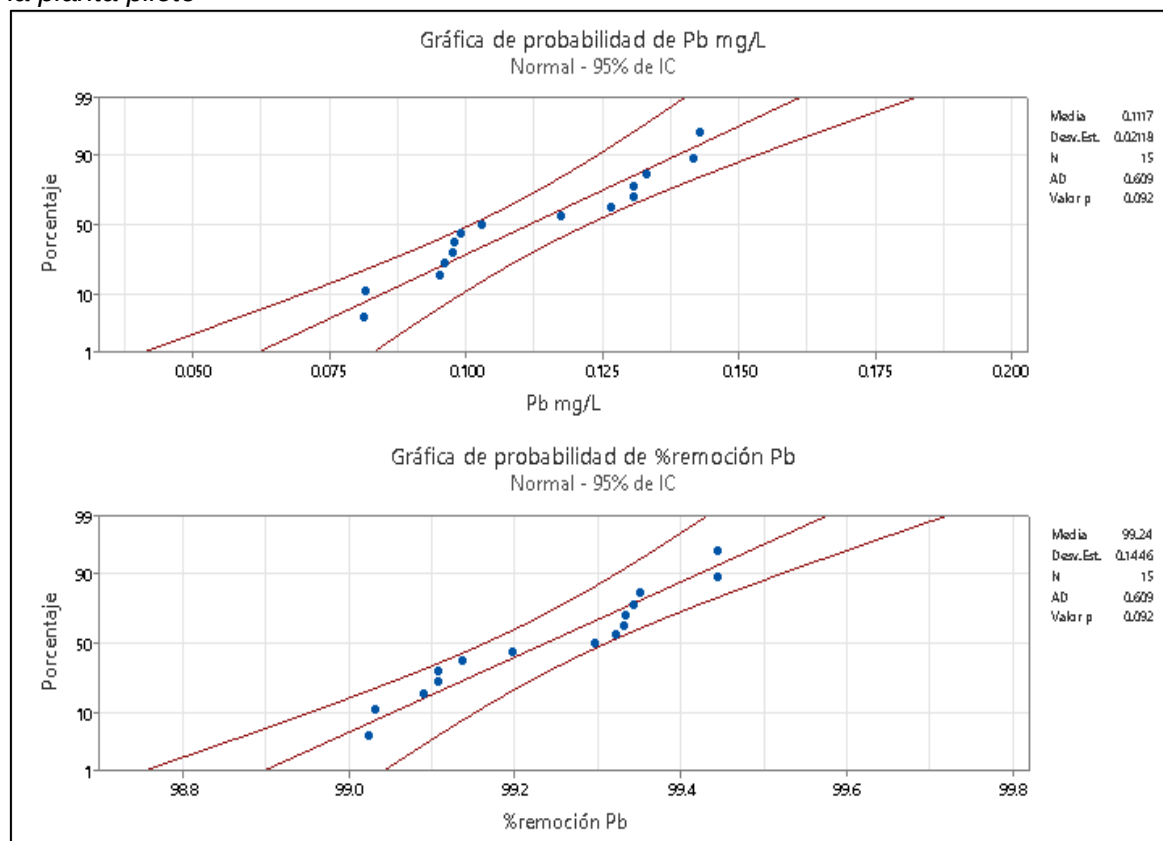


De los valores obtenido del plomo residual y el porcentaje de remoción de plomo, mediante el software Minitab 19 se evaluó la normalidad de los datos, en la figura 77 se

observa que los datos no presentan desviaciones significativas con la recta de la normalidad, ya que se obtuvo un p-valor > 0.05 , cumpliendo el supuesto de normalidad.

Figura 77

Evaluación de la normalidad del plomo residual y el porcentaje de remoción de plomo de la planta piloto



Asimismo, se tomó una muestra del agua residual industrial del día 8/08/2024, en la tabla 22, se observa que se analizó en diferentes análisis de los cuales todos están dentro de los valores máximos permitidos indicados en el anexo 2 del Decreto Supremo N°010-2019-VIVIENDA, en informe de ensayo se puede observar en el anexo 16.

Tabla 22*Caracterización fisicoquímica del agua residual luego del tratamiento a nivel planta piloto*

Parámetros	Unidad	Resultado	Limite
Potencial Hidrógeno	Unidad	7.02	6-9
Temperatura	°C	19.24	<35
Turbidez	NTU	7.22	---
Sólidos sedimentables	ml/l	0.1	8.5
Sólidos suspendidos totales	mg/l	43	500
Aluminio (Al)	mg/l	0.011	10
Arsénico (As)	mg/l	<0.003	0.5
Boro (B)	mg/l	0.513	4
Cadmio (Cd)	mg/l	< 0.001	0.2
Cromo (Cr)	mg/l	0.004	10
Cobre (Cu)	mg/l	0.098	3
Manganeso (Mn)	mg/l	0.022	4
Mercurio	mg/l	<0.001	0.02
Níquel	mg/l	0.011	4
Plomo	mg/l	0.103	0.5
Zinc	mg/l	0.164	10
Sulfatos	mg/l	221.3	1000
Sulfuros	mg/l	< 0.001	5

4.2 Resultados inferenciales

4.2.1 Resultados del análisis estadístico del diseño central compuesto para la remoción del plomo

Mediante el software Desing Expert 12 se modeló los resultados del plomo aplicando una trasformada raíz cuadrada inversa y un modelo cuadrático, se obtuvo un ajuste con los datos experimentales del 89.06%, asimismo del análisis de varianza (ANOVA) se evaluó los efectos significativos de las variables que influyen sobre el modelo para la remoción del plomo en el tratamiento de agua residual industrial.

La significancia de las variables de operación, fueron evaluadas por medio del p-valor, las variables que presentan un p-valor menor a 0.05 son significativas para el modelo de estudio.

En la tabla 23 se evidencia que, para la disminución del contenido de plomo en el agua residual, la dosis del coagulante de sulfato férrico (A) es un factor influyente, mientras que la dosis del polímero aniónico (B), la velocidad de agitación rápida (C) y la velocidad de agitación lenta (D) en el rango evaluado no son variables significativas en el modelo ya que presentan un p-valor mayor a 0.05.

Tabla 23

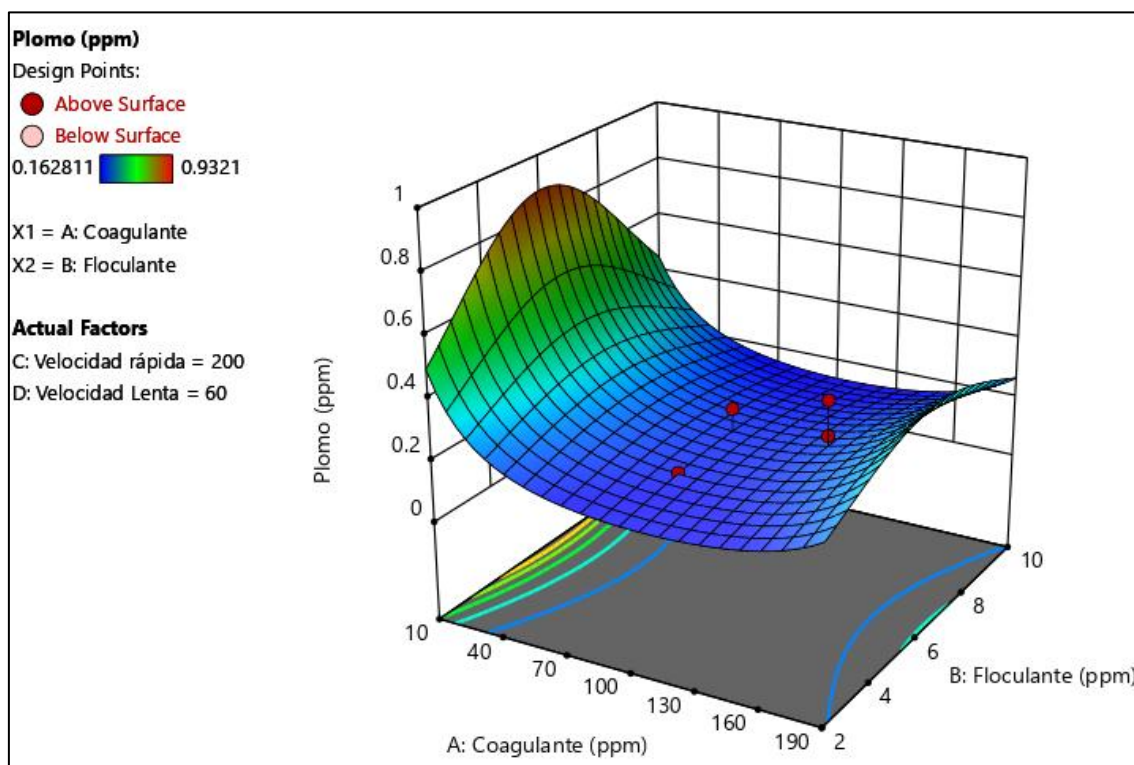
Resultados del ANOVA y el modelo matemático para la remoción de plomo

Fuente	Suma de cuadrados	g.l.	F-value	p-value	R ²
$1/\sqrt{Plomo} = 2.32 + 0.2505A + 0.0013B + 0.0004C - 0.0244D - 0.0318AB + 0.0071AC - 0.03AD + 0.0118BC + 0.0127BD - 0.0289CD - 0.9441A^2 + 0.3731B^2 - 0.139C^2 - 0.2019D^2$					
Modelo	7.84	14	11.63	< 0.0001	0.8906
A-Coagulante	1.07	1	22.17	0.0001	
B-Floculante	0	1	0.0006	0.981	
C-Velocidad rápida	2.20E-06	1	0	0.9947	
D-Velocidad Lenta	0.0101	1	0.2096	0.652	
AB	0.0162	1	0.3366	0.5683	
AC	0.0008	1	0.0165	0.8989	
AD	0.0144	1	0.2988	0.5907	
BC	0.0022	1	0.046	0.8324	
BD	0.0026	1	0.054	0.8186	
CD	0.0134	1	0.2785	0.6035	
A ²	0.2963	1	6.16	0.0221	
B ²	0.0463	1	0.9618	0.3384	
C ²	0.0064	1	0.1334	0.7188	
D ²	0.0136	1	0.2817	0.6015	
Residual	0.9624	20			
Falta de ajuste	0.6899	10	2.53	0.0796	
Error	0.2726	10			
Total	8.8	34			

En la figura 78, al evaluar la superficie respuesta del modelo experimental se observa que la remoción máxima de plomo se logra para una dosis de coagulante y floculante del 96 y 9 ppm respectivamente, los resultados evidencian que la dosis de sulfato férrico es fundamental para el proceso de remoción de plomo.

Figura 78

Superficie respuesta de la remoción del plomo



Mediante el software Desing Expert 12 se realizó la optimización numérica, en la cual se consideró las siguiente condicionales de optimización:

- Minimización del plomo residual.
- pH de 6 a 9.
- Turbidez de 2.89 a 10 NTU.
- Volumen de lodos sin restricción.

En la figura 79 se muestran las rampas gráficas de las variables independientes y dependientes, así como también los valores de la solución óptima, siendo los valores óptimos para las variables de control: coagulante 95.53 ppm, floculante 9.09 ppm, velocidad rápida 202.88 rpm y velocidad lenta 60.19 rpm, obteniendo como respuesta la concentración de plomo 0.1565 ppm, pH 6.68, volumen de lodos 7.28 y turbidez de 9.24 NTU. En la tabla 24 se resume los valores optimizados para todas las variables.

Figura 79

Solución óptima para las variables independientes y las respuestas.

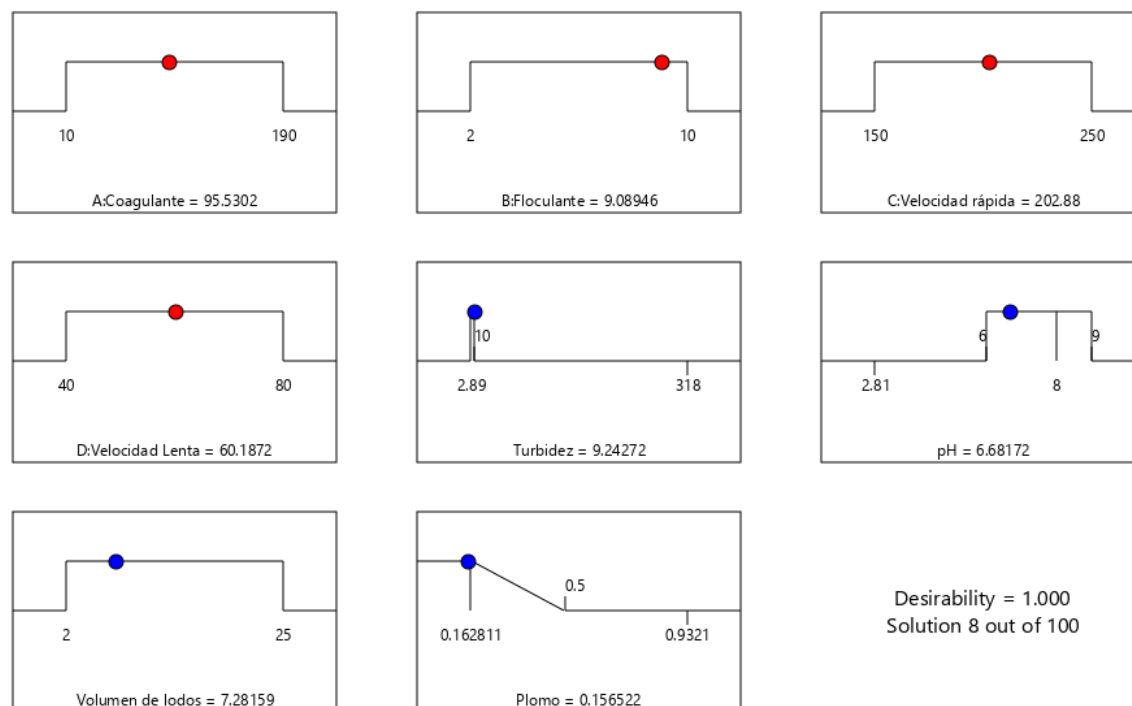


Tabla 24

Resumen de la optimización de las variables independientes y las respuestas

	Identificación	Unidades	Respuesta
Variables	Coagulante	ppm	95.53
	Floculante	ppm	9.09
	Velocidad rápida	rpm	202.88
	Velocidad lenta	rpm	60.19
Respuesta	Plomo	ppm	0.1565
	Volumen de lodos	ml	7.28
	Turbidez	NTU	9.24
	pH	S.U.	6.68

Como comprobación experimental en la tabla 25 se aproximaron las variables óptimas del tratamiento de coagulación y floculación para la ejecución de la prueba a planta piloto.

Tabla 25*Optimización de las variables independientes*

	Identificación	Respuesta	Dosis para 1.1 m3
Variables	Coagulante	96 ppm	150 ml de Fe ₂ (SO ₄) ₃ al 45%
	Floculante	9 ppm	10.0 gr de polímero
	Velocidad rápida	203 rpm	Frecuencia 6.96 Hz
	Velocidad lenta	60 rpm	Frecuencia 2.06 Hz

De acuerdo con los resultados de plomo emitidos en la planta piloto los resultados presentan una distribución paramétrica (figura 77), mediante el estadístico T-student se evaluó la significancia de los valores del plomo residual considerando las siguientes hipótesis:

Hipótesis Nula (H_0): El porcentaje de remoción de plomo es ≥ 0.5 mg/l.

Hipótesis alterna (H_1): El porcentaje de remoción de plomo es < 0.5 mg/l.

Como se observa en la tabla 26, se obtuvo un p-valor menor a 0.05, por lo tanto, se rechazó la hipótesis nula, en consecuencia, se infiere que el plomo residual del agua tratada es menor a 0.5 mg/l.

Tabla 26*Prueba de T-Student a los valores de plomo residuales*

Valor T	Valor P
-71.00	0.000

De igual manera se evaluó el porcentaje de remoción de plomo, ya que los datos presentaban distribución normal se evaluó mediante el estadístico T-student de 1 muestra, considerando las siguientes hipótesis:

Hipótesis Nula (H_0): El porcentaje de remoción de plomo es menor o igual a 97%.

Hipótesis alterna (H_1): El porcentaje de remoción de plomo es mayor a 97%.

Como se observa en la tabla 27, resultado se obtuvo un p-valor menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula, en consecuencia, se infiere que los porcentajes de remoción de plomo son mayores a 97%.

Tabla 27

Prueba de T-Student a los valores del porcentaje de remocion de plomo

Valor T	Valor P
59.94	0.000

4.2.2 Resultados del análisis estadístico del diseño central compuesto para el volumen de lodos

Mediante el software Desing Expert 12 se modeló los resultados del volumen de lodos generados obteniendo un ajuste con los datos experimentales del 93.23%, asimismo del análisis de varianza (ANOVA) se evaluó los efectos significativos de las variables que influyen sobre el modelo generado.

En la tabla 28 se evidencia que el volumen de lodos generados luego del tratamiento del agua residual, la dosis del coagulante sulfato férrico (A), la dosis del floculante polímero aniónico (B) y la velocidad de agitación rápida (C) son factores influyentes en el modelo, mientras que la velocidad de agitación lenta (D) en el rango evaluado no es significativa en el modelo ya que presentan un p-valor mayor a 0.05, por otro lado, los factores combinados AC, BD, A² y D² son significativos para el modelo.

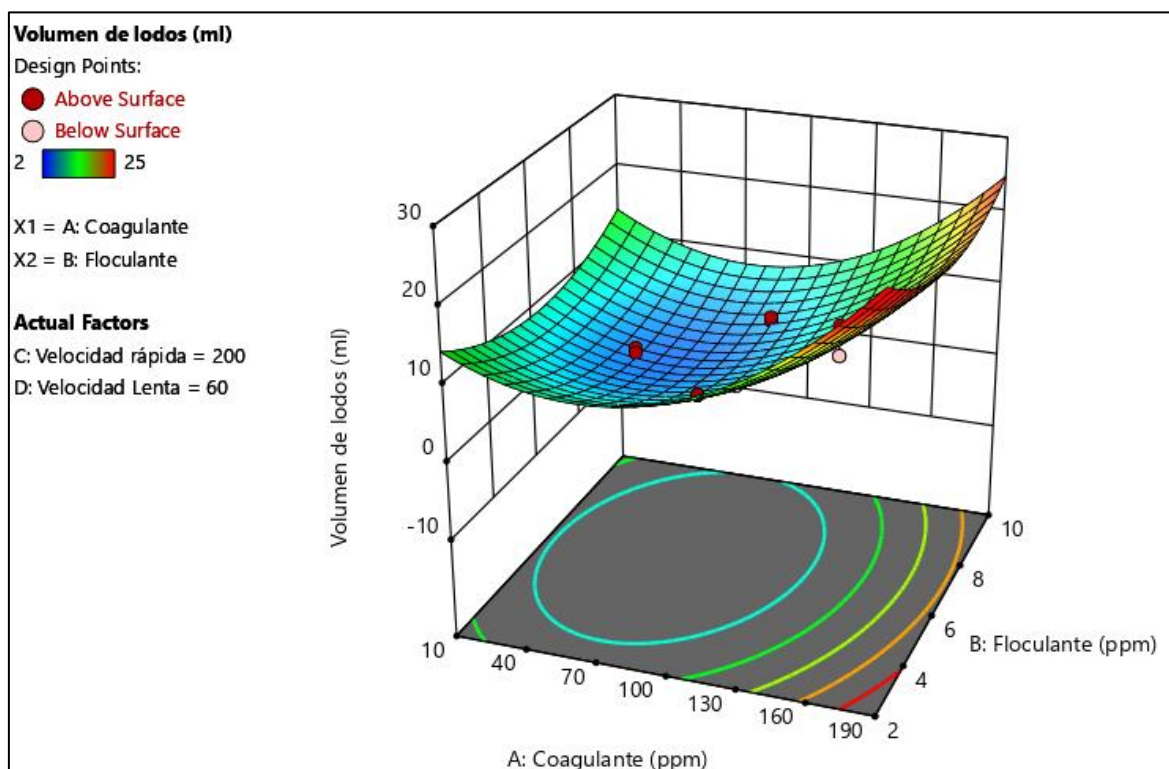
Tabla 28*Resultados del ANOVA y el modelo matemático del volumen de lodos generados*

Fuente	Suma de cuadrados	g.l.	F-value	p-value	R^2
Volumen de Lodos= $5.5+6.57A-1.43B+2.6C+0.3971D-1.09AB+1.97AC-0.2187AD-0.1562BC+1.16BD+0.9688CD+10.23A^2+5.03B^2-1.97C^2-8.97D^2$					
Modelo	1201.35	14	19.66	< 0.0001	0.9323
A-Coagulante	733.28	1	168	< 0.0001	
B-Floculante	34.59	1	7.93	0.0107	
C-Velocidad rápida	115.18	1	26.39	< 0.0001	
D-Velocidad Lenta	2.68	1	0.614	0.4425	
AB	19.14	1	4.39	0.0492	
AC	62.02	1	14.21	0.0012	
AD	0.7656	1	0.1754	0.6798	
BC	0.3906	1	0.0895	0.7679	
BD	21.39	1	4.9	0.0386	
CD	15.02	1	3.44	0.0784	
A^2	34.76	1	7.96	0.0105	
B^2	8.4	1	1.92	0.1807	
C^2	1.3	1	0.2969	0.5919	
D^2	26.77	1	6.13	0.0223	
Residual	87.3	20			
Falta de ajuste	67.51	10	3.41	0.0329	
Error	19.79	10			
Total	1288.65	34			

Así mismo en la figura 80 al evaluar la superficie respuesta entre las interacciones de las variables dosis de coagulante y floculante se puede observar que el comportamiento de la respuesta del volumen de lodos generados tiende a ser alto al emplear dosis a altas de sulfato férrico.

Figura 80

Superficie respuesta del volumen de lodos generado luego del tratamiento.



4.2.3 Resultados del análisis estadístico del diseño central compuesto para el pH final del agua tratada

Mediante el software Desing Expert 12 se modeló los resultados del pH final del agua tratada, obteniendo un ajuste con los datos experimentales del 99.19%, asimismo del análisis de varianza (ANOVA) se evaluó los efectos significativos de las variables que influyen sobre el modelo generado.

En la tabla 29 y en la se evidencia que pH final de solución luego del tratamiento del agua residual, la dosis del coagulante sulfato férrico (A) y la velocidad de agitación rápida (C) son factores influyentes en el modelo, mientras que la dosis del floculante polímero aniónico (B) y la velocidad de agitación lenta (D) en el rango evaluado no es significativa en el modelo ya que presentan un p-valor mayor a 0.05, por otro lado, los factores combinados AC y A² son significativos para el modelo.

Tabla 29

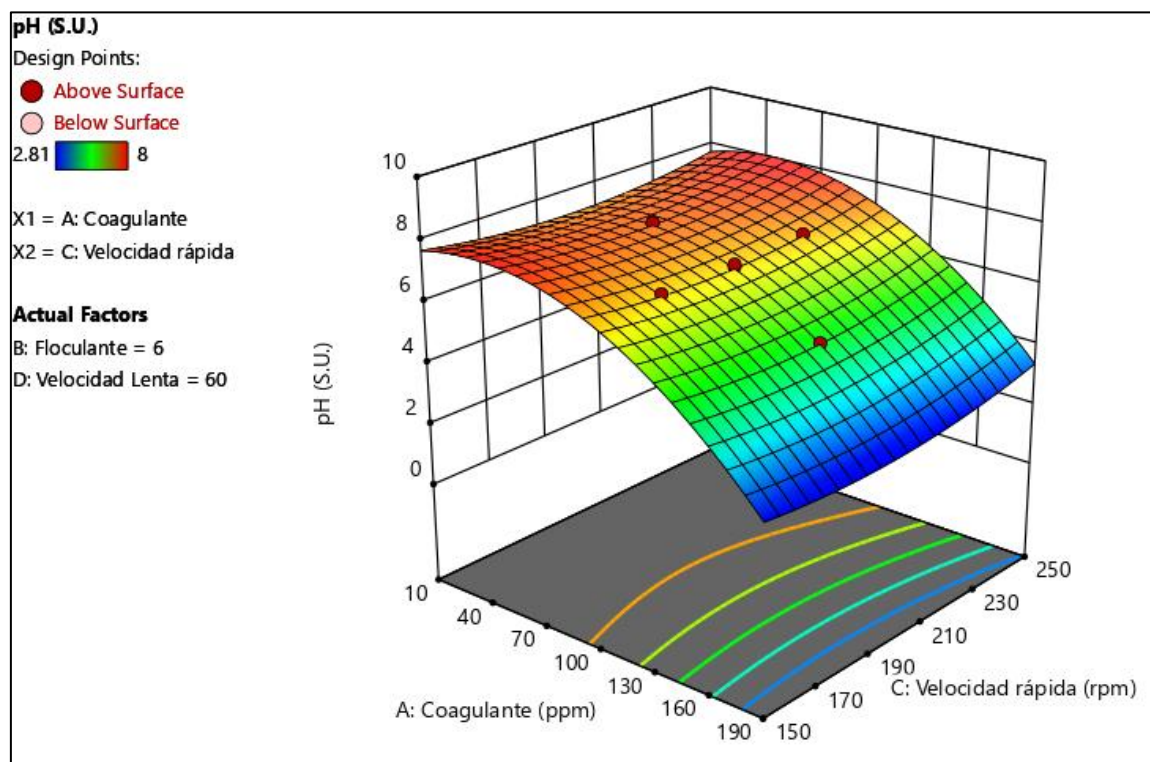
Resultados del ANOVA y el modelo matemático del pH del agua tratada

Fuente	Suma de cuadrados	g.l.	F-value	p-value	R ²
$\text{pH} = 6.83 - 2.31A - 0.0124B + 0.1588B + 0.07D + 0.0419AB + 0.1306AC - 0.0494AD + 0.0106BC + 0.1006BD + 0.0594CD - 1.89A^2 - 0.4267B^2 + 0.4733C^2 + 0.4133D^2$					
Modelo	108.22	14	174.53	< 0.0001	0.9919
A-Coagulante	90.34	1	2039.96	< 0.0001	
B-Floculante	0.0026	1	0.0586	0.8112	
C-Velocidad rápida	0.4288	1	9.68	0.0055	
D-Velocidad Lenta	0.0833	1	1.88	0.1854	
AB	0.0281	1	0.6335	0.4354	
AC	0.273	1	6.16	0.022	
AD	0.039	1	0.8808	0.3592	
BC	0.0018	1	0.0408	0.842	
BD	0.162	1	3.66	0.0702	
CD	0.0564	1	1.27	0.2724	
A ²	1.18	1	26.72	< 0.0001	
B ²	0.0605	1	1.37	0.2561	
C ²	0.0745	1	1.68	0.2095	
D ²	0.0568	1	1.28	0.2709	
Residual	0.8857	20			
Falta de ajuste	0.3744	10	0.7321	0.6844	
Error	0.5114	10			
Total	109.1	34			

En la figura 81 al evaluar la superficie respuesta de las interacciones de las variables dosis de coagulante y la velocidad rápida de agitación se puede observar que el comportamiento de la respuesta del pH del agua tratada se decrece muy rápidamente al elevar la dosis de sulfato férrico (Coagulante).

Figura 81

Superficie respuesta del pH obtenido luego del tratamiento.



4.2.4 Resultados del análisis estadístico del diseño central compuesto para turbidez (NTU)

Se modeló los resultados de la turbidez obteniendo un ajuste con los datos experimentales del 92.93%, asimismo del análisis de varianza (ANOVA) se evaluó los efectos significativos de las variables que influyen sobre el modelo generado.

En la tabla 30, se evidencia que las variables de operación: dosis del coagulante sulfato férrico (A) y la velocidad de agitación rápida (C) son factores influyentes en el modelo experimental, mientras que la dosis del floculante polímero aniónico (B) y la velocidad de agitación lenta (D) en el rango evaluado no es significativa en el modelo ya que presentan un p-valor mayor a 0.05, por otro lado, los factores combinados AC y BD son significativos para el modelo.

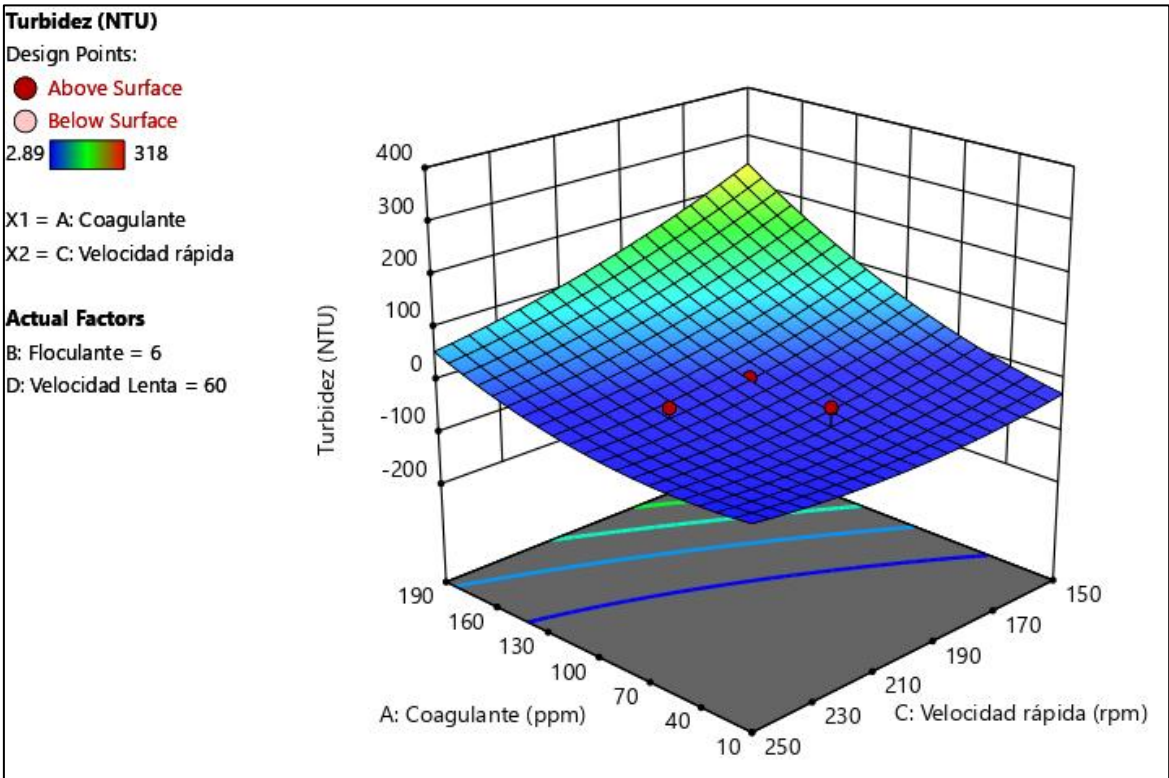
Tabla 30*Resultados del ANOVA y el modelo matemático de la turbidez del agua tratada*

Fuente	Suma de cuadrados	g.l.	F-value	p-value	R ²
Turbidez=1.46+88.16A+4.65B-46.02C-14.56D+2.82AB-47.57AC-14.84AD+13.31BC-23.39BD-5.7CD+39.42A ² +17.97A ² +22.39A ² +17.53A ²					
Modelo	2.98E+05	14	18.79	< 0.0001	0.9293
A-Coagulante	1.32E+05	1	116.58	< 0.0001	
B-Floculante	368.37	1	0.3251	0.5749	
C-Velocidad rápida	36006.51	1	31.77	< 0.0001	
D-Velocidad Lenta	3604.91	1	3.18	0.0897	
AB	127.46	1	0.1125	0.7408	
AC	36210.28	1	31.95	< 0.0001	
AD	3521.83	1	3.11	0.0932	
BC	2833.97	1	2.5	0.1295	
BD	8757.22	1	7.73	0.0116	
CD	519.38	1	0.4583	0.5062	
A ²	516.65	1	0.4559	0.5073	
B ²	107.37	1	0.0948	0.7614	
C ²	166.68	1	0.1471	0.7054	
D ²	102.18	1	0.0902	0.7671	
Residual	22664.16	20			
Falta de ajuste	22568.97	10	237.11	< 0.0001	
Error	95.19	10			
Total	3.21E+05	34			

En la figura 82 al evaluar la superficie respuesta entre las interacciones de las variables dosis de coagulante y la velocidad rápida de agitación, se observa que al emplear una alta dosis de sulfato férrico (coagulante) y una baja velocidad de agitación se obtienen valores altos de turbidez, el comportamiento de la turbidez decrece a medida que se disminuye la dosis de coagulante y se aumenta la velocidad de agitación.

Figura 82

Superficie respuesta de la turbidez del agua luego del tratamiento.



Conclusiones

Se desarrolló el diseño experimental compuesto, con el cual mediante las réplicas experimentales se pudo establecer los parámetros óptimos para reducir el contenido de plomo a un valor aproximado de 0.15 mg/L el cual se encuentra dentro de la tolerancia permitida conforme lo determinado en el anexo 2 del Decreto Supremo N°010-2019-VIVIENDA, asimismo se evidenció que la variable crítica para la remoción de plomo es la dosis de coagulante, ya que al aplicar una baja dosis, alrededor de 10 ppm de sulfato férrico, el contenido de plomo residual superaba el valor límite de 0.50 mg/L, mientras que al aplicar valores elevados alrededor de sulfato ferrico de 190 ppm se eleva la turbidez y se observa un ligero incremento del contenido de plomo en el agua residual tratada.

Se evaluó el comportamiento de los lodos generados luego del tratamiento siendo las variables significativas para este parámetro la dosis de coagulante, la dosis de floculante y la velocidad rápida de agitación, con el cual se concluye que al emplear altas dosis de coagulante (190 ppm) afecta significativamente en el aumento del volumen de los lodos generados, en contraste, el floculante a dosis ligeramente altas (7 – 8 ppm) reduce el contenido de lodos finales, por otro lado al aplicar velocidades altas de agitación alrededor de 250 rpm en la etapa de coagulación, esta afecta en un aumento del lodo residual.

Se evaluó el comportamiento de pH final luego del tratamiento del agua residual siendo las variables significativas para este parámetro la dosis de coagulante, la cual evidencia que al emplear dosis altas de coagulante afecta significativamente en la reducción de pH del agua tratada, esto se puede deber al exceso de sulfato férrico el cual en disolución acuosa los iones de hierro forman complejos con el agua, liberando iones hidronio, el cual es responsable del bajo pH de la solución resultando, por ello es importante la correcta dosificación del sulfato férrico para evitar valores que de pH menores a 6.

Se evaluó el comportamiento de turbidez luego del tratamiento del agua residual siendo las variables significativas para este parámetro la dosis de coagulante, la cual evidencia que al emplear dosis altas de coagulante afecta significativamente en el aumento de la turbidez del agua tratada, asimismo al emplear velocidades altas de agitación alrededor de 250 rpm en la etapa de coagulación, este reduce la turbidez final así se evidencio un aumento en los lodos residuales.

Se estimó mediante método de superficie de respuesta los parámetros óptimos del proceso de coagulación y floculación, obteniendo una dosis óptima de sulfato férrico de 96 ppm, polímero aniónico 9 ppm, velocidad rápida 203 rpm y velocidad lenta de 60 rpm, con lo cual se le logró obtener un valor de plomo residual de 0.16 mg/l, evidenciando una reducción del 98.9 % de plomo en el agua residual tratada.

Se diseñó una planta piloto con la capacidad de 1.10 m³, al realizar el monitoreo durante un mes se evidenció que los valores de plomo son menores a 0.5 mg/l, cumpliendo con el valor de plomo máximo permitido del anexo 2 del Decreto Supremo N°010-2019-VIVIENDA.

Recomendaciones

- Se recomienda continuar con la automatización de la planta de tratamiento de aguas, ya que actualmente se realiza la dosificación del hidróxido de sodio y sulfato férrico y polímero aniónico de forma manual, pudiéndose implementar un lazo de control de retroalimentación para dichas variables de operación.
- En el presente trabajo se estandarizó los tiempos de sedimentación a 20 min, posterior a ello se tomó la alícuota para el análisis de ICP, se recomienda en un posterior estudio evaluar los tiempos de sedimentación al variar los parámetros de operación del proceso de coagulación y floculación.
- En un posterior trabajo se recomienda incorporar el pH del pretratamiento (dosificación de hidróxido de sodio) como variable independiente, ya que en el presente estudio se realizó a un pH de 9.5 pero se podría evaluar el impacto de la remoción de plomo a valores de pH que oscilen entre 8.0 a 9.5.
- Se podría realizar una caracterización por difracción de rayos X del lodo producido luego del tratamiento de coagulación y floculación ya que en su composición elemental presenta gran contenido de hierro y azufre, este puede ser empleado como mejora de los suelos alcalinos o como material para la construcción de ladrillos.

Referencias bibliográficas

- Acuña, R. (2021, septiembre 6). *Principios básicos del diseño de biorreactores*. WordPress.
<https://bioreactorcrc.wordpress.com/2021/09/16/principios-basicos-del-diseno-de-biorreactores-parte-c-sistemas-de-potencia-de-agitacion-y-mezclado/>
- Adamson, A., & Gast, A. (1997). *Physical Chemistry of Surfaces: Vol. I* (6ta ed.). Wiley.
- Aguilar, M., Sáez, J., Lloréns, M., Soler, A., & Ortuño, J. (2002). *Tratamiento fisicoquímico de aguas residuales: coagulación-floculación* (1ra ed.). Universidad de Murcia.
- Alcarraz, M., Gamarra, G., Castro, A., & Godoy, J. (2010). Eficacia de coagulantes en el tratamiento primario de efluentes de procesadora de frutas. *Revista Ciencia e Investigación*, 13, 61–67.
- American Petroleum Institute. (2013). *API 650: Welded tanks for oil storage*.
- American Society of Mechanical Engineers. (1985). *ASME B106.1M: Design of transmission shafting*.
- Antonopoulou, M., & Hiskia, A. (2023). Nanophotocatalysts for Water Remediation. *Journal Industrial Applications of Nanoparticles*, 118–134.
<https://doi.org/10.1201/9781003183525-8>
- Arboleda, J., Buitrago, I., & Jaramillo, L. (2023). *Teoría y práctica de la purificación del agua potable: Vol. II* (4ta ed.). ECOE Ediciones.
- Bagué, A., & Álvarez, N. (2012). *Tecnología Farmacéutica* (1ra ed.). Editorial Club Universitario.

- Bailey, A. (1984). *Aceites y grasas industriales* (1ra ed., pp. 710–711). Editorial Reverté.
- Barrenechea, A. (2004). *Manual de Plantas de Filtración Rápida: Vol. I* (1ra ed.). Organización Panamericana de Salud.
- Berklin. (2024). *Catálogo de motores*. <https://berklin.com.pe/>
- Bretas, F., Casanova, G., Crisman, T., Embid, A., Martin, L., Miralles, F., & Muñoz, R. (2020). *Agua para el futuro*.
- Burns, R. (2003). *Fundamentos de química* (1ra ed.). Pearson Educación.
- Calpeda. (2024). *Catálogo de Bombas*. <https://www.calpeda.com/es/producto/nm-nmd/>
- Canales, M., Hernández, T., Meraz, S., & Peñalosa, I. (1999). *Fisicoquímica: Vol. I*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cárdenas, Y. (2000). *Tratamiento de agua coagulación y floculación*.
- Castillo, V. (2013). *Diseño y cálculo de un agitador de fluidos* [Tesis de pregrado, Universidad del Bío-Bío]. <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/412>
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2012). *Mecánica de fluidos: Vol. I* (2da ed.). Mc Graw Hill.
- Cerna, A., Vega, P., Córdova, T., Pizarro, J., Rojas, N., Mallico, M., Da Cruz, A., Zavala, S., & Kalion, J. (2023). Evaluación de almidones como floculantes para la remoción de turbiedad en agua superficial. *Revista Tecnia*, 33(2), 70–78. <https://doi.org/https://doi.org/10.21754/tecnia.v33i2.1907>

- Chambergo, J. C., Valverde, Q., Pachas, A. A., & Yépez, H. (2017). Estudio del comportamiento fluido dinámico de un agitador a escala reducida mediante simulación numérica. *Revista Información Tecnológica*, 28(3), 37–46. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000300005>
- Chulluncuy, N. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Revista ingeniería*, 29, 153–170.
- Cornelis, K., Cornelius, S., & Hurlbut, J. (1997). *Manual de mineralogía: Vol. I* (4ta ed.). Editorial reverté.
- Cortés, G., & Haza, J. (2005). Hidrodinámica en tanques agitados con turbinas de disco con paletas planas. *Revista Facultad de Ingeniería*, 38, 97–113.
- Couper, J., Penney, R., Fair, J., & Walas, S. (2010). Mixing and agitation. *Chemical Process Equipment*, 273–324. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-372506-6.00022-8>
- Cueva, H. (2014). *Diseño de experimentos en la remoción de metales pesados en aguas residuales de la industria minera por procesos de coagulación con sulfato ferroso* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/4444>
- De Zan, M., Vera, L., & Goicoechea, H. (2016). *Diseño experimental y optimización de sistemas con múltiples respuestas*.
- Díaz, A. (2017). *Curvas de potencia para fluidos no-newtonianos y newtonianos* [Tesis de grado, Universidad de los Andes]. <http://hdl.handle.net/1992/38840>
- Doran, P. (2012). *Bioprocess engineering principles: Vol. I* (2da ed.). Academic Press.

Douglas, B., McDaniel, D., & Alexander, J. (1994). *Conceptos y modelos de química inorgánica* (2da ed.). Editorial Reverté.

Fluidmix. (2023). *Equipos de agitación y dosificación*.
<https://www.agitadoresfluidmix.com/agitadores-industriales/>

Forgiarini, A., Pietrangeli, G., Arandia, M., Guédez, V., Celis, M., & Márquez, L. (2009). Influencia del tipo de alcohol sobre la formación de nanoemulsiones de aceite de soja en agua. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 30(2), 115–120.

García, D. (2004). Contribución al estudio de la hidrodinámica y la transferencia de masa en reactores tipo tanque agitado mediante un enfoque global y local en sistemas gas-líquido. *CENIC*, 35(2), 111–112.

García, D., & Jáuregui, U. (2006). Hidrodinámica en tanques agitados con turbinas de disco con paletas planas. *Revista facultad de ingeniería*, 38, 97–113.

García, M., Cruz, Y., Gandón, J., & Riera, G. (2020). Diseño de un reactor enchaquetado con agitación mecánica para el tratamiento de aceite vegetal usado. *Chemical Technology*, 40(3), 624–639.

Guan, D., Zhang, Z., Li, X., & Liu, H. (2001). Effect of pH and Temperature on Coagulation Efficiency in a North-China Water Treatment Plant. *Advanced Materials Research*, 243–249, 4835–4838. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.243-249.4835>

Hargreaves, A., Vale, P., Whelan, J., Alibardi, L., Constantino, C., Dotro, G., Cartmell, E., & Campo, P. (2018). Coagulation–flocculation process with metal salts, synthetic polymers and biopolymers for the removal of trace metals (Cu, Pb, Ni, Zn) from

municipal wastewater. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(2), 393–402.
<https://doi.org/10.1007/S10098-017-1481-3/FULLTEXT.HTML>

Harrison, R., & Laxen, D. (1981). *Lead Pollution: Vol. I* (1ra ed.).

Hernández, A. (2016). *Microbiología Industrial* (1ra ed.). Universidad estatal a distancia.

Holguín, A. (2021). *Estudio de la dispersión multifásica y área interfacial de transferencia de masa a nivel local en un sistema modelo de fermentación micelial de tres fases* [Tesis doctoral]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Huilcarema, E., & Quizhpi, E. (2016). *Evaluación de alternativas y propuesta de un sistema de tratamiento para reducir la demanda química de oxígeno (DQO) presente en las aguas de formación provenientes de efluentes de industrias de procesamiento de gas natural* [Trabajo de pregrado]. Universidad de Guayaquil.

Industrial Systems. (2016). *Manual de usuario SV-iG5A*.

Karassik, Igor, Messina, J., Cooper, P., & Heald, C. (2008). *Pump handbook: Vol. I* (4ta ed.). Mc Graw Hill.

Li, Y., Huang, Z., Lyu, C., Yan, Y., & Zhu, S. (2023). Exploration of treatment technology for heavy metal wastewater. *E3S web of conferences*, 393, 03031–03031.
<https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202339303031>

Lozada, P., Pérez, A., Cajigas, Á., Otero, A., & Gonzáles, M. (2008). Selección de acondicionadores químicos para el tratamiento anaerobio de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 7, 66–74.

- Marcó, L., Azario, R., Metzler, C., & Garcia, M. (2004). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina) . *Revista Higiene y Sanidad Ambiental*, 4, 72–82.
- Marín, R. (2012). *Procesos fisicoquímicos en depuración de aguas* (1ra ed.). Editorial Diaz de Santos.
- Marsily, G. (2001). *El agua: Vol. I* (3ra ed.). Siglo Veintiuno.
- Martínez, C. (2019, septiembre). *Metodología de superficie de respuesta (RSM)*. RStudio. https://www.rpubs.com/Cristina_Gil/RSM
- Material mundial. (2024). *Norma ASTM, AISI y SAE US*. <https://www.materialmundial.com/>
- McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química: Vol. I* (7ma ed.). McGraw-Hill.
- Ministerio de Vivienda. (2019, marzo 11). *Decreto supremo No010-2019*. Plataforma digital del estado peruano. <https://www.gob.pe/12808-valores-maximos-admisibles-vma>
- Miranda, B. (2013). Determinación de una correlación para estimar el coeficiente de película externo para serpentines en tanques agitados. *Revista Ingeniería*, 23(2), 31–46.
- Mojica, M., Peñaranda, C., & Sánchez, J. (2023). *Fundamentos de tratamiento del agua para consumo humano* (1ra ed.). Universidad distrital.

- Montgomery, D. (2012). *Design and Analysis of Experiments* (8va ed., Vol. 1). Wiley.
- Montoya, C., & Silencio, K. (2017). *Evaluación de pH, concentrados de FeSO₄ y FeCl₃, en remoción de Sólidos suspendidos y sulfuros en efluentes de pelambre en curtiembre* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Trujillo.
- Morales, M. (2010). *Aplicación de procesos de coagulación floculación en la regeneración de aguas depuradas* [Tesis de pregrado]. Universidad de Zaragoza .
- Mott, R., & Untener, J. (2019). *Mecánica de fluidos: Vol. I* (7ma ed.). Pearson.
- Naceradska, J., Pivokonska, L., & Pivokonsky, M. (2019). On the importance of pH value in coagulation. *Journal of Water Supply Research and Technology-aqua*, 68(3), 222–230. <https://doi.org/10.2166/AQUA.2019.155>
- Neyra, S., Trigoso, J., & Santa, N. (2013). Diseño - construcción e instalación de tanque agitador [Tesis de pregrado]. En *Universidad Nacional de la Amazonia Peruana*. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana.
- Ojeda, M. (2015). *Tratamiento de agua potable: Vol. I* (5ta ed.). Editorial Elearning.
- Olson, D., Siewert, T., Liu, S., & Edwards, G. (1994). *ASM handbook: Welding, brazing, and soldering* (ASM International, Vol. 6).
- OMS. (2023, agosto 11). *Envenenamiento por plomo*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>
- Organización panamericana de la salud. (2005). *Guías para el diseño de estaciones de bombeo de agua potable*.

- Owodunni, A., & Ismail, S. (2021). Revolutionary technique for sustainable plant-based green coagulants in industrial wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 42. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2021.102096>
- Palazuelos, E., & Hernández, M. (2008). Intoxicación por plomo en México, prevención y control. En *Instituto Nacional de Salud Pública: Vol. I* (1ra ed.). Instituto Nacional de Salud Pública.
- Pang, F., Kumar, P., Teng, T., Mohd, O., & Wasewar, K. (2011). Removal of lead, zinc and iron by coagulation-flocculation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 42(5), 809–815. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2011.01.009>
- Paul, E., Atiemo, V., & Kresta, S. (2004). *Handbook of industrial mixing: Vol. I* (1ra ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471451452>
- Paz, C., & Manturano, R. (2017). Contaminación ambiental del agua servida por los reactivos químicos más utilizados en el laboratorio de química de la Universidad Nacional de Ucayali. *Revista de la Universidad Nacional de Ucayali*, 1, 1–7.
- Perry, R., & Green, D. (2008). *Perry's chemical engineers' handbook: Vol. I* (7ma ed.). McGraw-Hill Education.
- Pinheiro, I., Vieira, L., & Lima, K. (2005). Hidroxido de calcio. *Avances en odontoestomatología*, 21, 141–147.
- Pinto, D., Sánchez, J., & Cañon, V. (2023). *Aprovechamiento de pectina cítrica comercial para uso de tratamiento de aguas residuales institucionales* [Tesis de pregrado]. Universidad escuela de administración de negocios.

- Portales, R. (2015, octubre 5). *Representative impellers for fluid mixing in mechanically agitated vessels*. <http://procesosindustriales-rpt.blogspot.com/2015/10/tipos-de-agitadores-representative.html>
- Quintero, M. (2018). *Tratamiento primario de aguas residuales no domésticas provenientes de la pontificia universidad javeriana mediante el uso de tanino modificado de acacia* [Tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Javeriana Facultad de Ciencias.
- Ramalho, R., Domingo, B., & Lora, F. (2021). *Tratamiento de aguas residuales* (2da ed.). Editorial Reverté.
- Ramos, R., Sepúlveda, R., & Villalobos, F. (2003). *El agua en el medio ambiente*. Universidad Autónoma de Baja California.
- Ramsey, W., & Zoller, G. (1985). *Liquid Agitation* (1ra ed.). McGraw-Hill.
- Ratnawati, M. (2020). Zinc Removal from ZnO Industrial Wastewater by Hydroxide Precipitation and Coagulation. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industry*, 11(2), 35–42. <https://doi.org/10.21771/JRTPPI.2020.V11.NO2.P35-42>
- Recasens, Francesc. (2018). *Procesos de separación de biotecnología industrial* (1ra ed.). Universitat Politècnica de Catalunya.
- Restrepo, H. (2009). *Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Colombia.
- Rigola, M. (1989). *Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales*. Marcombo.

Rodríguez, J. (2024). *Potabilización del agua: Vol. I* (1ra ed.). Editorial Alpha.

Rojas, R., Echeverry, L., & Sierra, S. (2018). Termo-cinética de la lixiviación de plomo a partir de baterías recicladas. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(1), 155–171. <https://doi.org/10.14482/INDE.36.1.10944>

Rosales, A., Vásquez, A., Ellero, M., & López, E. (2024). Suspensiones concentradas de partículas sólidas no coloidales. *Revista material avanzados*, 41, 143–154.

Sakhi, D., Rakhila, Y., Elmchaouri, A., Abouri, M., Souabi, S., & Jada, A. (2018). Optimization of Coagulation Flocculation Process for the Removal of Heavy Metals from Real Textile Wastewater. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 913, 257–266. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11881-5_22

Sela, G. (2022). *Los Fundamentos de Tratamiento de Aguas: Vol. I* (1ra ed.).

Soto, E., Lozano, T., Barbarín, J., & Alcalá, M. (2004). Remoción de metales pesados en aguas residuales mediante agentes químicos. *Revista Ingenierías*, VII(23), 46–51.

Suo, C., Xu, D., Yuan, R., & Zhou, B. (2020). Synchronous removal of Cd (II), Pb (II) and Cu (II) by coagulation in the presence of polymeric ferric sulfate. *Desalination and Water Treatment*, 195, 421–434. <https://doi.org/10.5004/DWT.2020.25928>

Tavares, P., & Bertran, C. (1998). Rutas de síntesis y homogeneidad de precursores de mullita y cordierita. *Química Nova*, 21(5), 608–613. <https://doi.org/10.1590/S0100-40421998000500013>

TeKippe, R., & Ham, R. (1971). Velocity-gradient paths in coagulation. *AWWA*, 63, 439–448.

- Teng, T., San, S., & Wei, L. (2014). Coagulation-Flocculation Method for the Treatment of Pulp and Paper Mill Wastewater. *The Role of Colloidal Systems in Environmental Protection*, 239–259. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63283-8.00010-7>
- Thomas, O., & Thomas, M. F. (2022). Industrial wastewater. En *UV-Visible Spectrophotometry of Waters and Soils* (3ra ed., pp. 385–416). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90994-5.00013-7>
- Toapanta, M., Cisneros, N., Roldan, M., & Moreira, C. (2021). Aplicación de sales inorgánicas en el tratamiento de aguas residuales industriales procedente de la refinación de aceites y grasas. *Dominio de las ciencias*, 7, 632–647. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i1.1667>
- Universidad de granada. (2023). *Cálculo de Bombas y Tuberías*. <https://www.ugr.es/~aulavirtualpfcic/Bbombasytuberias.html>
- Universidad Tecnológica Nacional. (2020). *Fórmulas empíricas para el cálculo de pérdidas de carga continuas en tuberías en diferentes instalaciones*.
- Uribe, A., Rivera, R., Aguilera, A., & Murrieta, E. (2012). Agitación y mezclado. *revista enlace químico*, 4, 22–28.
- Valeriano, J., Matos, R., Valeriano, J., & Matos, R. (2019). Influencia de la Goma de Tara (*Caesalpinia spinosa*) como ayudante en el proceso de coagulación-floculación para la remoción de turbidez de una suspensión artificial de bentonita. *Revista Información tecnológica*, 30(5), 299–308. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000500299>
- Vargas, L. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano - Plantas de filtración rápida: Vol. I* (1ra ed.). CEPIS.

- Villegas, R., & Letterman, R. (1976). Optimizing flocculator power input. *Journal of the Environmental Engineering Division*, 251–263.
- Weber, W. (2021). *Procesos físicoquímicos para el control de la calidad del agua* (1ra ed.). Editorial Reverté.
- Yaguas, O. (2017). Metodología de superficie de respuesta para la optimización de una producción agrícola. *revista ingeniería industrial*, 16(1), 205–222.
- Yaniris, L. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA*, XL(0138–6204), 10–17.
- Younker, J. M., & Walsh, M. E. (2014). Impact of salinity on coagulation and dissolved air flotation treatment for oil and gas produced water. *Water Quality Research Journal of Canada*, 49(2), 135–143. <https://doi.org/10.2166/WQRJC.2013.118>
- Yukselen, M. A., O'Halloran, K. R., & Gregory, J. (2006). Effect of tapering on the break-up and reformation of flocs formed using hydrolyzing coagulants. *Water Science and Technology: Water Supply*, 6(2), 139–145. <https://doi.org/10.2166/WS.2006.062>
- Zapata, J. (2013). *Diseño de Elementos de Maquinas: Vol. I* (1ra ed.).
- Zerbatto, M., Carrera, E., Eliggi, M., Modini, L., Vaira, S., Nosedá, J., & Abramovich, B. (2009). Cloruro férrico para la coagulación optimizada y remoción de enteroparásitos en agua. *Revista AUGM DOMUS*, 1, 18–26. <https://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/view/73>

Anexos

Anexo 1: Resultados de la prueba de floculación coagulación	156
Anexo 2: Registro fotográfico	157
Anexo 3: Plano del tanque ecualizador	161
Anexo 4: Plano del tanque agitado	162
Anexo 5: Plano del diseño del impeller	163
Anexo 6: Plano del sedimentador	164
Anexo 7: Diagrama de tuberías	165
Anexo 8: Sistema de tuberías de la planta piloto en 3D	166
Anexo 9: Planta piloto en 3D	167
Anexo 10: Plano isométrico de la planta piloto	168
Anexo 11: Informe de ensayo del barrido ICP del agua residual Industrial	169
Anexo 12: Informe de ensayo de la caracterización del agua residual Industrial	170
Anexo 13: Informe de ensayo del Barrido ICP del agua tratada	172
Anexo 14: Informe de ensayo de la verificación de la dosificación optima	177
Anexo 15: Informe de ensayo del monitoreo en planta piloto	179
Anexo 16: Informe de ensayo de la caracterización del agua residual tratada a nivel planta piloto	182

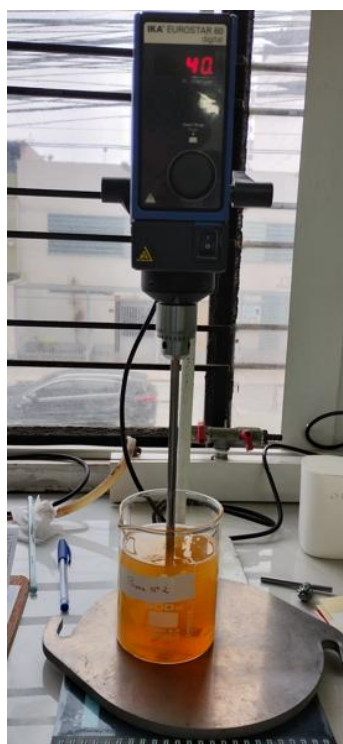
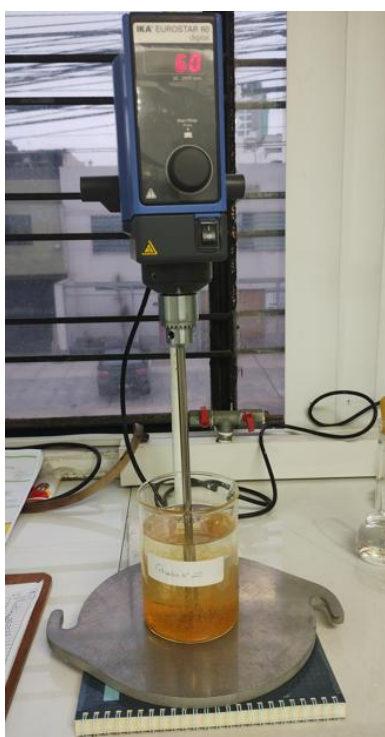
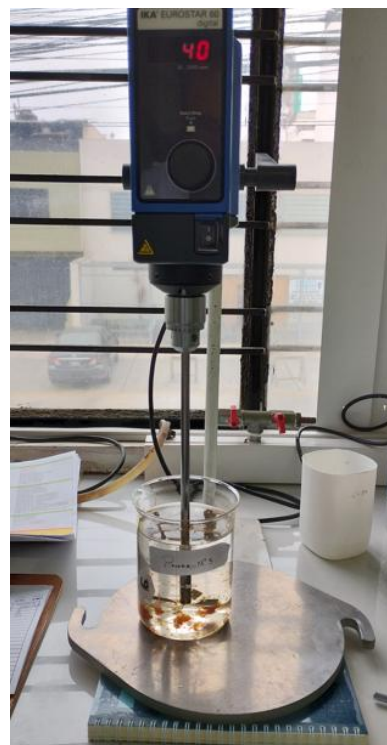
Anexo 1

Resultados de la prueba de floculación coagulación

N°	Coagulante (ppm)	floculante (ppm)	Velocidad rápida (rpm)	Velocidad Lenta (rpm)	Turbidez (NTU)	pH	Volumen de sólidos (ml)	Plomo (ppm)	% Remoción de Pb
1	10	10	250	80	4.39	8.00	3.0	0.7884	94.7125
2	10	2	150	80	3.76	7.78	2.0	0.7767	94.7911
3	100	6	200	50	4.45	7.00	4.0	0.1978	98.6735
4	100	8	200	60	5.82	6.80	7.0	0.1628	98.9080
5	190	2	250	80	81.8	3.14	22.0	0.4319	97.1036
6	55	6	200	60	3.62	7.59	6.2	0.1880	98.7394
7	190	10	150	80	220	2.82	10.0	0.3915	97.3746
8	100	6	175	60	8.37	6.75	5.0	0.2072	98.6101
9	100	6	225	60	4.67	7.08	3.5	0.1746	98.8293
10	55	6	200	60	5.02	7.59	5.5	0.1753	98.8241
11	190	10	250	80	25.5	3.79	23.5	0.3443	97.6907
12	145	6	200	60	9.8	5.24	13.0	0.2453	98.3551
13	100	6	200	60	6.65	6.97	3.0	0.1697	98.8616
14	100	8	200	60	6.42	6.73	6.5	0.1636	98.9025
15	100	4	200	60	4.04	7.10	7.5	0.1762	98.8182
16	190	10	250	40	235	3.08	14.0	0.3486	97.6618
17	100	6	175	60	7.32	6.94	5.0	0.1731	98.8394
18	100	6	200	50	3.81	7.01	3.0	0.1794	98.7966
19	10	10	150	40	10.3	7.55	2.0	0.7546	94.9392
20	100	4	200	60	4.01	6.19	7.5	0.1797	98.7948
21	10	10	150	80	8.83	7.65	3.0	0.7816	94.7579
22	190	2	250	40	39.6	3.57	25.0	0.2699	98.1897
23	10	2	250	40	2.89	7.68	2.5	0.8481	94.3117
24	10	2	250	80	3.8	7.88	7.0	0.8802	94.0966
25	145	6	200	60	23.3	4.94	9.0	0.3628	97.5669
26	100	6	200	70	5.64	6.89	4.0	0.1923	98.7104
27	190	2	150	80	318	2.82	11.0	0.3167	97.8760
28	190	10	150	40	317	2.82	8.0	0.3595	97.5887
29	100	6	200	60	6.27	6.91	4.0	0.2662	98.2145
30	190	2	150	40	297	2.81	18.0	0.3317	97.7754
31	100	6	225	60	4.35	6.95	8.0	0.2094	98.5958
32	10	10	250	40	8.19	7.32	3.0	0.7875	94.7181
33	100	6	200	60	4.74	6.80	4.0	0.1724	98.8440
34	100	6	200	70	5.95	6.76	3.5	0.2017	98.6473
35	10	2	150	40	5.32	7.68	2.5	0.9321	93.7485

Anexo 2

Registro fotográfico



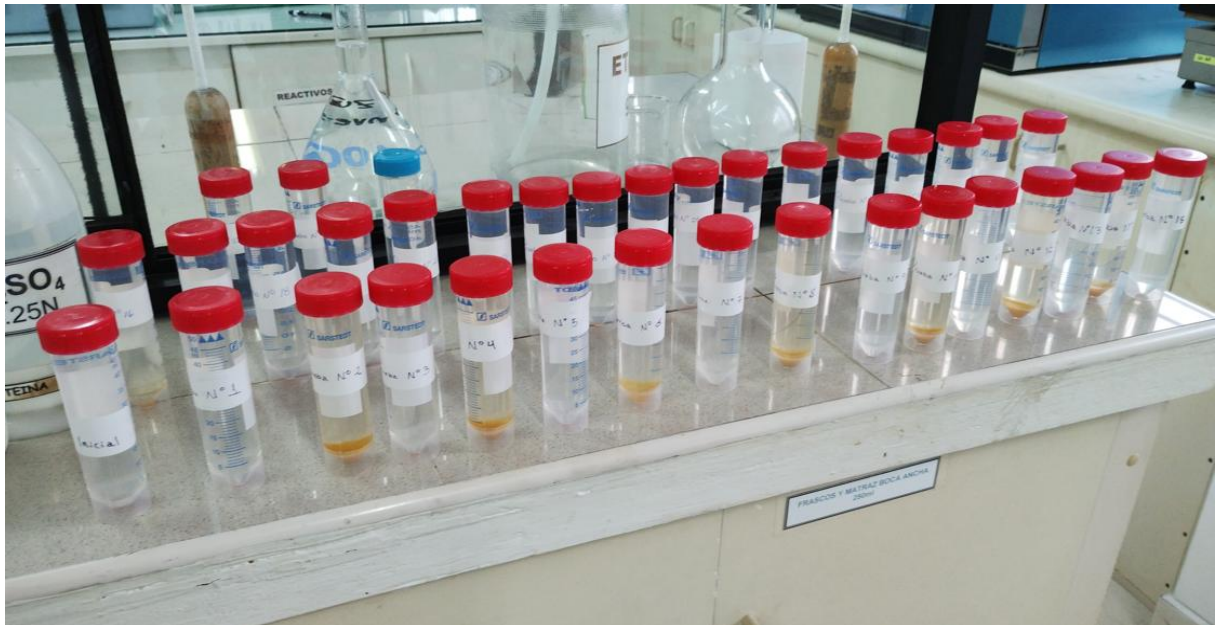
ANEXO 2

Registro fotográfico (continuación)



ANEXO 2

Registro fotográfico (continuación)

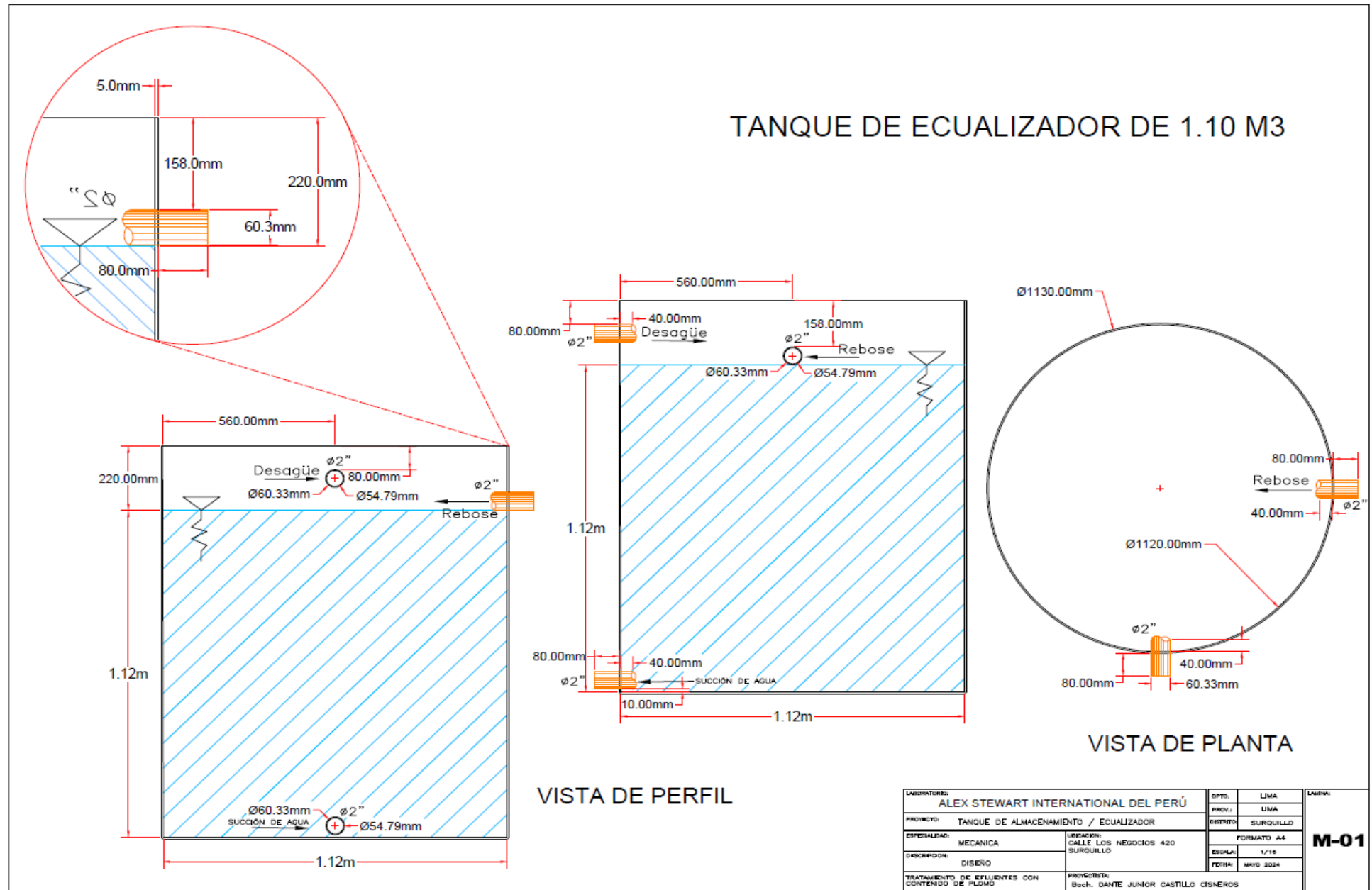


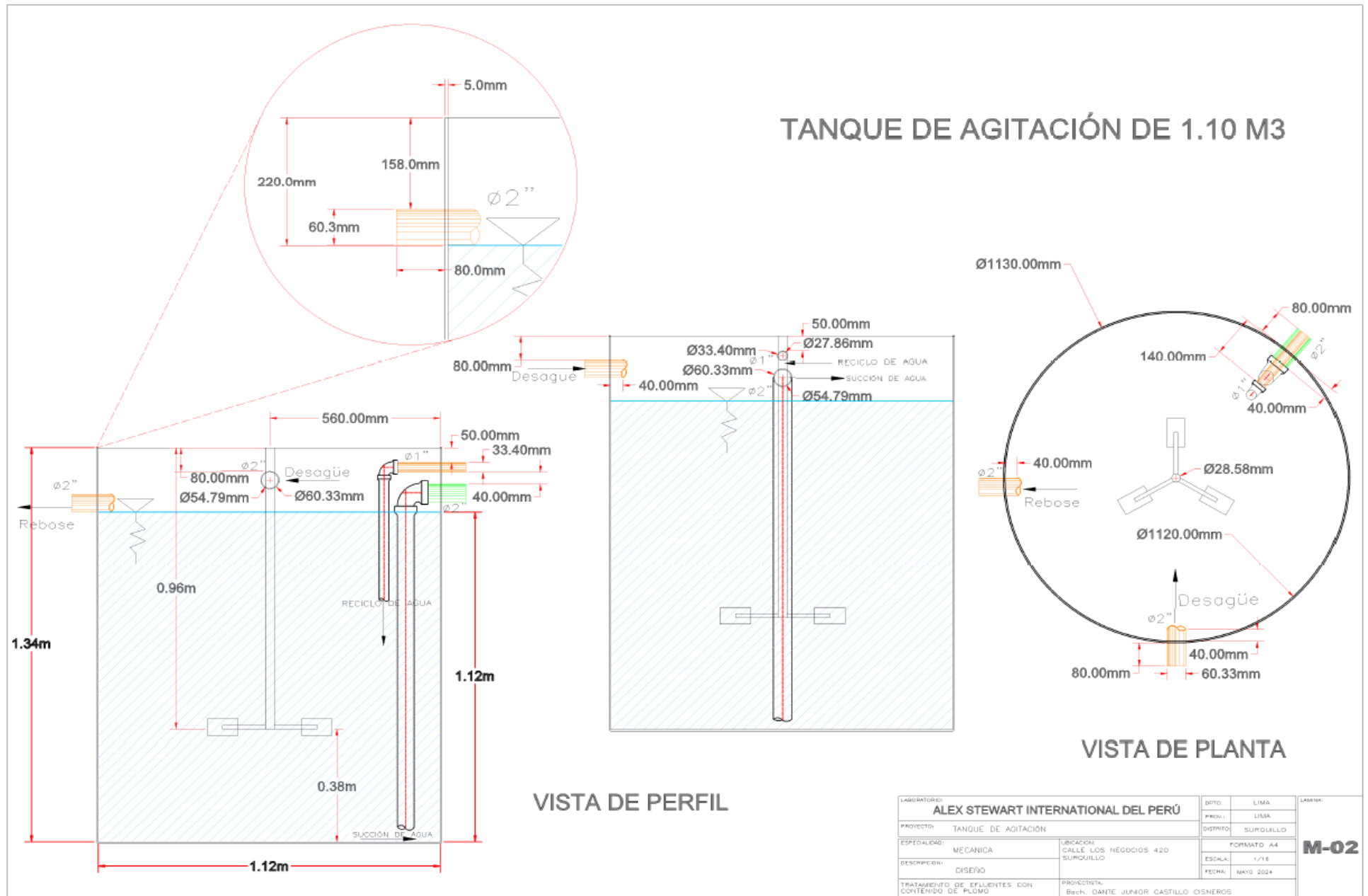
ANEXO 2

Registro fotográfico (continuación)

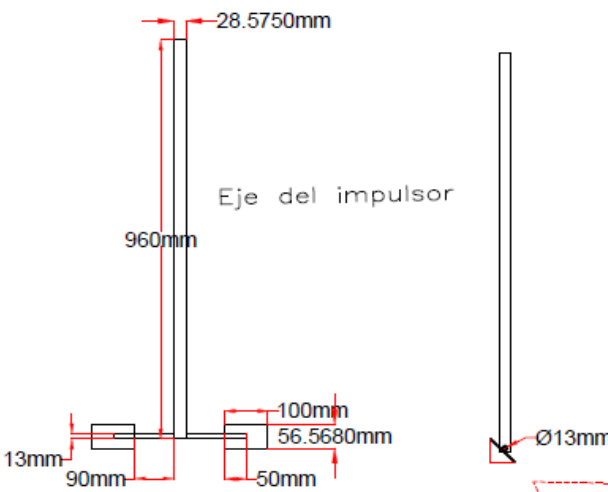


Plano del tanque ecualizador

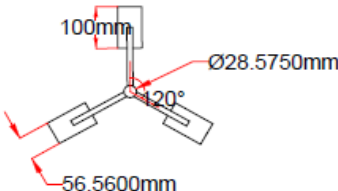
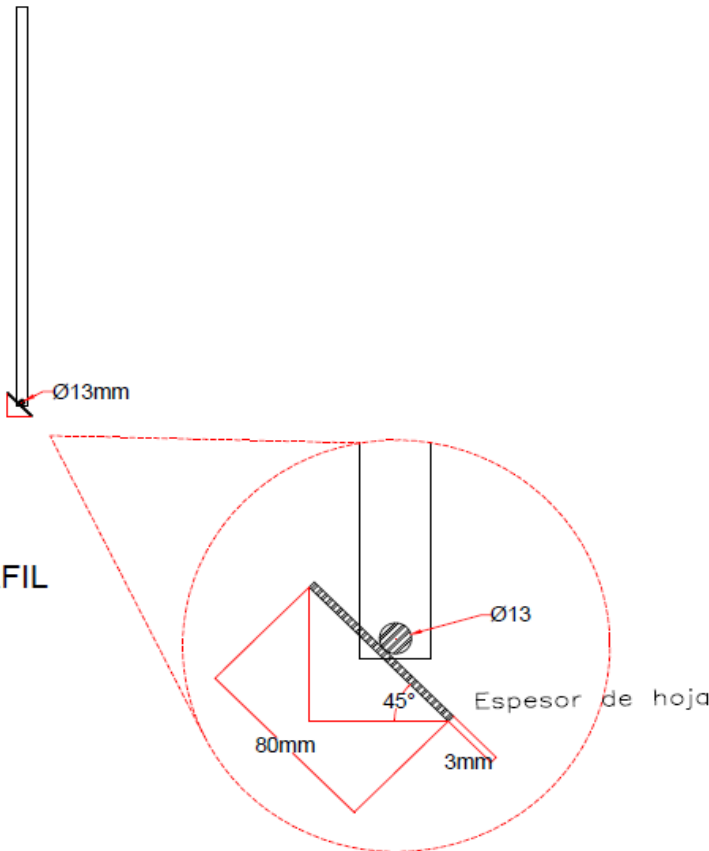




DISEÑO DEL AGITADOR



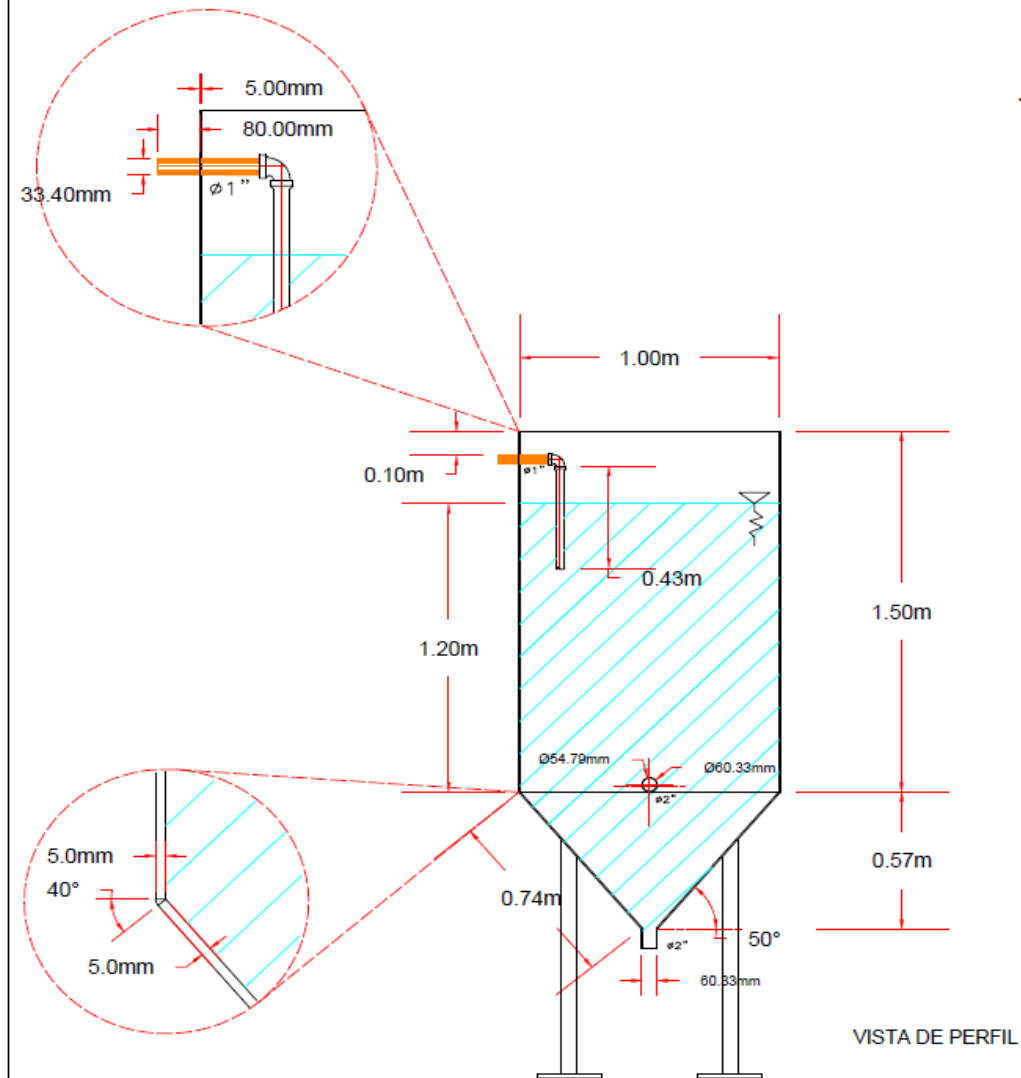
VISTA DE PERFIL



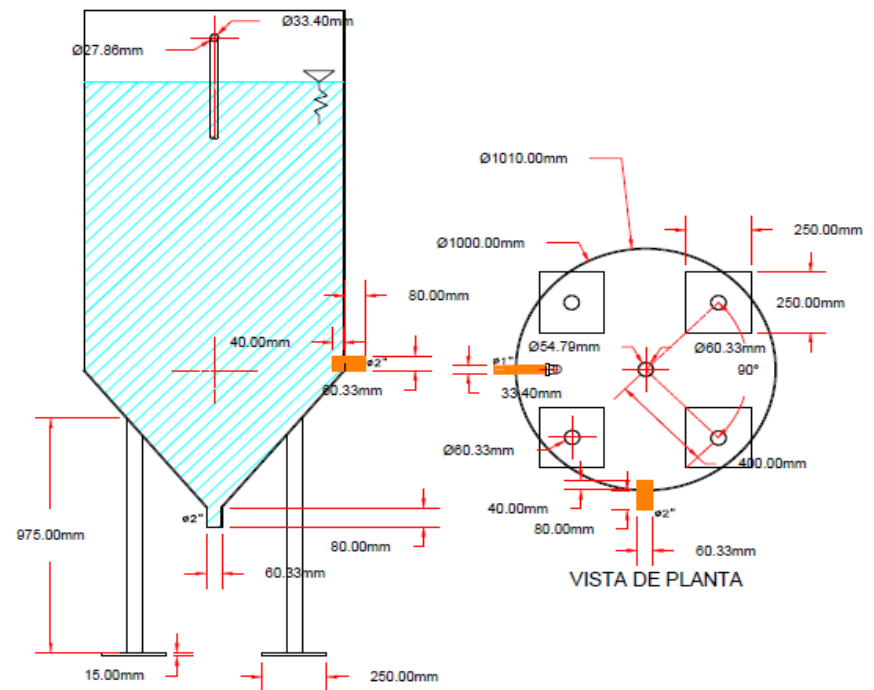
VISTA DE PLANTA

Laboratorio:	ALEX STEWART INTERNATIONAL DEL PERÚ	OPTO:	LIMA	M-03
PROYECTO:	AGITADOR	PROV.:	LIMA	
ESPECIALIDAD:	MECANICA	DISEÑO:	SURQUILLO	
DESCRIPCION:	DISEÑO	UBICACION:	CALLE LOS NEGOCIOS 420 SURQUILLO	
TRATAMIENTO DE PUENTES CON CONTENEDOR DE PUENTE		FORMATO:	A4 / mm	
		ESCALA:	1/2.5	M-03
		FECHA:	MAYO 2024	
		PROYECTISTA:	Ing. DANTE JUNIOR CASTILLO CISNEROS	

Plano del sedimentador



TANQUE DE SEDIMENTACIÓN DE SECCIÓN CIRCULAR DE 1.10 M3

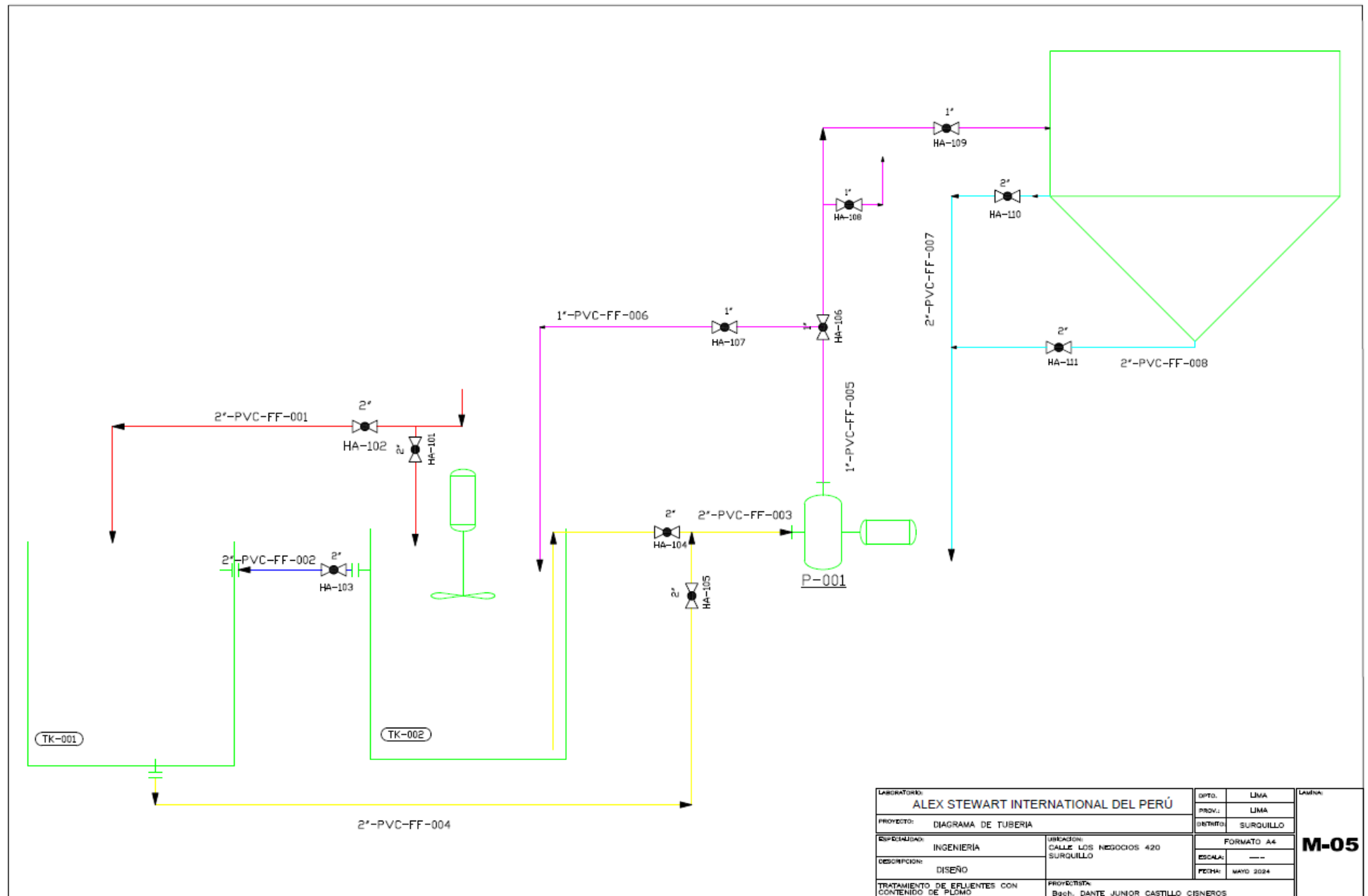


Lugar de Trabajo:		CMTD:		Unia	Línea:	
ALEX STEWART INTERNACIONAL DEL PERÚ		PROYECTO:		Unia		
PROYECTO:		TANQUE DE SEDIMENTACIÓN		DIRMITO:		SURQUILLO
ESPECIFICACION:	MECANICA	UBICACION:		FORMATO: A4		
DESCRIPCION:	DISERO	CALLE LOS NEGOCIOS 420		ESCALA:	1/25	
TRATAMIENTO DE EFLUENTES CON CONTENEDOR DE FLESCIO		PROYECTISTA:		FECHA:	MAYO 2024	
		BACH. DANIE JUNIOR CASTILLO CISNEROS				

M-04

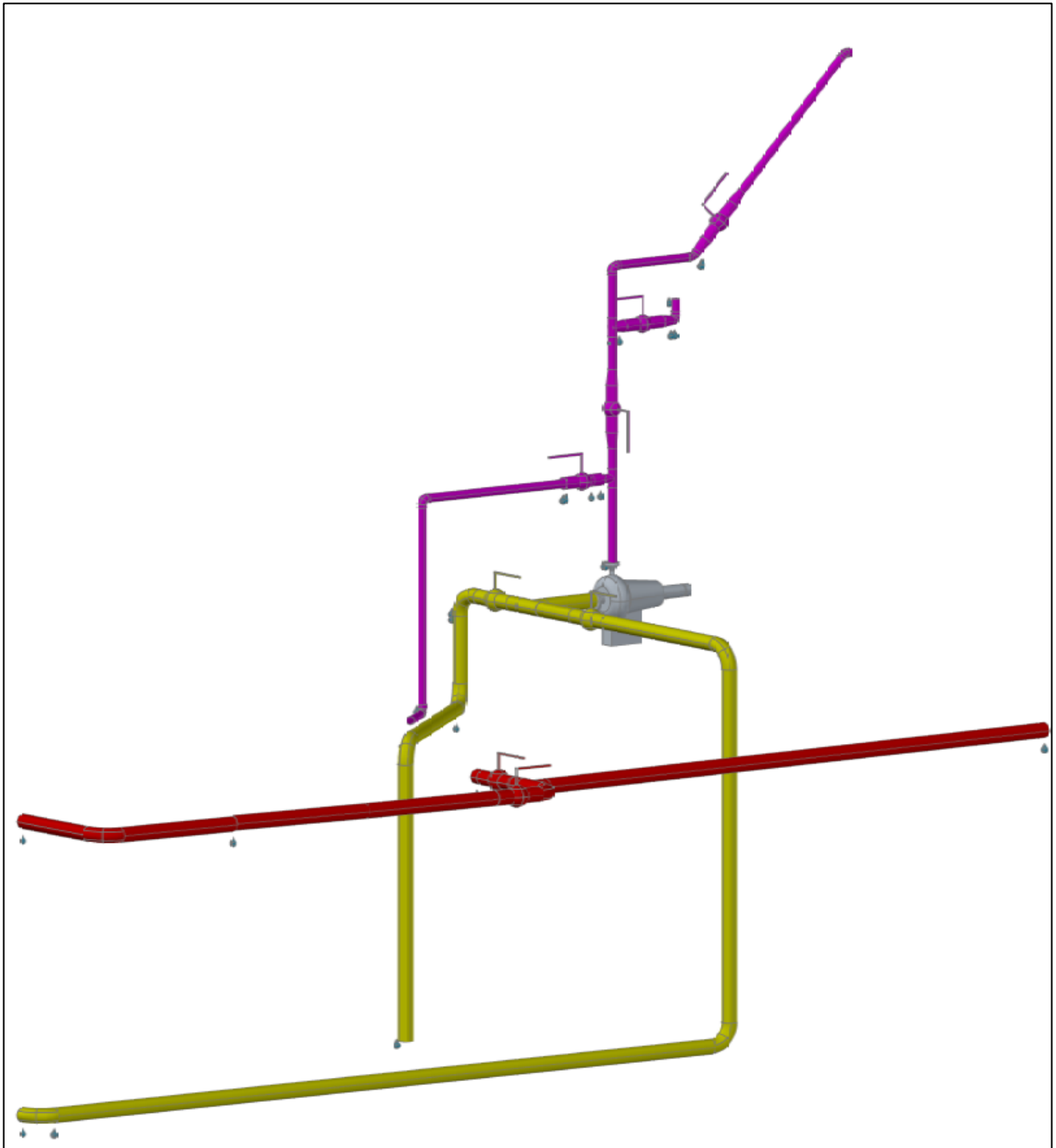
Anexo 7

Diagrama de tuberías



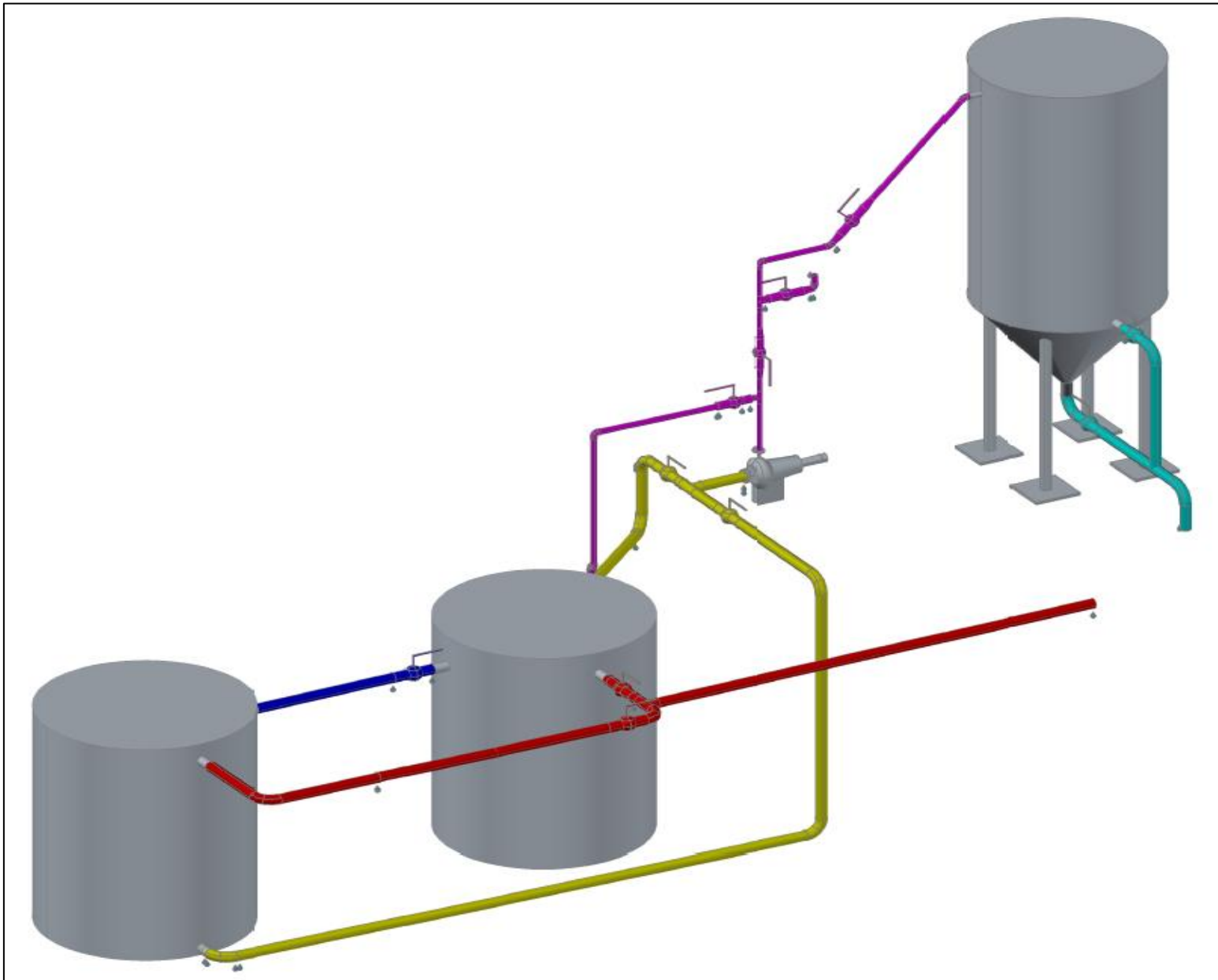
Anexo 8

Sistema de tuberías de la planta piloto en 3D



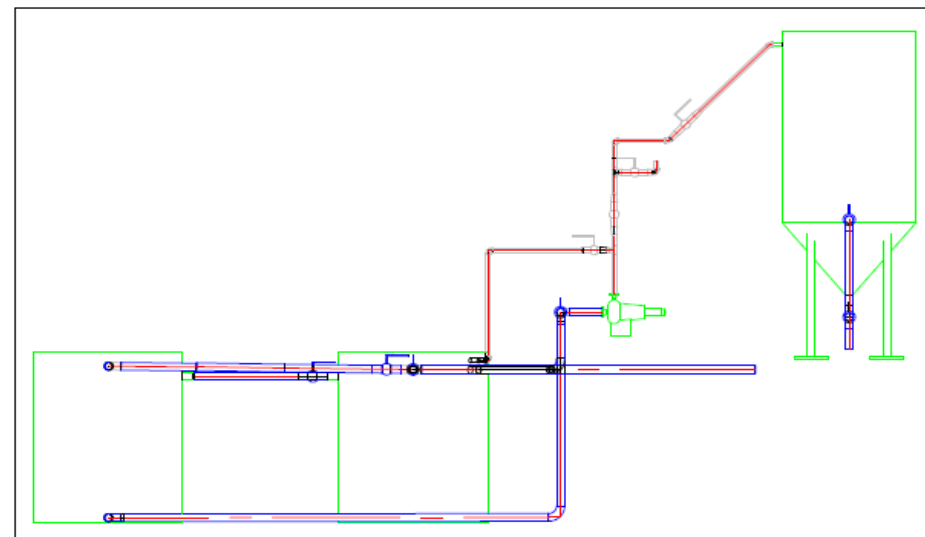
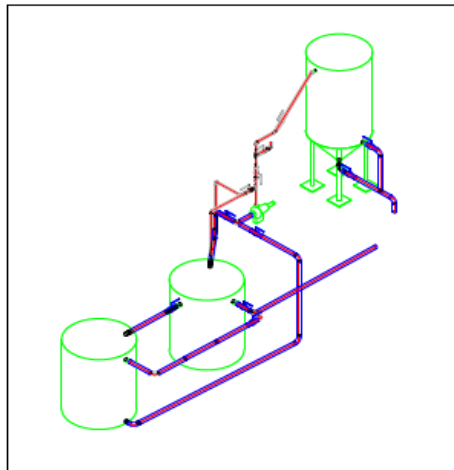
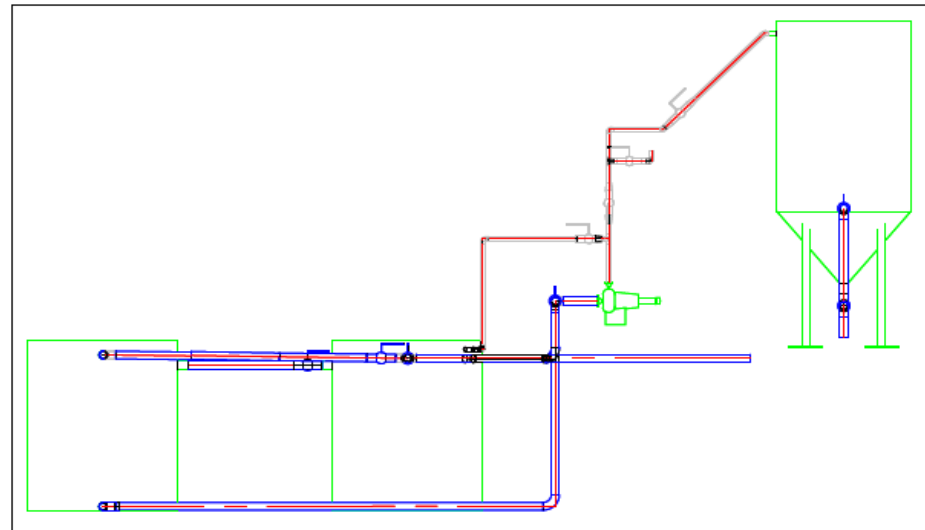
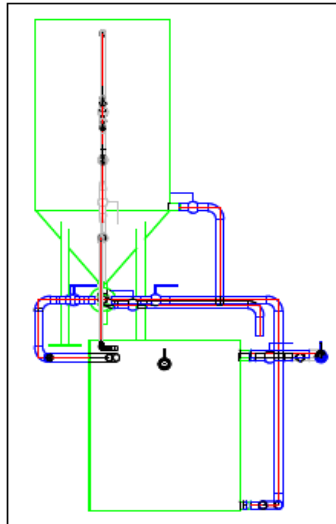
Anexo 9

Planta piloto en 3D



Anexo 10

Plano isométrico de la planta piloto



NOTAS GENERALES

No.	Rev 00	May 24
-----	--------	--------

NOMBRE DEL DIBUJO:

PLANO ISOMETRICO DE LA PLANTA PILOTO PARA EL TRATAMIENTO
DE AGUAS MEDIANTE COAGULACION Y FLOCULACION

DIRECCION:

CALLE LOS NEGROS 420 - SURQUILLO

AREA:
INGENIERIA

NÚMERO DE DIBUJO:
M-05

AUTOR:
DANTE JUNIOR CASTILLO CISNEROS

FIRMA

Anexo 11

Informe de ensayo del barrido ICP del agua residual Industrial



Alex Stewart
(International) del Perú S.R.L.
Official ASIC Partner

INFORME DE ENSAYO N° 1050/LOM-24

Pág. 1 de 1

Cliete : DANTE CASTILLO CISNEROS
Dirección : Calle Los Negocios N° 420 – Surquillo - Lima
Producto descrito por el cliente : Agua Residual
Identificación de la muestra : Muestra residual sin tratamiento
Cantidad de muestra : 01 Muestra de 1L Aprox.
Envase : Botella de plástico
Características de la muestra : -
Fecha de recepción : 16-05-2024
Inicio de análisis : 21-05-2024
Termino de análisis : 22-05-2024
Nuestra referencia : Orden de Análisis N° 2621
Referencia del cliente : -

RESULTADOS:

ASA - O	Ag mg/L	Al mg/L	As mg/L	B mg/L	Ba mg/L	Be ppm	Bi mg/L	Ca mg/L	Cd mg/L	Co mg/L
9691	<0.001	0.890	<0.003	0.650	0.057	<0.001	<0.003	82.422	<0.001	<0.001

ASA - O	Cr mg/L	Cu mg/L	Fe mg/L	Ga mg/L	Hg mg/L	K mg/L	Li mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Mo mg/L
9691	0.016	0.223	2.212	<0.003	0.015	6.472	0.161	7.435	0.080	<0.003

ASA - O	Na mg/L	Ni mg/L	P mg/L	Pb mg/L	Sb mg/L	Se mg/L	Si mg/L	Sn mg/L	Sr mg/L	Te mg/L
9691	116.058	0.015	0.497	14.910	<0.006	<0.007	7.784	0.007	0.758	<0.005

ASA - O	Ti mg/L	Tl mg/L	V mg/L	W mg/L	Zn mg/L	U mg/L	Ce mg/L
9691	<0.005	0.022	<0.004	<0.005	0.327	<0.010	<0.010

MÉTODO:

EPA Method 200.7:1994 Inductively Coupled Plasma –Atomic Emission Spectrometric Method for Trace Element Analysis of Water and Wastes.

OBSERVACIONES:

De acuerdo a la referencia del cliente la muestra fue tomada en incrementos, los días 13/05/2024 a las 10:25, el día 16/05/2024, a las 2:25pm. Recolectamos un total de 30L aproximadamente. Lugar de Muestreo: Tanque equalizador de agua residual de lavado, ubicado en Calle Los Negocios N° 420 – Surquillo - Lima.

Lima, 23 de Mayo del 2024


Lic. Karyn Loo Paiva
Gerente de Calidad
CQP 651

J.P.Y.

Los resultados emitidos en este informe corresponden únicamente a la cantidad de muestra recibida y ensayada en el laboratorio, no deben ser utilizados como certificación de conformidad con las normas de producto o sistema de calidad.
ADVERTENCIA: La alteración parcial o total de este documento es penalizada por ley. Cualquier corrección sólo podrá ser realizada por Alex Stewart (International) del Perú S.R.L. reemplazándolo por uno nuevo.

ASA-P-T-09

Form 15.-Rev.08-Oct.22



ESTE DOCUMENTO HA SIDO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS Y PRUEBAS EFECTUADOS EN NUESTRO LABORATORIO CON LA MAYOR HABILIDAD, CONOCIMIENTOS Y BUENA FE. LA RESPONSABILIDAD DE ALEX STEWART (INTERNATIONAL) DEL PERÚ S.R.L. AL EMITIR EL PRESENTE DOCUMENTO ESTA LIMITADA A LAS CONDICIONES DE PRESTACIÓN DE NUESTROS SERVICIOS ACEPTADAS POR EL CLIENTE. EL PRESENTE DOCUMENTO NO EXIME A LAS PARTES CONTRATANTES DE SUS OBLIGACIONES NI LIMITA EL EJERCICIO DE SUS DERECHOS.

Calle Los Negocios 420, Surquillo – Lima 34, Perú ☎ 051-652-4650
Email: asagerencia@alexstewart.com.pe www.alexstewart.com.pe

Anexo 12

Informe de ensayo de la caracterización del agua residual Industrial



Alex Stewart
(International) del Perú S.R.L.
Official ASIC Partner

INFORME DE ENSAYO N° 1049/LOM-24

Pág. 1 de 2

Cliete : DANTE CASTILLO CISNEROS
Dirección : Calle Los Negocios N° 420 – Surquillo - Lima
Producto descrito por el cliente : Agua Residual Industrial
Identificación de la muestra : Muestra residual sin tratamiento
Cantidad de muestra : 01 Muestra de 1L Aprox.
Envase : Botella de plástico
Características de la muestra : -
Fecha de recepción : 16-05-2024
Inicio de análisis : 17-05-2024
Termino de análisis : 27-05-2024
Nuestra referencia : Orden de Análisis N° 2621
Orden interna de laboratorio del 16-05-2024
Referencia del cliente : -

RESULTADOS:

ASA – O – 9691			
ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO	Unidades	Resultados	Límites D.S. N° 010-2019
Potencial Hidrógeno (pH)	-	4.61	6-9
Temperatura	°C	20.31	<35
Turbidez	NTU	37.7	-
Sólidos sedimentables	ml/l	3.5	8.5
Sólidos suspendidos totales	mg/l	72	500
Aluminio (Al)	mg/l	0.89	10
Arsénico (As)	mg/l	<0.003	0.5
Boro (B)	mg/l	0.65	4
Cadmio (Cd)	mg/l	<0.001	0.2
Cromo (Cr)	mg/l	0.016	10
Cobre (Cu)	mg/l	0.223	3
Manganeso (Mn)	mg/l	0.08	4
Mercurio (Hg)	mg/l	0.015	0.02
Níquel (Ni)	mg/l	0.015	4
Plomo (Pb)	mg/l	14.91	0.5
Zinc (Zn)	mg/l	0.327	10
Sulfatos	mg/l	140.8	1000
Sulfuros	mg/l	<0.0010	5

J.P.Y.

Los resultados emitidos en este informe corresponden únicamente a la cantidad de muestra recibida y ensayada en el laboratorio, no deben ser utilizados como certificación de conformidad con las normas de producto o sistema de calidad.
ADVERTENCIA: La alteración parcial o total de este documento es penalizado por ley. Cualquier corrección sólo podrá ser realizada por Alex Stewart (International) del Perú S.R.L. reemplazándolo por uno nuevo.

ASA-P-T-09

Form 15.-Rev.08-Oct.22

ESTE DOCUMENTO HA SIDO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS Y PRUEBAS EFECTUADOS EN NUESTRO LABORATORIO CON LA MAYOR HABILIDAD, CONOCIMIENTOS Y BUENA FE. LA RESPONSABILIDAD DE ALEX STEWART (INTERNATIONAL) DEL PERÚ S.R.L. AL EMITIR EL PRESENTE DOCUMENTO ESTA LIMITADA A LAS CONDICIONES DE PRESTACIÓN DE NUESTROS SERVICIOS ACEPTADAS POR EL CLIENTE. EL PRESENTE DOCUMENTO NO EXIME A LAS PARTES CONTRATANTES DE SUS OBLIGACIONES NI LIMITA EL EJERCICIO DE SUS DERECHOS.

Calle Los Negocios 420, Surquillo – Lima 34, Perú ☎ 051-652-4650
Email: asagerencia@alexstewart.com.pe www.alexstewart.com.pe

ANEXO 12

Informe de ensayo de la caracterización del agua residual Industrial (Continuación)



Alex Stewart
(International) del Perú S.R.L.
Official ASIC Partner

INFORME DE ENSAYO
N° 1049/LOM-24

Pág. 2 de 2

MÉTODOS:

EPA 150.1 1982 pH (Electrometric).
EPA 170.1 1974 Temperature (Thermometric).
SMEWW-APHA AWWA WEF 2130-B 24 th. Edition 2023 Turbidity Nephelometric Method.
SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 F, 24 rd. Ed. 2023 Solids. Settleable Solids.
SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24 rd. Ed. 2023 Solids. Total Suspended Solids Dried at 103 – 105°C.
EPA Method 200.7:1994 Inductively Coupled Plasma –Atomic Emission Spectrometric Method for Trace Element Analysis of Water and Wastes.
EPA 375.4 Sulfate 1978 (Turbidimetric). Spectrophotometer
EPA 376.2 sulfide (colorimetric, methylene Blue)

OBSERVACIONES:

De acuerdo a la referencia del cliente la muestra fue tomada el día 16/05/2024, a las 3:15 pm. Lugar de Muestreo: Tanque equalizador de agua residual de lavado, ubicado en Calle Los Negocios N° 420 – Surquillo - Lima.

Lima, 27 de Mayo del 2024



Lic. Karlyn Loo Paiva
Gerente de Calidad
CQP 651

J.P.V.

Los resultados emitidos en este informe corresponden únicamente a la cantidad de muestra recibida y ensayada en el laboratorio, no deben ser utilizados como certificación de conformidad con las normas de producto o sistema de calidad.

ADVERTENCIA: La alteración parcial o total de este documento es penalizado por ley. Cualquier corrección sólo podrá ser realizada por Alex Stewart (International) del Perú S.R.L. reemplazándolo por uno nuevo.

ASA-P.T-09 Form.15.-Rev.08-Oct.22

ESTE DOCUMENTO HA SIDO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS Y PRUEBAS EFECTUADOS EN NUESTRO LABORATORIO CON LA MAYOR HABILIDAD, CONOCIMIENTOS Y BUENA FE. LA RESPONSABILIDAD DE ALEX STEWART (INTERNATIONAL) DEL PERÚ S.R.L. AL EMITIR EL PRESENTE DOCUMENTO ESTÁ LIMITADA A LAS CONDICIONES DE PRESTACIÓN DE NUESTROS SERVICIOS ACEPTADAS POR EL CLIENTE. EL PRESENTE DOCUMENTO NO EXIME A LAS PARTES CONTRATANTES DE SUS OBLIGACIONES NI LIMITA EL EJERCICIO DE SUS DERECHOS.

Calle Los Negocios 420, Surquillo – Lima 34, Perú ☎ 051-652-4650
Email: asagerencia@alexstewart.com.pe www.alexstewart.com.pe



Anexo 13

Informe de ensayo del Barrido ICP del agua tratada



Alex Stewart
(International) del Perú S.R.L.
Official ASIC Partner

INFORME DE ENSAYO N° 1051/LOM-24

Pág. 1 de 5

Cliente : DANTE CASTILLO CISNEROS
Dirección : Calle Los Negocios N° 420 – Surquillo - Lima
Producto descrito por el cliente : Agua Residual Industrial
Identificación de la muestra : Agua tratada mediante el proceso de coagulación y floculación
Cantidad de muestra : 35 Muestras de 50ml Aprox. c/u
Envase : Digitubos de plásticos
Características de la muestra : -
Fecha de recepción : 29-05-2024
Inicio de análisis : 30-05-2024
Termino de análisis : 03-06-2024
Nuestra referencia : Orden de Análisis N° 2621
Referencia del cliente : -

RESULTADOS:

ASA - O	Ag mg/L	Al mg/L	As mg/L	B mg/L	Ba mg/L	Be ppm	Bi mg/L	Ca mg/L	Cd mg/L	Co mg/L
9692 - 1	<0.001	0.031	<0.003	0.642	0.025	<0.001	<0.003	80.886	<0.001	<0.001
9692 - 2	<0.001	0.124	<0.003	0.634	0.033	<0.001	<0.003	85.947	<0.001	<0.001
9692 - 3	<0.001	0.016	<0.003	0.605	0.023	<0.001	<0.003	76.764	<0.001	<0.001
9692 - 4	<0.001	0.125	<0.003	0.641	0.036	<0.001	<0.003	82.084	<0.001	<0.001
9692 - 5	<0.001	0.026	<0.003	<0.002	<0.001	<0.001	<0.003	79.484	<0.001	<0.001
9692 - 6	<0.001	0.069	<0.003	0.629	0.031	<0.001	<0.003	82.190	<0.001	<0.001
9692 - 7	<0.001	0.024	<0.003	0.644	0.025	<0.001	<0.003	79.264	<0.001	<0.001
9692 - 8	<0.001	0.129	<0.003	0.574	0.038	<0.001	<0.003	85.505	<0.001	<0.001
9692 - 9	<0.001	0.015	<0.003	0.646	0.025	<0.001	<0.003	83.057	<0.001	<0.001
9692 - 10	<0.001	0.115	<0.003	0.647	0.030	<0.001	<0.003	75.871	<0.001	<0.001
9692 - 11	<0.001	0.018	<0.003	0.621	0.023	<0.001	<0.003	77.886	<0.001	<0.001
9692 - 12	<0.001	0.273	<0.003	0.555	0.031	<0.001	<0.003	79.539	<0.001	<0.001
9692 - 13	<0.001	0.024	<0.003	0.642	0.025	<0.001	<0.003	80.576	<0.001	<0.001
9692 - 14	<0.001	0.084	<0.003	0.635	0.030	<0.001	<0.003	71.922	<0.001	<0.001
9692 - 15	<0.001	<0.005	<0.003	0.647	0.027	<0.001	<0.003	77.483	<0.001	<0.001
9692 - 16	<0.001	0.105	<0.003	0.622	0.034	<0.001	<0.003	83.086	<0.001	<0.001
9692 - 17	<0.001	0.009	<0.003	0.638	0.024	<0.001	<0.003	76.427	<0.001	<0.001
9692 - 18	<0.001	0.006	<0.003	0.642	0.024	<0.001	<0.003	77.053	<0.001	<0.001
9692 - 19	<0.001	0.036	<0.003	0.649	0.033	<0.001	<0.003	80.491	<0.001	<0.001
9692 - 20	<0.001	0.042	<0.003	0.574	0.037	<0.001	<0.003	83.171	<0.001	<0.001
9692 - 21	<0.001	0.007	<0.003	0.561	0.029	<0.001	<0.003	77.878	<0.001	<0.001
9692 - 22	<0.001	0.009	<0.003	0.566	0.029	<0.001	<0.003	79.214	<0.001	<0.001
9692 - 23	<0.001	0.053	<0.003	0.640	0.030	<0.001	<0.003	78.325	<0.001	<0.001
9692 - 24	<0.001	0.026	<0.003	0.639	0.030	<0.001	<0.003	77.487	<0.001	<0.001
9692 - 25	<0.001	0.007	<0.003	0.640	0.029	<0.001	<0.003	77.575	<0.001	<0.001

J.P.V.

Los resultados emitidos en este informe corresponden únicamente a la cantidad de muestra recibida y ensayada en el laboratorio, no deben ser utilizados como certificación de conformidad con las normas de producto o sistema de calidad.

ADVERTENCIA: La alteración parcial o total de este documento es penalizada por ley. Cualquier corrección sólo podrá ser realizada por Alex Stewart (International) del Perú S.R.L. reemplazándolo por uno nuevo.

ASA-P-T-09

Form 15.-Rev.08-Oct.22



ESTE DOCUMENTO HA SIDO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS Y PRUEBAS EFECTUADOS EN NUESTRO LABORATORIO CON LA MAYOR HABILIDAD, CONOCIMIENTOS Y BUENA FE. LA RESPONSABILIDAD DE ALEX STEWART (INTERNATIONAL) DEL PERÚ S.R.L. AL EMITIR EL PRESENTE DOCUMENTO ESTÁ LIMITADA A LAS CONDICIONES DE PRESTACIÓN DE NUESTROS SERVICIOS ACEPTADAS POR EL CLIENTE. EL PRESENTE DOCUMENTO NO EXIME A LAS PARTES CONTRATANTES DE SUS OBLIGACIONES NI LIMITA EL EJERCICIO DE SUS DERECHOS.

Calle Los Negocios 420, Surquillo – Lima 34, Perú ☎ 051-652-4650
Email: asagerencia@alexstewart.com.pe www.alexstewart.com.pe

ANEXO 13

Informe de ensayo del Barrido ICP del agua tratada (Continuación)



Alex Stewart
(International) del Perú S.R.L.
Official ASIC Partner

INFORME DE ENSAYO N° 1051/LOM-24

Pág. 2 de 5

ASA - O	Ag mg/L	Al mg/L	As mg/L	B mg/L	Ba mg/L	Be ppm	Bi mg/L	Ca mg/L	Cd mg/L	Co mg/L
9692 - 26	<0.001	0.009	<0.003	0.646	0.036	<0.001	<0.003	83.481	<0.001	<0.001
9692 - 27	<0.001	0.008	<0.003	0.648	0.030	<0.001	<0.003	79.244	<0.001	<0.001
9692 - 28	<0.001	0.011	<0.003	0.640	0.032	<0.001	<0.003	82.085	<0.001	<0.001
9692 - 29	<0.001	0.007	<0.003	0.625	0.033	<0.001	<0.003	79.789	<0.001	<0.001
9692 - 30	<0.001	0.013	<0.003	0.659	0.031	<0.001	<0.003	77.034	<0.001	<0.001
9692 - 31	<0.001	0.026	<0.003	0.611	0.033	<0.001	<0.003	81.724	<0.001	<0.001
9692 - 32	<0.001	0.027	<0.003	0.633	0.033	<0.001	<0.003	83.629	<0.001	<0.001
9692 - 33	<0.001	0.010	<0.003	0.646	0.031	<0.001	<0.003	78.978	<0.001	<0.001
9692 - 34	<0.001	0.013	<0.003	0.549	0.030	<0.001	<0.003	90.675	<0.001	<0.001
9692 - 35	<0.001	0.033	<0.003	0.533	0.030	<0.001	<0.003	78.112	<0.001	<0.001

ASA - O	Cr mg/L	Cu mg/L	Fe mg/L	Ga mg/L	Hg mg/L	K mg/L	Li mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Mo mg/L
9692 - 1	0.009	0.118	2.681	<0.003	<0.001	6.030	0.163	7.904	0.016	<0.003
9692 - 2	0.011	0.115	150.098	<0.003	<0.001	9.104	0.176	8.364	0.058	<0.003
9692 - 3	0.008	0.103	3.196	<0.003	<0.001	7.430	0.153	7.307	0.014	<0.003
9692 - 4	0.009	0.116	161.490	<0.003	<0.001	6.970	0.164	8.505	0.056	<0.003
9692 - 5	0.004	0.107	1.317	<0.003	<0.001	8.135	0.158	7.567	0.014	<0.003
9692 - 6	0.008	0.117	22.582	<0.003	<0.001	7.053	0.164	7.966	0.028	<0.003
9692 - 7	0.010	0.109	3.970	<0.003	<0.001	6.974	0.155	7.622	0.018	<0.003
9692 - 8	0.010	0.124	163.778	<0.003	<0.001	7.166	0.173	8.813	0.059	<0.003
9692 - 9	0.008	0.119	1.864	<0.003	<0.001	7.598	0.165	7.763	0.017	<0.003
9692 - 10	0.011	0.105	133.590	<0.003	<0.001	7.260	0.154	7.671	0.051	<0.003
9692 - 11	0.007	0.106	3.371	<0.003	<0.001	6.587	0.154	7.280	0.015	<0.003
9692 - 12	0.009	0.111	125.124	<0.003	<0.001	6.510	0.157	8.099	0.054	<0.003
9692 - 13	0.009	0.107	1.575	<0.003	<0.001	11.472	0.158	7.607	0.018	<0.003
9692 - 14	0.009	0.114	48.812	<0.003	<0.001	6.102	0.144	7.648	0.034	<0.003
9692 - 15	0.006	0.115	2.222	<0.003	<0.001	6.359	0.155	8.122	0.017	<0.003
9692 - 16	0.008	0.135	12.826	<0.003	<0.001	6.736	0.166	8.601	0.034	<0.003
9692 - 17	0.006	0.119	2.017	<0.003	<0.001	6.986	0.153	7.954	0.013	<0.003
9692 - 18	0.005	0.116	2.651	<0.003	<0.001	6.711	0.158	7.908	0.014	<0.003
9692 - 19	0.004	0.088	2.555	<0.003	<0.001	6.439	0.157	7.603	0.035	<0.003
9692 - 20	0.005	0.104	9.543	<0.003	<0.001	7.393	0.165	8.351	0.033	<0.003
9692 - 21	0.005	0.098	2.104	<0.003	<0.001	6.357	0.154	7.288	0.024	<0.003
9692 - 22	0.004	0.121	2.029	<0.003	<0.001	6.531	0.161	7.937	0.023	<0.003
9692 - 23	0.004	0.106	3.471	<0.003	<0.001	6.393	0.157	8.013	0.020	<0.003
9692 - 24	0.008	0.112	3.351	<0.003	<0.001	6.445	0.155	8.153	0.020	<0.003
9692 - 25	0.003	0.112	3.221	<0.003	<0.001	6.365	0.157	8.066	0.021	<0.003

J.P.V.

Los resultados emitidos en este informe corresponden únicamente a la cantidad de muestra recibida y ensayada en el laboratorio, no deben ser utilizados como certificación de conformidad con las normas de producto o sistema de calidad.
ADVERTENCIA: La alteración parcial o total de este documento es penalizada por ley. Cualquier corrección sólo podrá ser realizada por Alex Stewart (International) del Perú S.R.L. reemplazándolo por uno nuevo.



ASA-P-T-09

Form 15.-Rev.08-Oct.22

ESTE DOCUMENTO HA SIDO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS Y PRUEBAS EFECTUADOS EN NUESTRO LABORATORIO CON LA MAYOR HABILIDAD, CONOCIMIENTOS Y BUENA FE. LA RESPONSABILIDAD DE ALEX STEWART (INTERNATIONAL) DEL PERÚ S.R.L. AL EMITIR EL PRESENTE DOCUMENTO ESTÁ LIMITADA A LAS CONDICIONES DE PRESTACIÓN DE NUESTROS SERVICIOS ACEPTADAS POR EL CLIENTE. EL PRESENTE DOCUMENTO NO EXIME A LAS PARTES CONTRATANTES DE SUS OBLIGACIONES NI LIMITA EL EJERCICIO DE SUS DERECHOS.

Calle Los Negocios 420, Surquillo - Lima 34, Perú ☎ 051-652-4650
Email: asagerencia@alexstewart.com.pe www.alexstewart.com.pe

ANEXO 13

Informe de ensayo del Barrido ICP del agua tratada (Continuación)



Alex Stewart
(International) del Perú S.R.L.
Official ASIC Partner

INFORME DE ENSAYO N° 1051/LOM-24

Pág. 3 de 5

ASA - O	Cr mg/L	Cu mg/L	Fe mg/L	Ga mg/L	Hg mg/L	K mg/L	Li mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Mo mg/L
9692 - 26	0.006	0.130	3.556	<0.003	<0.001	6.925	0.166	9.396	0.022	<0.003
9692 - 27	0.004	0.113	3.442	<0.003	<0.001	6.653	0.160	8.320	0.022	<0.003
9692 - 28	0.005	0.116	2.425	<0.003	<0.001	6.804	0.160	8.218	0.023	<0.003
9692 - 29	0.004	0.116	2.680	<0.003	<0.001	6.966	0.162	8.774	0.022	<0.003
9692 - 30	0.003	0.112	2.431	<0.003	<0.001	6.311	0.155	8.076	0.023	<0.003
9692 - 31	0.004	0.116	2.600	<0.003	<0.001	6.698	0.162	8.419	0.024	<0.003
9692 - 32	0.008	0.116	3.244	<0.003	<0.001	7.055	0.1665	8.596	0.023	<0.003
9692 - 33	0.004	0.108	3.129	<0.003	<0.001	6.532	0.156	8.072	0.022	<0.003
9692 - 34	0.003	0.111	2.870	<0.003	<0.001	7.453	0.180	7.999	0.027	<0.003
9692 - 35	0.004	0.110	3.025	<0.003	<0.001	6.981	0.171	8.012	0.024	<0.003

ASA - O	Na mg/L	Ni mg/L	P mg/L	Pb mg/L	Sb mg/L	Se mg/L	Si mg/L	Sn mg/L	Sr mg/L	Te mg/L
9692 - 1	126.150	0.013	0.107	0.332	<0.006	<0.007	6.349	0.010	0.745	<0.005
9692 - 2	130.980	0.014	0.154	0.755	<0.006	<0.007	7.667	0.009	0.787	<0.005
9692 - 3	119.191	0.009	0.096	0.360	<0.006	<0.007	6.139	0.010	0.708	<0.005
9692 - 4	129.885	0.013	0.203	0.848	<0.006	<0.007	8.032	0.008	0.752	<0.005
9692 - 5	128.133	0.013	0.087	0.270	<0.006	<0.007	6.142	0.011	0.731	<0.005
9692 - 6	125.086	0.012	0.075	0.788	<0.006	<0.007	7.493	0.011	0.756	<0.005
9692 - 7	123.440	0.011	0.115	0.349	<0.006	<0.007	6.411	0.007	0.724	<0.005
9692 - 8	137.113	0.015	0.248	0.777	<0.006	<0.007	8.417	0.011	0.790	<0.005
9692 - 9	122.113	0.009	0.084	0.317	<0.006	<0.007	6.517	0.013	0.762	<0.005
9692 - 10	122.481	0.012	0.174	0.782	<0.006	<0.007	7.280	0.007	0.698	<0.005
9692 - 11	122.763	0.010	0.118	0.391	<0.006	<0.007	6.329	0.011	0.715	<0.005
9692 - 12	121.621	0.015	0.158	0.880	<0.006	<0.007	7.642	0.014	0.728	<0.005
9692 - 13	116.466	0.011	0.101	0.432	<0.006	<0.007	6.309	0.009	0.742	<0.005
9692 - 14	117.190	0.013	0.111	0.788	<0.006	<0.007	7.396	0.008	0.658	<0.005
9692 - 15	155.702	0.011	0.111	0.344	<0.006	<0.007	7.145	0.027	0.741	<0.005
9692 - 16	161.041	0.015	0.132	0.188	<0.006	<0.007	8.326	0.023	0.787	<0.005
9692 - 17	155.021	0.010	0.165	0.175	<0.006	<0.007	6.672	0.020	0.733	<0.005
9692 - 18	161.527	0.012	0.129	0.245	<0.006	<0.007	6.927	0.016	0.734	<0.005
9692 - 19	147.419	0.015	<0.010	0.363	<0.006	<0.007	7.057	0.025	0.776	<0.005
9692 - 20	149.010	0.012	0.053	0.180	<0.006	<0.007	8.065	0.019	0.792	<0.005
9692 - 21	112.538	0.012	0.037	0.176	<0.006	<0.007	6.576	0.022	0.751	<0.005
9692 - 22	149.405	0.013	0.055	0.164	<0.006	<0.007	6.936	0.022	0.757	<0.005
9692 - 23	139.657	0.010	0.073	0.163	<0.006	<0.007	7.286	0.019	0.749	<0.005
9692 - 24	144.597	0.011	0.071	0.173	<0.006	<0.007	7.472	0.021	0.744	<0.005
9692 - 25	150.721	0.012	0.063	0.207	<0.006	<0.007	7.158	0.023	0.742	<0.005

J.P.Y.

Los resultados emitidos en este informe corresponden únicamente a la cantidad de muestra recibida y ensayada en el laboratorio, no deben ser utilizados como certificación de conformidad con las normas de producto o sistema de calidad.

ADVERTENCIA: La alteración parcial o total de este documento es penalizada por ley. Cualquier corrección sólo podrá ser realizada por Alex Stewart (International) del Perú S.R.L. reemplazándolo por uno nuevo.

ASA-P-T-09

Form 15.-Rev.08-Oct.22

ESTE DOCUMENTO HA SIDO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS Y PRUEBAS EFECTUADOS EN NUESTRO LABORATORIO CON LA MAYOR HABILIDAD, CONOCIMIENTOS Y BUENA FE. LA RESPONSABILIDAD DE ALEX STEWART (INTERNATIONAL) DEL PERÚ S.R.L. AL EMITIR EL PRESENTE DOCUMENTO ESTÁ LIMITADA A LAS CONDICIONES DE PRESTACIÓN DE NUESTROS SERVICIOS ACEPTADAS POR EL CLIENTE. EL PRESENTE DOCUMENTO NO EXIME A LAS PARTES CONTRATANTES DE SUS OBLIGACIONES NI LIMITA EL EJERCICIO DE SUS DERECHOS.

Calle Los Negocios 420, Surquillo - Lima 34, Perú ☎ 051-652-4650
Email: asagerencia@alexstewart.com.pe www.alexstewart.com.pe

ANEXO 13

Informe de ensayo del Barrido ICP del agua tratada (Continuación)



**Alex Stewart
(International) del Perú S.R.L.**
Official ASIC Partner

INFORME DE ENSAYO N° 1051/LOM-24

Pág. 4 de 5

ASA - O	Na mg/L	Ni mg/L	P mg/L	Pb mg/L	Sb mg/L	Se mg/L	Si mg/L	Sn mg/L	Sr mg/L	Te mg/L
9692 - 26	147.268	0.007	0.060	0.209	<0.006	<0.007	8.382	0.021	0.802	<0.005
9692 - 27	156.238	0.011	0.103	0.175	<0.006	<0.007	7.558	0.016	0.754	<0.005
9692 - 28	153.746	0.010	0.113	0.198	<0.006	<0.007	7.351	0.020	0.783	<0.005
9692 - 29	143.804	0.012	0.077	0.179	<0.006	<0.007	7.853	0.021	0.758	<0.005
9692 - 30	141.161	0.012	0.092	0.192	<0.006	<0.007	7.325	0.018	0.737	<0.005
9692 - 31	174.547	0.014	0.075	0.202	<0.006	<0.007	7.613	0.019	0.773	<0.005
9692 - 32	157.636	0.011	0.038	0.266	<0.006	<0.007	7.929	0.017	0.791	<0.005
9692 - 33	147.851	0.014	0.067	0.172	<0.006	<0.007	7.353	0.015	0.754	<0.005
9692 - 34	141.743	0.013	0.132	0.170	<0.006	<0.007	7.429	0.020	0.864	<0.005
9692 - 35	148.020	0.009	0.101	1.105	<0.006	<0.007	7.255	0.018	0.711	<0.005

ASA - O	Ti mg/L	Tl mg/L	V mg/L	W mg/L	Zn mg/L	U mg/L	Ce mg/L
9692 - 1	<0.005	0.020	<0.004	<0.005	0.233	<0.010	<0.010
9692 - 2	<0.005	0.020	<0.004	<0.005	0.278	<0.010	<0.010
9692 - 3	<0.005	0.025	<0.004	<0.005	0.215	<0.010	<0.010
9692 - 4	<0.005	0.022	<0.004	<0.005	0.245	<0.010	<0.010
9692 - 5	<0.005	0.025	<0.004	<0.005	0.202	<0.010	<0.010
9692 - 6	<0.005	0.025	<0.004	<0.005	0.238	<0.010	<0.010
9692 - 7	<0.005	0.028	<0.004	<0.005	0.247	<0.010	<0.010
9692 - 8	<0.005	0.013	<0.004	<0.005	0.293	<0.010	<0.010
9692 - 9	<0.005	0.030	<0.004	<0.005	0.203	<0.010	<0.010
9692 - 10	<0.005	0.025	<0.004	<0.005	0.233	<0.010	<0.010
9692 - 11	<0.005	0.030	<0.004	<0.005	0.200	<0.010	<0.010
9692 - 12	<0.005	0.024	<0.004	<0.005	0.246	<0.010	<0.010
9692 - 13	<0.005	0.022	<0.004	<0.005	0.210	<0.010	<0.010
9692 - 14	<0.005	0.029	<0.004	<0.005	0.252	<0.010	<0.010
9692 - 15	<0.005	0.033	<0.004	<0.005	0.195	<0.010	<0.010
9692 - 16	<0.005	0.037	<0.004	<0.005	0.252	<0.010	<0.010
9692 - 17	<0.005	0.018	<0.004	<0.005	0.196	<0.010	<0.010
9692 - 18	<0.005	0.032	<0.004	<0.005	0.203	<0.010	<0.010
9692 - 19	<0.005	0.025	<0.004	<0.005	0.237	<0.010	<0.010
9692 - 20	<0.005	0.027	<0.004	<0.005	0.244	<0.010	<0.010
9692 - 21	<0.005	0.024	<0.004	<0.005	0.211	<0.010	<0.010
9692 - 22	<0.005	0.025	<0.004	<0.005	0.198	<0.010	<0.010
9692 - 23	<0.005	0.029	<0.004	<0.005	0.189	<0.010	<0.010
9692 - 24	<0.005	0.025	<0.004	<0.005	0.193	<0.010	<0.010
9692 - 25	<0.005	0.032	<0.004	<0.005	0.204	<0.010	<0.010

J.P.V.

Los resultados emitidos en este informe corresponden únicamente a la cantidad de muestra recibida y ensayada en el laboratorio, no deben ser utilizados como certificación de conformidad con las normas de producto o sistema de calidad.
ADVERTENCIA: La alteración parcial o total de este documento es penalizada por ley. Cualquier corrección sólo podrá ser realizada por Alex Stewart (International) del Perú S.R.L. reemplazándolo por uno nuevo.



ASA-PT-09

Form.15.-Rev.08-Oct.22

ESTE DOCUMENTO HA SIDO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS Y PRUEBAS EFECTUADOS EN NUESTRO LABORATORIO CON LA MAYOR HABILIDAD, CONOCIMIENTOS Y BUENA FE. LA RESPONSABILIDAD DE ALEX STEWART (INTERNATIONAL) DEL PERÚ S.R.L. AL EMITIR EL PRESENTE DOCUMENTO ESTÁ LIMITADA A LAS CONDICIONES DE PRESTACIÓN DE NUESTROS SERVICIOS ACEPTADAS POR EL CLIENTE. EL PRESENTE DOCUMENTO NO EXIME A LAS PARTES CONTRATANTES DE SUS OBLIGACIONES NI LIMITA EL EJERCICIO DE SUS DERECHOS.

Calle Los Negocios 420, Surquillo - Lima 34, Perú ☎ 051-652-4650
Email: asagerencia@alexstewart.com.pe www.alexstewart.com.pe

ANEXO 13

Informe de ensayo del Barrido ICP del agua tratada (Continuación)



Alex Stewart
(International) del Perú S.R.L.
Official ASIC Partner

INFORME DE ENSAYO N° 1051/LOM-24

Pág. 5 de 5

ASA - O	Ti mg/L	Tl mg/L	V mg/L	W mg/L	Zn mg/L	U mg/L	Ce mg/L
9692 - 26	<0.005	0.028	<0.004	<0.005	0.209	<0.010	<0.010
9692 - 27	<0.005	0.036	<0.004	<0.005	0.198	<0.010	<0.010
9692 - 28	<0.005	0.031	<0.004	<0.005	0.204	<0.010	<0.010
9692 - 29	<0.005	0.021	<0.004	<0.005	0.216	<0.010	<0.010
9692 - 30	<0.005	0.024	<0.004	<0.005	0.262	<0.010	<0.010
9692 - 31	<0.005	0.022	<0.004	<0.005	0.201	<0.010	<0.010
9692 - 32	<0.005	0.020	<0.004	<0.005	0.200	<0.010	<0.010
9692 - 33	<0.005	0.021	<0.004	<0.005	0.200	<0.010	<0.010
9692 - 34	<0.005	0.025	<0.004	<0.005	0.204	<0.010	<0.010
9692 - 35	<0.005	0.026	<0.004	<0.005	0.201	<0.010	<0.010

MÉTODO:

EPA Method 200.7:1994 Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometric Method for Trace Element Analysis of Water and Wastes.

Lima, 03 de Junio del 2024


Lic. Karyn Loo Paiva
Gerente de Calidad
CQP 651

J.P.Y.

Los resultados emitidos en este informe corresponden únicamente a la cantidad de muestra recibida y ensayada en el laboratorio, no deben ser utilizados como certificación de conformidad con las normas de producto o sistema de calidad.

ADVERTENCIA: La alteración parcial o total de este documento es penalizado por ley. Cualquier corrección sólo podrá ser realizada por Alex Stewart (International) del Perú S.R.L. reemplazándolo por uno nuevo.

ASA-P-T-09

Form.15.-Rev.08-Oct.22



ESTE DOCUMENTO HA SIDO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS Y PRUEBAS EFECTUADOS EN NUESTRO LABORATORIO CON LA MAYOR HABILIDAD, CONOCIMIENTOS Y BUENA FE. LA RESPONSABILIDAD DE ALEX STEWART (INTERNATIONAL) DEL PERÚ S.R.L. AL EMITIR EL PRESENTE DOCUMENTO ESTÁ LIMITADA A LAS CONDICIONES DE PRESTACIÓN DE NUESTROS SERVICIOS ACEPTADAS POR EL CLIENTE. EL PRESENTE DOCUMENTO NO EXIME A LAS PARTES CONTRATANTES DE SUS OBLIGACIONES NI LIMITA EL EJERCICIO DE SUS DERECHOS.

Calle Los Negocios 420, Surquillo - Lima 34, Perú ☎ 051-652-4650
Email: asagerencia@alexstewart.com.pe www.alexstewart.com.pe

Anexo 14

Informe de ensayo de la verificación de la dosificación óptima



Alex Stewart
(International) del Perú S.R.L.
Official ASIC Partner

INFORME DE ENSAYO N° 1052/LOM-24

Pág. 1 de 2

Cliente : DANTE CASTILLO CISNEROS
Dirección : Calle Los Negocios N° 420 – Surquillo - Lima
Producto descrito por el cliente : Agua Residual Industrial
Identificación de la muestra : Tratamiento del agua empleando la dosis optima (Nivel Laboratorio)
Cantidad de muestra : 08 Muestras de 50ml Aprox. c/u
Envase : Digitubos de plástico
Características de la muestra : -
Fecha de recepción : 07-06-2024
Inicio de análisis : 10-06-2024
Termino de análisis : 11-06-2024
Nuestra referencia : Orden de Análisis N° 2828
Referencia del cliente : -

RESULTADOS:

ASA - O	Ag mg/L	Al mg/L	As mg/L	B mg/L	Ba mg/L	Be ppm	Bi mg/L	Ca mg/L	Cd mg/L	Co mg/L
10050-R1	<0.001	0.011	<0.003	0.501	0.031	<0.001	<0.003	79.105	<0.001	<0.001
10050-R2	<0.001	0.014	<0.003	0.656	0.031	<0.001	<0.003	78.620	<0.001	<0.001
10050-R3	<0.001	0.015	<0.003	0.680	0.031	<0.001	<0.003	78.878	<0.001	<0.001
10050-R4	<0.001	0.014	<0.003	0.598	0.031	<0.001	<0.003	78.719	<0.001	<0.001
10050-R5	<0.001	0.014	<0.003	0.600	0.029	<0.001	<0.003	80.292	<0.001	<0.001
10050-R6	<0.001	0.010	<0.003	0.651	0.030	<0.001	<0.003	81.477	<0.001	<0.001
10050-R7	<0.001	0.010	<0.003	0.638	0.030	<0.001	<0.003	78.627	<0.001	<0.001
10050-R8	<0.001	0.014	<0.003	0.627	0.032	<0.001	<0.003	79.801	<0.001	<0.001

ASA - O	Cr mg/L	Cu mg/L	Fe mg/L	Ga mg/L	Hg mg/L	K mg/L	Li mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Mo mg/L
10050-R1	0.005	0.102	2.492	<0.003	<0.001	6.456	0.156	7.730	0.020	<0.003
10050-R2	0.003	0.110	2.708	<0.003	<0.001	6.372	0.158	7.206	0.022	<0.003
10050-R3	0.004	0.117	2.044	<0.003	<0.001	6.537	0.158	7.017	0.022	<0.003
10050-R4	0.005	0.114	3.000	<0.003	<0.001	6.244	0.155	7.870	0.023	<0.003
10050-R5	0.004	0.102	2.997	<0.003	<0.001	6.288	0.151	7.945	0.023	<0.003
10050-R6	0.003	0.102	2.652	<0.003	<0.001	6.556	0.156	7.847	0.021	<0.003
10050-R7	0.003	0.107	2.533	<0.003	<0.001	6.478	0.159	7.165	0.020	<0.003
10050-R8	0.003	0.105	2.507	<0.003	<0.001	6.346	0.152	7.418	0.024	<0.003

J.P.V.

Los resultados emitidos en este informe corresponden únicamente a la cantidad de muestra recibida y ensayada en el laboratorio, no deben ser utilizados como certificación de conformidad con las normas de producto o sistema de calidad.

ADVERTENCIA: La alteración parcial o total de este documento es penalizado por ley. Cualquier corrección sólo podrá ser realizada por Alex Stewart (International) del Perú S.R.L. reemplazándolo por uno nuevo.



ASA-PT-09

Form.15-Rev.08-Oct.22

ESTE DOCUMENTO HA SIDO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS Y PRUEBAS EFECTUADOS EN NUESTRO LABORATORIO CON LA MAYOR HABILIDAD, CONOCIMIENTOS Y BUENA FE. LA RESPONSABILIDAD DE ALEX STEWART (INTERNATIONAL) DEL PERÚ S.R.L. AL EMITIR EL PRESENTE DOCUMENTO ESTÁ LIMITADA A LAS CONDICIONES DE PRESTACIÓN DE NUESTROS SERVICIOS ACEPTADAS POR EL CLIENTE. EL PRESENTE DOCUMENTO NO EXIME A LAS PARTES CONTRATANTES DE SUS OBLIGACIONES NI LIMITA EL EJERCICIO DE SUS DERECHOS.

Calle Los Negocios 420, Surquillo – Lima 34, Perú ☎ 051-652-4650
Email: asagerencia@alexstewart.com.pe www.alexstewart.com.pe

ANEXO 14

Informe de ensayo de la verificación de la dosificación óptima (Continuación)



Alex Stewart
(International) del Perú S.R.L.
Official ASIC Partner

INFORME DE ENSAYO N° 1052/LOM-24

Pág. 2 de 2

ASA - O	Na mg/L	Ni mg/L	P mg/L	Pb mg/L	Sb mg/L	Se mg/L	Si mg/L	Sn mg/L	Sr mg/L	Te mg/L
10050-R1	117.656	0.010	0.056	0.1515	<0.006	<0.007	5.950	0.020	0.670	<0.005
10050-R2	113.840	0.012	0.085	0.1548	<0.006	<0.007	6.268	0.020	0.680	<0.005
10050-R3	116.594	0.009	0.088	0.1439	<0.006	<0.007	5.789	0.020	0.717	<0.005
10050-R4	113.765	0.009	0.097	0.1502	<0.006	<0.007	5.958	0.021	0.726	<0.005
10050-R5	115.396	0.015	0.093	0.1503	<0.006	<0.007	5.048	0.022	0.658	<0.005
10050-R6	115.249	0.010	0.075	0.1440	<0.006	<0.007	5.850	0.018	0.698	<0.005
10050-R7	116.423	0.013	0.071	0.1576	<0.006	<0.007	5.888	0.021	0.644	<0.005
10050-R8	113.292	0.010	0.074	0.1455	<0.006	<0.007	6.219	0.020	0.749	<0.005

ASA - O	Ti mg/L	Tl mg/L	V mg/L	W mg/L	Zn mg/L	U mg/L	Ce mg/L
10050-R1	<0.005	0.024	<0.004	<0.005	0.169	<0.010	<0.010
10050-R2	<0.005	0.025	<0.004	<0.005	0.112	<0.010	<0.010
10050-R3	<0.005	0.028	<0.004	<0.005	0.113	<0.010	<0.010
10050-R4	<0.005	0.024	<0.004	<0.005	0.121	<0.010	<0.010
10050-R5	<0.005	0.027	<0.004	<0.005	0.117	<0.010	<0.010
10050-R6	<0.005	0.022	<0.004	<0.005	0.177	<0.010	<0.010
10050-R7	<0.005	0.027	<0.004	<0.005	0.180	<0.010	<0.010
10050-R8	<0.005	0.031	<0.004	<0.005	0.179	<0.010	<0.010

MÉTODO:

EPA Method 200.7:1994 Inductively Coupled Plasma -Atomic Emission Spectrometric Method for Trace Element Analysis of Water and Wastes.

Lima, 11 de Junio del 2024


Lic. Karlyn Loo Paiva
Gerente de Calidad
CQP 651

J.P.Y.

Los resultados emitidos en este informe corresponden únicamente a la cantidad de muestra recibida y ensayada en el laboratorio, no deben ser utilizados como certificación de conformidad con las normas de producto o sistema de calidad.

ADVERTENCIA: La alteración parcial o total de este documento es penalizado por ley. Cualquier corrección sólo podrá ser realizada por Alex Stewart (International) del Perú S.R.L. reemplazándolo por uno nuevo.

ASA-P-T-09

Form 15.-Rev.08-Oct.23

ESTE DOCUMENTO HA SIDO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS Y PRUEBAS EFECTUADOS EN NUESTRO LABORATORIO CON LA MAYOR HABILIDAD, CONOCIMIENTOS Y BUENA FE. LA RESPONSABILIDAD DE ALEX STEWART (INTERNATIONAL) DEL PERÚ S.R.L. AL EMITIR EL PRESENTE DOCUMENTO ESTÁ LIMITADA A LAS CONDICIONES DE PRESTACIÓN DE NUESTROS SERVICIOS ACEPTADAS POR EL CLIENTE. EL PRESENTE DOCUMENTO NO EXIME A LAS PARTES CONTRATANTES DE SUS OBLIGACIONES NI LIMITA EL EJERCICIO DE SUS DERECHOS.

Calle Los Negocios 420, Surquillo – Lima 34, Perú ☎ 051-652-4650
Email: asagerencia@alexstewart.com.pe www.alexstewart.com.pe



Anexo 15

Informe de ensayo del monitoreo en planta piloto



Alex Stewart
(International) del Perú S.R.L.
Official ASIC Partner

INFORME DE ENSAYO N° 1054/LOM-24

Pág. 1 de 3

Cliente : DANTE CASTILLO CISNEROS
Dirección : Calle Los Negocios N° 420 – Surquillo - Lima
Producto descrito por el cliente : Agua Residual Industrial
Identificación de la muestra : Monitoreo de agua tratada (Nivel planta piloto)
Cantidad de muestra : 15 Muestras de 50ml Aprox. c/u
Envase : Digitubo de plástico
Características de la muestra : -
Fecha de recepción : 01-07-2024
Inicio de análisis : 02-07-2024
Termino de análisis : 16-08-2024
Nuestra referencia : Orden de Análisis N° 2923
Referencia del cliente : -

RESULTADOS:

ASA - O	Ag mg/L	Al mg/L	As mg/L	B mg/L	Ba mg/L	Be ppm	Bi mg/L	Ca mg/L	Cd mg/L	Co mg/L
10052-1/07/2024	<0.001	0.009	<0.003	0.578	0.031	<0.001	<0.003	79.369	<0.001	<0.001
10052-3/07/2024	<0.001	0.013	<0.003	0.597	0.031	<0.001	<0.003	81.663	<0.001	<0.001
10052-5/07/2024	<0.001	0.012	<0.003	0.684	0.029	<0.001	<0.003	83.269	<0.001	<0.001
10052-8/07/2024	<0.001	0.014	<0.003	0.591	0.031	<0.001	<0.003	81.112	<0.001	<0.001
10052-10/07/2024	<0.001	0.012	<0.003	0.660	0.029	<0.001	<0.003	79.232	<0.001	<0.001
10052-12/07/2024	<0.001	0.011	<0.003	0.694	0.031	<0.001	<0.003	83.014	<0.001	<0.001
10052-15/07/2024	<0.001	0.007	<0.003	0.548	0.031	<0.001	<0.003	81.977	<0.001	<0.001
10052-17/07/2024	<0.001	0.014	<0.003	0.571	0.030	<0.001	<0.003	83.969	<0.001	<0.001
10052-19/07/2024	<0.001	0.008	<0.003	0.681	0.031	<0.001	<0.003	83.925	<0.001	<0.001
10052-22/07/2024	<0.001	0.008	<0.003	0.513	0.030	<0.001	<0.003	78.541	<0.001	<0.001
10052-24/07/2024	<0.001	0.008	<0.003	0.536	0.031	<0.001	<0.003	78.409	<0.001	<0.001
10052-26/07/2024	<0.001	0.008	<0.003	0.600	0.030	<0.001	<0.003	78.148	<0.001	<0.001
10052-30/07/2024	<0.001	0.010	<0.003	0.647	0.029	<0.001	<0.003	81.409	<0.001	<0.001
10052-2/08/2024	<0.001	0.008	<0.003	0.550	0.030	<0.001	<0.003	82.659	<0.001	<0.001
10052-8/08/2024	<0.001	0.011	<0.003	0.513	0.030	<0.001	<0.003	82.417	<0.001	<0.001

J.P.Y.

Los resultados emitidos en este informe corresponden únicamente a la cantidad de muestra recibida y ensayada en el laboratorio, no deben ser utilizados como certificación de conformidad con las normas de producto o sistema de calidad.

ADVERTENCIA: La alteración parcial o total de este documento es penalizado por ley. Cualquier corrección sólo podrá ser realizada por Alex Stewart (International) del Perú S.R.L. reemplazándolo por uno nuevo.

ASA-P-T-09

Form 15.-Rev.08-Oct.22

ESTE DOCUMENTO HA SIDO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS Y PRUEBAS EFECTUADOS EN NUESTRO LABORATORIO CON LA MAYOR HABILIDAD, CONOCIMIENTOS Y BUENA FE. LA RESPONSABILIDAD DE ALEX STEWART (INTERNATIONAL) DEL PERU S.R.L. AL EMITIR EL PRESENTE DOCUMENTO ESTÁ LIMITADA A LAS CONDICIONES DE PRESTACIÓN DE NUESTROS SERVICIOS ACEPTADAS POR EL CLIENTE. EL PRESENTE DOCUMENTO NO EXIME A LAS PARTES CONTRATANTES DE SUS OBLIGACIONES NI LIMITA EL EJERCICIO DE SUS DERECHOS.

Calle Los Negocios 420, Surquillo – Lima 34, Perú ☎ 051-652-4650
Email: asagerencia@alexstewart.com.pe www.alexstewart.com.pe

ANEXO 15

Informe de ensayo del monitoreo en planta piloto (Continuación)



Alex Stewart
(International) del Perú S.R.L.
Official ASIC Partner

INFORME DE ENSAYO N° 1054/LOM-24

Pág. 2 de 3

ASA - O	Cr mg/L	Cu mg/L	Fe mg/L	Ga mg/L	Hg mg/L	K mg/L	Li mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Mo mg/L
10052-1/07/2024	0.004	0.119	2.577	<0.003	<0.001	6.452	0.152	7.481	0.022	<0.003
10052-3/07/2024	0.004	0.110	3.356	<0.003	<0.001	6.253	0.160	7.539	0.023	<0.003
10052-5/07/2024	0.003	0.114	2.024	<0.003	<0.001	6.423	0.160	7.976	0.020	<0.003
10052-8/07/2024	0.005	0.097	3.317	<0.003	<0.001	6.946	0.158	7.877	0.023	<0.003
10052-10/07/2024	0.006	0.109	2.858	<0.003	<0.001	6.513	0.159	8.156	0.022	<0.003
10052-12/07/2024	0.003	0.117	2.789	<0.003	<0.001	6.203	0.156	7.766	0.021	<0.003
10052-15/07/2024	0.005	0.108	2.640	<0.003	<0.001	6.066	0.158	7.175	0.023	<0.003
10052-17/07/2024	0.003	0.106	2.485	<0.003	<0.001	6.864	0.157	7.225	0.024	<0.003
10052-19/07/2024	0.003	0.110	3.009	<0.003	<0.001	6.254	0.152	8.495	0.021	<0.003
10052-22/07/2024	0.005	0.108	2.749	<0.003	<0.001	6.398	0.158	7.930	0.023	<0.003
10052-24/07/2024	0.004	0.120	3.372	<0.003	<0.001	6.527	0.151	8.136	0.022	<0.003
10052-26/07/2024	0.005	0.100	3.386	<0.003	<0.001	6.448	0.1506	7.502	0.021	<0.003
10052-30/07/2024	0.005	0.117	3.201	<0.003	<0.001	6.294	0.151	7.148	0.021	<0.003
10052-2/08/2024	0.005	0.104	3.416	<0.003	<0.001	6.831	0.157	7.652	0.021	<0.003
10052-8/08/2024	0.004	0.098	2.356	<0.003	<0.001	6.771	0.151	8.030	0.022	<0.003

ASA - O	Na mg/L	Ni mg/L	P mg/L	Pb mg/L	Sb mg/L	Se mg/L	Si mg/L	Sn mg/L	Sr mg/L	Te mg/L
10052-1/07/2024	117.614	0.012	0.075	0.099	<0.006	<0.007	6.522	0.020	0.742	<0.005
10052-3/07/2024	119.789	0.009	0.089	0.131	<0.006	<0.007	6.977	0.022	0.687	<0.005
10052-5/07/2024	124.572	0.009	0.063	0.143	<0.006	<0.007	6.553	0.021	0.753	<0.005
10052-8/07/2024	119.361	0.013	0.096	0.098	<0.006	<0.007	6.860	0.020	0.610	<0.005
10052-10/07/2024	113.407	0.012	0.065	0.131	<0.006	<0.007	6.746	0.021	0.698	<0.005
10052-12/07/2024	115.549	0.014	0.096	0.133	<0.006	<0.007	6.433	0.020	0.673	<0.005
10052-15/07/2024	118.723	0.014	0.095	0.127	<0.006	<0.007	6.544	0.021	0.665	<0.005
10052-17/07/2024	112.065	0.014	0.076	0.098	<0.006	<0.007	6.579	0.021	0.750	<0.005
10052-19/07/2024	127.448	0.013	0.080	0.082	<0.006	<0.007	6.216	0.022	0.793	<0.005
10052-22/07/2024	128.077	0.014	0.067	0.096	<0.006	<0.007	6.055	0.020	0.628	<0.005
10052-24/07/2024	129.855	0.015	0.087	0.095	<0.006	<0.007	6.860	0.021	0.759	<0.005
10052-26/07/2024	122.549	0.015	0.068	0.118	<0.006	<0.007	6.263	0.019	0.784	<0.005
10052-30/07/2024	114.306	0.012	0.061	0.142	<0.006	<0.007	6.741	0.021	0.761	<0.005
10052-2/08/2024	112.756	0.009	0.083	0.081	<0.006	<0.007	6.306	0.021	0.643	<0.005
10052-8/08/2024	123.529	0.011	0.060	0.103	<0.006	<0.007	6.927	0.018	0.749	<0.005

J.P.Y.

Los resultados emitidos en este informe corresponden únicamente a la cantidad de muestra recibida y ensayada en el laboratorio, no deben ser utilizados como certificación de conformidad con las normas de producto o sistema de calidad.

ADVERTENCIA: La alteración parcial o total de este documento es penalizado por ley. Cualquier corrección sólo podrá ser realizada por Alex Stewart (International) del Perú S.R.L. reemplazándolo por uno nuevo.

ASA-P-T-09

Form 15.-Rev.08-Oct.22

ESTE DOCUMENTO HA SIDO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS Y PRUEBAS EFECTUADOS EN NUESTRO LABORATORIO CON LA MAYOR HABILIDAD, CONOCIMIENTOS Y BUENA FE. LA RESPONSABILIDAD DE ALEX STEWART (INTERNATIONAL) DEL PERÚ S.R.L. AL EMITIR EL PRESENTE DOCUMENTO ESTÁ LIMITADA A LAS CONDICIONES DE PRESTACIÓN DE NUESTROS SERVICIOS ACEPTADAS POR EL CLIENTE. EL PRESENTE DOCUMENTO NO EXIME A LAS PARTES CONTRATANTES DE SUS OBLIGACIONES NI LIMITA EL EJERCICIO DE SUS DERECHOS.

Calle Los Negocios 420, Surquillo – Lima 34, Perú ☎ 051-652-4650
Email: asagerencia@alexstewart.com.pe www.alexstewart.com.pe

ANEXO 15

Informe de ensayo del monitoreo en planta piloto (Continuación)



Alex Stewart
(International) del Perú S.R.L.
Official ASIC Partner

INFORME DE ENSAYO N° 1054/LOM-24

Pág. 3 de 3

ASA - O	Ti mg/L	Tl mg/L	V mg/L	W mg/L	Zn mg/L	U mg/L	Ce mg/L
10052-1/07/2024	<0.005	0.034	<0.004	<0.005	0.165	<0.010	<0.010
10052-3/07/2024	<0.005	0.032	<0.004	<0.005	0.197	<0.010	<0.010
10052-5/07/2024	<0.005	0.031	<0.004	<0.005	0.163	<0.010	<0.010
10052-8/07/2024	<0.005	0.028	<0.004	<0.005	0.170	<0.010	<0.010
10052-10/07/2024	<0.005	0.031	<0.004	<0.005	0.192	<0.010	<0.010
10052-12/07/2024	<0.005	0.033	<0.004	<0.005	0.191	<0.010	<0.010
10052-15/07/2024	<0.005	0.033	<0.004	<0.005	0.160	<0.010	<0.010
10052-17/07/2024	<0.005	0.030	<0.004	<0.005	0.200	<0.010	<0.010
10052-19/07/2024	<0.005	0.034	<0.004	<0.005	0.177	<0.010	<0.010
10052-22/07/2024	<0.005	0.030	<0.004	<0.005	0.172	<0.010	<0.010
10052-24/07/2024	<0.005	0.035	<0.004	<0.005	0.196	<0.010	<0.010
10052-26/07/2024	<0.005	0.031	<0.004	<0.005	0.216	<0.010	<0.010
10052-30/07/2024	<0.005	0.030	<0.004	<0.005	0.191	<0.010	<0.010
10052-2/08/2024	<0.005	0.026	<0.004	<0.005	0.165	<0.010	<0.010
10052-8/08/2024	<0.005	0.028	<0.004	<0.005	0.164	<0.010	<0.010

ASA - O	Al mg/L	As mg/L	B mg/L	Cd mg/L	Cr mg/L	Cu mg/L	Mn mg/L	Hg mg/L	Ni mg/L	Pb mg/L	Zn mg/L
*10052-8/08/2024	0.92	<0.003	0.71	<0.001	0.020	0.320	0.10	0.018	0.017	14.651	0.422

MÉTODO:

EPA Method 200.7:1994 Inductively Coupled Plasma -Atomic Emission Spectrometric Method for Trace Element Analysis of Water and Wastes.

OBSERVACIONES:

*Muestra sin tratamiento.

Lima, 14 de Agosto del 2024


Lic. Karlyn Loo Paiva
Gerente de Calidad
CQP 651

J.P.V.

Los resultados emitidos en este informe corresponden únicamente a la cantidad de muestra recibida y ensayada en el laboratorio, no deben ser utilizados como certificación de conformidad con las normas de producto o sistema de calidad.

ADVERTENCIA: La alteración parcial o total de este documento es penalizado por ley. Cualquier corrección sólo podrá ser realizada por Alex Stewart (International) del Perú S.R.L. reemplazándolo por uno nuevo.

ASA-P-T-09

Form 15.-Rev.08-Oct.22



ESTE DOCUMENTO HA SIDO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS Y PRUEBAS EFECTUADOS EN NUESTRO LABORATORIO CON LA MAYOR HABILIDAD, CONOCIMIENTOS Y BUENA FE. LA RESPONSABILIDAD DE ALEX STEWART (INTERNATIONAL) DEL PERÚ S.R.L. AL EMITIR EL PRESENTE DOCUMENTO ESTÁ LIMITADA A LAS CONDICIONES DE PRESTACIÓN DE NUESTROS SERVICIOS ACEPTADAS POR EL CLIENTE. EL PRESENTE DOCUMENTO NO EXIME A LAS PARTES CONTRATANTES DE SUS OBLIGACIONES NI LIMITA EL EJERCICIO DE SUS DERECHOS.

Calle Los Negocios 420, Surquillo – Lima 34, Perú ☎ 051-652-4650
Email: asagerencia@alexstewart.com.pe www.alexstewart.com.pe

Anexo 16

Informe de ensayo de la caracterización del agua residual tratada a nivel planta piloto



Alex Stewart
(International) del Perú S.R.L.
Official ASIC Partner

INFORME DE ENSAYO N° 1053/LOM-24

Pág. 1 de 2

Cliente : DANTE CASTILLO CISNEROS
Dirección : Calle Los Negocios N° 420 – Surquillo - Lima
Producto descrito por el cliente : Agua Residual Industrial
Identificación de la muestra : Caracterización del agua residual industrial tratada (Nivel planta piloto)
Cantidad de muestra : 01 Muestra de 1L Aprox.
Envase : Botella de plástico
Características de la muestra : -
Fecha de recepción : 08-08-2024
Inicio de análisis : 09-08-2024
Termino de análisis : 16-08-2024
Nuestra referencia : Orden de Análisis N° 2923
Referencia del cliente : -

RESULTADOS:

ASA – O – 10052 - 08/08/2024			
ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO	Unidades	Resultados	Límites D.S. N° 010-2019
Potencial Hidrógeno (pH)	-	7.02	6-9
Temperatura	°C	19.24	<35
Turbidez	NTU	7.22	-
Sólidos sedimentables	ml/l	0.1	8.5
Sólidos suspendidos totales	mg/l	43	500
Aluminio (Al)	mg/l	0.011	10
Arsénico (As)	mg/l	<0.003	0.5
Boro (B)	mg/l	0.513	4
Cadmio (Cd)	mg/l	<0.001	0.2
Cromo (Cr)	mg/l	0.004	10
Cobre (Cu)	mg/l	0.098	3
Manganeso (Mn)	mg/l	0.022	4
Mercurio (Hg)	mg/l	<0.001	0.02
Níquel (Ni)	mg/l	0.011	4
Plomo (Pb)	mg/l	0.103	0.5
Zinc (Zn)	mg/l	0.164	10
Sulfatos	mg/l	221.3	1000
Sulfuros	mg/l	<0.0010	5

J.P.V.

Los resultados emitidos en este informe corresponden únicamente a la cantidad de muestra recibida y ensayada en el laboratorio, no deben ser utilizados como certificación de conformidad con las normas de producto o sistema de calidad.
ADVERTENCIA: La alteración parcial o total de este documento es penalizado por ley. Cualquier corrección sólo podrá ser realizada por Alex Stewart (International) del Perú S.R.L. reemplazándolo por uno nuevo.

ASA-P-T-09

Form 15.-Rev.08-Oct 22



ESTE DOCUMENTO HA SIDO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS Y PRUEBAS EFECTUADOS EN NUESTRO LABORATORIO CON LA MAYOR HABILIDAD, CONOCIMIENTOS Y BUENA FE. LA RESPONSABILIDAD DE ALEX STEWART (INTERNATIONAL) DEL PERÚ S.R.L. AL EMITIR EL PRESENTE DOCUMENTO ESTÁ LIMITADA A LAS CONDICIONES DE PRESTACIÓN DE NUESTROS SERVICIOS ACEPTADAS POR EL CLIENTE. EL PRESENTE DOCUMENTO NO EXIME A LAS PARTES CONTRATANTES DE SUS OBLIGACIONES NI LIMITA EL EJERCICIO DE SUS DERECHOS.

Calle Los Negocios 420, Surquillo – Lima 34, Perú ☎ 051-652-4650
Email: asagerencia@alexstewart.com.pe www.alexstewart.com.pe

ANEXO 16

Informe de ensayo de la caracterización del agua residual tratada a nivel planta piloto

(Continuación)



Alex Stewart
(International) del Perú S.R.L.
Official ASIC Partner

INFORME DE ENSAYO N° 1053/LOM-24

Pág. 2 de 2

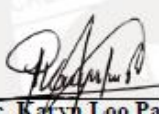
MÉTODOS:

EPA 150.1 1982 pH (Electrometric).
EPA 170.1 1974 Temperature (Thermometric).
SMEWW-APHA-AWWA WEF 2130-B 24 th. Edition 2023 Turbidity Nephelometric Method.
SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 F, 24 rd. Ed. 2023 Solids. Settleable Solids.
SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24 rd. Ed. 2023 Solids. Total Suspended Solids Dried at 103 – 105°C.
EPA Method 200.7:1994 Inductively Coupled Plasma –Atomic Emission Spectrometric Method for Trace Element Analysis of Water and Wastes.
EPA 375.4 Sulfate 1978 (Turbidimetric). Spectrophotometer
EPA 376.2 sulfide (colorimetric, methylene Blue)

OBSERVACIONES:

De acuerdo a la referencia del cliente la muestra fue tomada el día 08/08/2024, a las 4:20 pm. Lugar de Muestreo: Salida de la planta piloto del tratamiento de agua residual de lavado, ubicado en Calle Los Negocios N° 420 – Surquillo - Lima.

Lima, 19 de Agosto del 2024


Lic. Karyn Loo Paiva
Gerente de Calidad
CQP 651

J.P.Y.

Los resultados emitidos en este informe corresponden únicamente a la cantidad de muestra recibida y ensayada en el laboratorio, no deben ser utilizados como certificación de conformidad con las normas de producto o sistema de calidad.
ADVERTENCIA: La alteración parcial o total de este documento es penalizado por ley. Cualquier corrección sólo podrá ser realizada por Alex Stewart (International) del Perú S.R.L. reemplazándolo por uno nuevo.

ASA-P-T-09

Form.15.-Rev.08-Oct.22

ESTE DOCUMENTO HA SIDO EMITIDO EN BASE A LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS Y PRUEBAS EFECTUADOS EN NUESTRO LABORATORIO CON LA MAYOR HABILIDAD, CONOCIMIENTOS Y BUENA FE. LA RESPONSABILIDAD DE ALEX STEWART (INTERNATIONAL) DEL PERÚ S.R.L. AL EMITIR EL PRESENTE DOCUMENTO ESTÁ LIMITADA A LAS CONDICIONES DE PRESTACIÓN DE NUESTROS SERVICIOS ACEPTADAS POR EL CLIENTE. EL PRESENTE DOCUMENTO NO EXIME A LAS PARTES CONTRATANTES DE SUS OBLIGACIONES NI LIMITA EL EJERCICIO DE SUS DERECHOS.

Calle Los Negocios 420, Surquillo – Lima 34, Perú ☎ 051-652-4650
Email: asagerencia@alexstewart.com.pe www.alexstewart.com.pe