



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

**“Aplicación de diseño de experimentos, para incrementar la  
eficiencia operativa del Decantador de la Planta N°2 de una  
empresa potabilizadora de agua”**

**PROYECTO DE TITULACIÓN**

**Previo a la obtención del Título de:**

**MAGÍSTER EN MEJORAMIENTO DE PROCESOS**

**Presentada por:**

**Diana Carolina Bermúdez Vera**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**Año: 2021**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios. A mis Padres, que con su inagotable e incondicional apoyo, me permiten culminar un escalón más en mi formación. A mi director de proyecto, el Dr. Marcos Buestan B. A mis compañeros de trabajo y a las personas que colaboraron de alguna forma para la materialización de este proyecto.

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo, culminación del esfuerzo de muchos meses, está dedicado a mis padres y mis sobrinos.

# TRIBUNAL DE TITULACIÓN

---

**Marcos Buestan B., Ph.D.**  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

---

**María Retamales G., MSc.**  
**VOCAL**

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido de este proyecto de titulación, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

---

Diana Carolina Bermúdez Vera

## RESUMEN

El presente proyecto, consistió en la optimización de la eficiencia de un Decantador, empleado en la potabilización del agua, proveniente de una fuente superficial (Río), mediante el diseño de experimento.

El lugar de implementación del estudio, es una empresa potabilizadora de agua, que brinda el servicio básico de agua potable a sus usuarios, para ello se encarga de captar el agua cruda, dar tratamiento y distribuir el líquido vital. Durante el proceso de potabilización, se emplean unidades de tratamiento, que cumplen diversas funciones, una de las principales, clarificar el agua, eliminando la turbiedad, que se lleva a cabo en el Decantador de la Planta N°2, mismo que presentaba una disminución en la eficiencia operativa.

El objetivo del proyecto, es incrementar la eficiencia operativa del Decantador de la Planta N°2, identificando los factores de influencia en la variable respuesta y encontrando los niveles óptimos de operación, para las condiciones climáticas actuales, todo esto, a través de la implementación del diseño de experimento factorial  $2^3 (2^k)$ .

El estudio parte de la contextualización de las operaciones unitarias, llevados a cabo para la potabilización del agua, haciendo énfasis posteriormente, en los procesos físicos, químicos y mecánicos, que acontecen en el interior de la unidad de decantación objeto de interés. Con el análisis estadístico, de los datos históricos disponibles, se determinan como factores de influencia, a la velocidad de la mezcla lenta en el decantador y el uso de polímero como ayudante de coagulación.

Posterior a la experimentación, se obtiene como resultado que, las condiciones óptimas de operación del decantador, con las condiciones climáticas actuales (baja turbiedad) son, 5 rpm como velocidad de la mezcla lenta y que es necesario el uso de polímero, como coadyuvante de floculación, incrementando la eficiencia de la unidad de tratamiento, hasta un 58% y 42% en promedio.

## ÍNDICE GENERAL

1.	ANTECEDENTES .....	1-1
1.1.	Descripción proceso de potabilización .....	1-1
1.2.	Descripción funcionamiento decantador .....	2
1.3.	Datos históricos.....	3
1.4.	Oportunidad de mejora identificada.....	6
1.5.	Definición del problema.....	8
1.6.	Objetivos.....	8
1.6.1.	Objetivo General.....	8
1.6.2.	Objetivos específicos.....	8
1.7.	Descripción de la metodología.....	9
2.	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA .....	11
2.1.	Elección de factores .....	11
2.2.	Plan de verificación de causas .....	12
2.3.	Elección de niveles para los factores .....	19
2.4.	Desarrollo del experimento .....	20
2.5.	Medición de turbiedad (variable de respuesta) .....	20
3.	ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	12
3.1.	Análisis de supuestos .....	12
3.2.	Determinación de significancia estadística de factores .....	23
3.3.	Determinación ajuste del modelo a los datos.....	24
3.4.	Determinación de las condiciones óptimas de operación .....	24
3.5.	Corrida verificatoria .....	25
3.6.	Análisis de capacidad del proceso, previo a la aplicación de mejora.....	27
3.7.	Análisis de capacidad posterior a la aplicación de la mejora.....	30
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	12
4.1.	Conclusiones .....	12
4.2.	Recomendaciones .....	12
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	1
6.	ANEXOS .....	2

## ABREVIATURAS

PAC	Policloruro de aluminio
PPM	Partes por millón
rpm	Revoluciones por minuto
rph	Revoluciones por hora



## SIMBOLOGÍA

∅	Diámetro
NTU	Unidades Nefelométricas de Turbiedad

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de flujo potabilización del agua.....	1-1
Figura 1.2 Decantador mecánico. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.....	2
Figura 1.3 Normalidad % Remoción Decantador N°2.....	5
Figura 1.4 Normalidad % Remoción Decantador N°1.....	5
Figura 1.5 Prueba de hipótesis.....	6
Figura 1.6 Serie de tiempo eficiencia Decantador N°2.....	7
Figura 1.7 Hoja de ruta Diseño de experimentos para Decantador N°2.....	10
Figura 2.1 Diagrama Causa efecto.....	11
Figura 2.2 Diagrama de cajas test de jarras.....	14
Figura 2.3 Prueba de normalidad test de jarras, concentración de solución 8 a 12 ppm.....	14
Figura 2.4 Prueba de normalidad test de jarras, concentración solución 3 a 6ppm.....	15
Figura 2.5 Prueba de hipótesis test de jarras.....	15
Figura 2.6 Prueba de normalidad NTU Agua Cruda.....	17
Figura 2.7 Gráfica I-MR de los NTU del Agua Cruda.....	17
Figura 2.8 Estadísticos descriptivos turbiedades agua cruda junio-julio 2021.....	18
Figura 2.9 Turbiedad máxima y promedio mensual durante el periodo marzo-junio 2021.....	18
Figura 3.1 Gráfica de residuos del error para el porcentaje de remoción de turbiedad	12
Figura 3.2 Gráfica de probabilidad para Residuos.....	22
Figura 3.3 Gráfica de corridas para el Residuo.....	23
Figura 3.4 Gráfica de variables múltiples.....	25
Figura 3.5 Identificación de la distribución para %Remoción antes de la mejora.....	28
Figura 3.6 Gráfica de valores individuales para %Remoción antes de la mejora.....	28
Figura 3.7 Análisis de capacidad %Remoción antes de la mejora.....	29
Figura 3.8 Gráfica de probabilidad %Remoción posterior a la mejora.....	30
Figura 3.9 Gráfica de valores individuales para %Remoción posterior a la mejora.....	30
Figura 3.10 Análisis de capacidad %Remoción posterior a la mejora.....	31
Figura 3.11 Serie de tiempo Eficiencia Decantador N°2.....	32

## ÍNDICE DE TABLAS

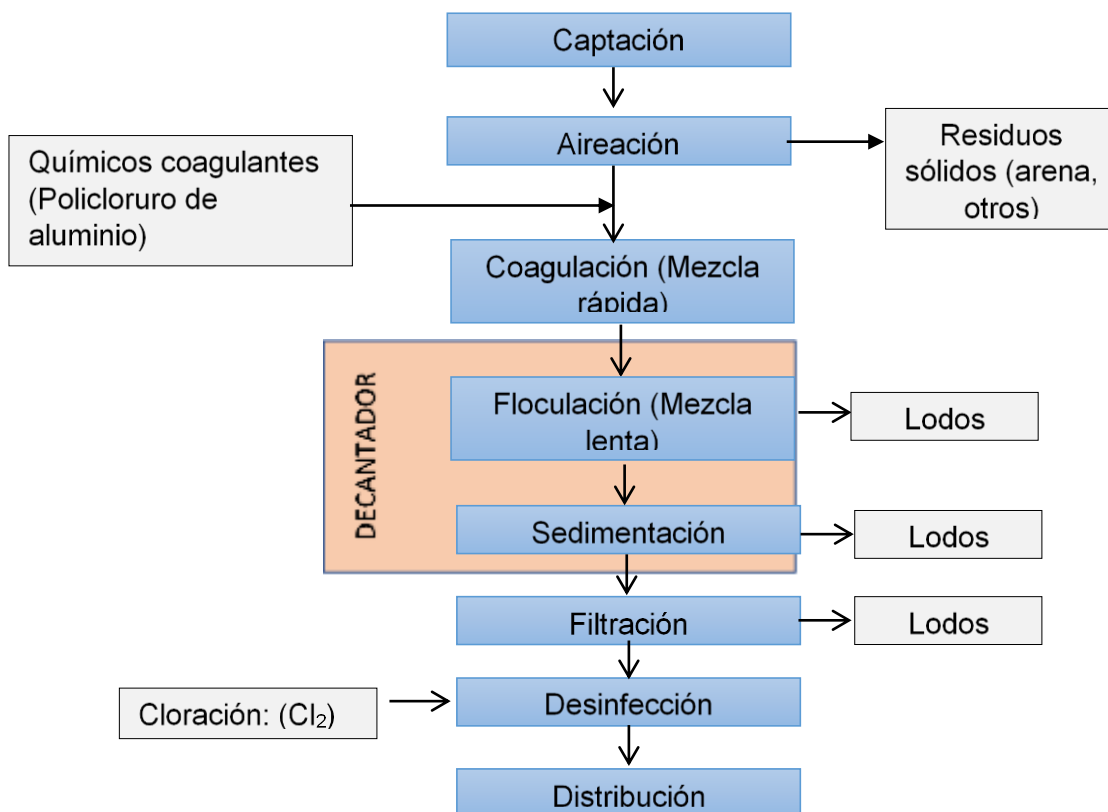
Tabla 1.1 Datos históricos Decantador N°1 .....	4
Tabla 1.2 Datos históricos Decantador N°2.....	4
Tabla 2.1 Plan de verificación de causas .....	12
Tabla 2.2 Resultados test de jarras lotes de Policloruro de Aluminio .....	13
Tabla 2.3 Registro de turbiedades agua cruda junio-julio 2021 .....	16
Tabla 2.4 Niveles para los factores.....	19
Tabla 2.5 Diseño factorial 2 <sup>3</sup> .....	20
Tabla 3.1 Hipótesis de la gráfica de corridas para residuo .....	22
Tabla 3.2 Significancia de factores.....	23
Tabla 3.3 Ajuste del modelo.....	24
Tabla 3.4 Resultados corrida verifcatoria.....	25

# CAPÍTULO 1

## 1. ANTECEDENTES

### 1.1. Descripción proceso de potabilización

El lugar de implementación del presente proyecto, es una empresa dedicada a la potabilización del agua. Esta cuenta con dos plantas, denominadas Planta N°1 y Planta N°2; el sistema de tratamiento de agua es el mismo para ambas, que básicamente consiste en: captación del agua cruda, aireación, coagulación (mezcla rápida), floculación (mezcla lenta), sedimentación, filtración, y desinfección (Fig. 1.1).



**Figura 1.1 Diagrama de flujo potabilización del agua**

Fuente: Elaboración Propia

El agua cruda que es captada desde la fuente (Río), ingresa al **Aireador**, que es la primera unidad de tratamiento a manera de torre, donde se lleva a cabo el proceso de aireación, mediante el cual el agua se distribuye uniformemente, para aumentar el área de contacto, eliminando la presencia de gases, olores y generando precipitación de hierro. El agua pasa a través de pequeños orificios, en la parte inferior de cada bandeja, dando paso a la decantación.

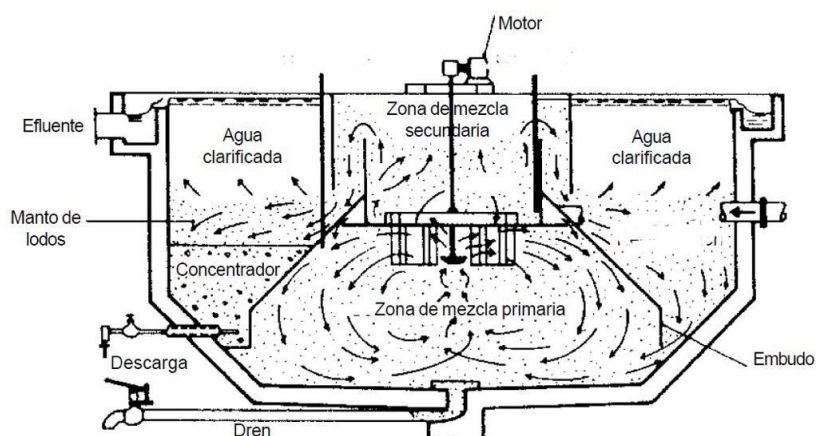
Finalizada la aireación y antes de ingresar el agua a la siguiente etapa, se realiza la dosificación del químico coagulante con efecto de mezcla rápida, proceso que es conocido como **coagulación**, el cual consiste básicamente, en la desestabilización de las partículas (sólidos sedimentables), mediante la adición de un químico coagulante (PAC: Policloruro de aluminio) para permitir la cohesión de las mismas. La inyección del químico se realiza en la caja del agua de salida del aireador hacia el decantador, donde se aprovecha la turbulencia generada por el transporte del líquido para proporcionar la mezcla rápida.

Para remover los sólidos suspendidos, el agua debe ser sometida a varios procesos continuos que involucran mecanismos químicos y físicos. Los procesos más importantes dentro de la potabilización, se llevan a cabo en los Decantadores, donde tiene lugar la agitación lenta (**floculación**), que produce la agregación de los flóculos, formando partículas de mayor peso y tamaño, que **sedimentan**, cumpliendo con el principal objetivo del tratamiento, clarificar el agua.

Posterior al proceso de clarificación o decantación se lleva a cabo la **filtración** del agua para eliminar todas aquellas partículas que no pudieron ser removidas en la decantación. Para la filtración del agua se emplean filtros de arena con lechos de grava. Finalmente, el agua completamente transparente, debe ser sometida al proceso de **desinfección**, a fin de eliminar los microorganismos patógenos causantes de enfermedades, principalmente de tipo intestinal. La desinfección se realiza adicionando cloro gas al agua en el almacenamiento dentro de Planta antes de distribuirla.

## 1.2. Descripción funcionamiento decantador

Considerando que el presente proyecto, se centra en determinar las condiciones óptimas de operación, que permitan un incremento en la eficiencia, de una de las unidades de Decantación de la planta, se describe a continuación generalidades sobre los componentes y funcionamiento del decantador.



**Figura 1.2 Decantador mecánico. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente**

*(Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2004)*

El agua ingresa al decantador en la parte inferior de la campana o embudo de mezcla lenta por debajo de las aspas, a través de una línea de 500mm  $\varnothing$  de hierro fundido, el mismo que se encuentra a 1,5 m del suelo.

En el decantador de tipo mecánico, se cuenta con un denominado floculador de contacto de sólidos o de manto de lodos, que emplea un motor eléctrico acoplado a un variador de velocidades, que hace posible la modificación de la intensidad del movimiento (generalmente 30 rpm) de las paletas perpendiculares al eje, que agitan la masa de agua que ingresa a la unidad y que mantiene las partículas en suspensión y recolecta los lodos en el concentrador, de donde son removidos periódicamente de forma manual (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2004).

El sistema de purgas es operado mediante válvulas manuales y consiste en tres líneas de 100 mm  $\varnothing$  para el desagüe de los lodos del concentrador (centro del decantador) y de los dos recolectores internos (laterales). En estas unidades no existe recirculación de lodos, la barredora de lodos, gira a razón de 5 rph.

El agua emerge de la zona de mezcla primaria (campana de mezcla lenta), hacia el área de sedimentación en el decantador, donde por tiempo de retención y gravedad las partículas precipitan. El agua clarificada es recolectada mediante canaletas, hacia el vertedero, que comunica con la siguiente etapa del tratamiento.

De acuerdo al Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2004), la eficiencia de los decantadores de manto de lodos, depende de muchos factores internos, como el tipo y la dosis de coagulante, del uso de polímeros, de la calidad del agua cruda, de la profundidad y concentración del manto de lodos, de la carga superficial (caudales) y demás condiciones hidráulicas y de diseño. Además de factores externos, que tienen inclusive mayor influencia sobre la eficiencia, tales como prácticas operacionales y factores ambientales.

### **1.3. Datos históricos**

El monitoreo de la turbiedad, que es medida en Unidades Nefelométricas de Turbiedad (NTU) y que constituye un parámetro de vigilancia operativa, evidencian una diferencia, en los niveles del agua clarificada de las dos unidades de Decantación. Se observa en el Decantador N°2 (Planta 2), una eficiencia promedio (remoción de turbiedad) del 41% comparado con el Decantador N°1 (Planta 1), cuyo promedio de remoción es 70%.

El contraste en las eficiencias de las unidades de tratamiento mencionadas, es notorio, cuando se observan niveles medios en la turbiedad del agua cruda (5 a 60 NTU), datos que son presentados en la tabla 1 y 2, que corresponden a los datos históricos de enero-agosto 2020. Se asegura la representatividad de las muestras, tomadas en igualdad de condiciones referentes a la dosificación óptima del químico, niveles de turbiedad del afluente (agua cruda) y la carga superficial (caudales de diseño) de cada decantador.

Tabla 1.1 Datos históricos Decantador N°1

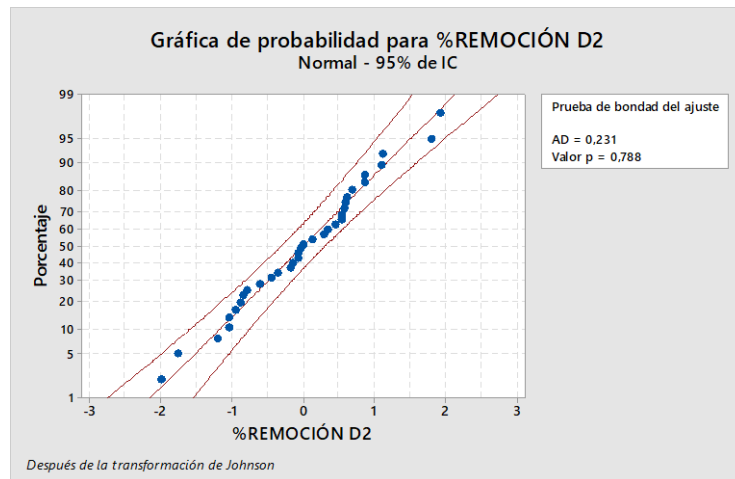
N°	Turbiedad (NTU)			N°	Turbiedad (NTU)		
	Agua cruda	Agua clarificada	% Remoción		Agua cruda	Agua clarificada	% Remoción
1	6,3	3,12	0,501	18	28,1	7,17	0,745
2	7,2	4,50	0,378	19	35,3	11,00	0,688
3	6,5	3,60	0,446	20	23,2	4,70	0,797
4	7,4	4,10	0,446	21	19,8	5,30	0,732
5	15,0	2,50	0,833	22	18,4	5,10	0,723
6	11,5	7,50	0,348	23	71,6	6,10	0,915
7	26,8	8,29	0,691	24	19,2	5,40	0,719
8	15,0	2,30	0,847	25	18,8	6,10	0,676
9	58,6	9,70	0,834	26	16,3	6,20	0,620
10	12,2	8,23	0,325	27	14,1	4,80	0,660
11	60,2	3,22	0,947	28	18,8	5,30	0,718
12	58,3	5,47	0,906	29	14,3	5,60	0,608
13	29,9	3,88	0,870	30	15,7	5,10	0,675
14	34,1	4,10	0,880	31	14,2	5,30	0,627
15	41,0	5,10	0,876	32	15,6	3,10	0,801
16	39,4	7,20	0,817	33	13,5	2,50	0,815
17	34,2	8,12	0,763	34	12,9	5,10	0,605

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 1.2 Datos históricos Decantador N°2

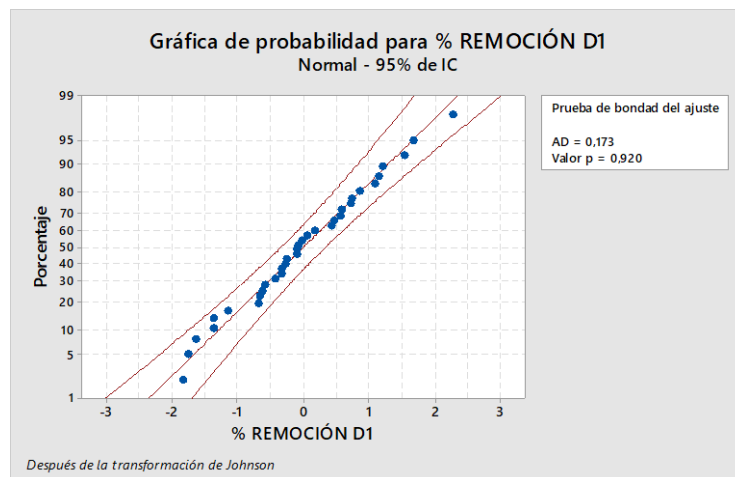
N°	Turbiedad (NTU)			N°	Turbiedad (NTU)		
	Agua cruda	Agua clarificada	% Remoción		Agua cruda	Agua clarificada	% Remoción
1	6,3	4,9	0,214	18	28,1	12,3	0,562
2	7,2	5,1	0,295	19	35,3	16,7	0,527
3	6,5	4,1	0,369	20	23,2	9,7	0,582
4	7,4	6,1	0,176	21	19,8	14,9	0,247
5	15,0	6,8	0,549	22	18,4	14,7	0,201
6	11,5	5,0	0,566	23	71,6	23,0	0,679
7	26,8	16,8	0,373	24	19,2	15,5	0,193
8	15,0	6,8	0,549	25	18,8	14,9	0,207
9	58,6	22,6	0,614	26	16,3	13,4	0,178
10	12,2	9,8	0,201	27	14,1	9,2	0,348
11	60,2	19,2	0,681	28	18,8	12,4	0,340
12	58,3	20,7	0,645	29	14,3	11,2	0,217
13	29,9	15,5	0,482	30	15,7	9,7	0,382
14	34,1	17,1	0,499	31	14,2	10,3	0,275
15	41,0	15,8	0,615	32	15,6	9,5	0,391
16	39,4	17,4	0,558	33	13,5	7,7	0,430
17	34,2	12,2	0,643	34	12,9	10,0	0,223

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 1.3 Normalidad % Remoción Decantador N°2**

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 1.4 Normalidad % Remoción Decantador N°1**

Fuente: Elaboración Propia

Dado que el porcentaje de remoción del decantador N°2 y N°1, presentan un comportamiento normal, posterior a la transformación de Johnson con valores P de 0.788 (figura 1.3) y 0.920 (figura 1.4), respectivamente, se confirma la diferencia entre las eficiencias del Decantador N°1 y N°2, planteando la siguiente hipótesis.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Donde  $\mu_1$  es la eficiencia en el decantador N°1 y  $\mu_2$  es la eficiencia del decantador N°2. Considerando que el agua cruda o afluyente, posee iguales características al ingresar a las unidades en estudio (muestras dependientes), se plantea la hipótesis pareada:

$$H_0: \mu_d = 0$$



$$H_1: \mu_d \neq 0$$

Donde  $\mu_d$  es la media de la diferencia de las eficiencias medidas en ambos decantadores. Con el valor  $p=0.000$ , se rechaza  $H_0$  a favor de  $H_1$ , existe diferencia significativa en las eficiencias de ambas unidades de tratamiento.

## IC y Prueba T pareada: % REMOCIÓN D1; %REMOCIÓN D2

### Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
% REMOCIÓN D1	34	0,7009	0,1672	0,0287
%REMOCIÓN D2	34	0,4121	0,1714	0,0294

### Estimación de la diferencia pareada

Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para la diferencia_μ
0,2888	0,1481	0,0254	(0,2371; 0,3404)

*diferencia\_μ: media de (% REMOCIÓN D1 - %REMOCIÓN D2)*

### Prueba

Hipótesis nula  $H_0$ : diferencia\_μ = 0  
 Hipótesis alterna  $H_1$ : diferencia\_μ ≠ 0

Valor T	Valor p
11,37	0,000

## Figura 1.5 Prueba de hipótesis

Fuente: Elaboración Propia

## 1.4. Oportunidad de mejora identificada

La disminución en la eficiencia de la remoción de turbiedad en el Decantador N°2, afecta la productividad de la planta N°2, generando además complicaciones como:

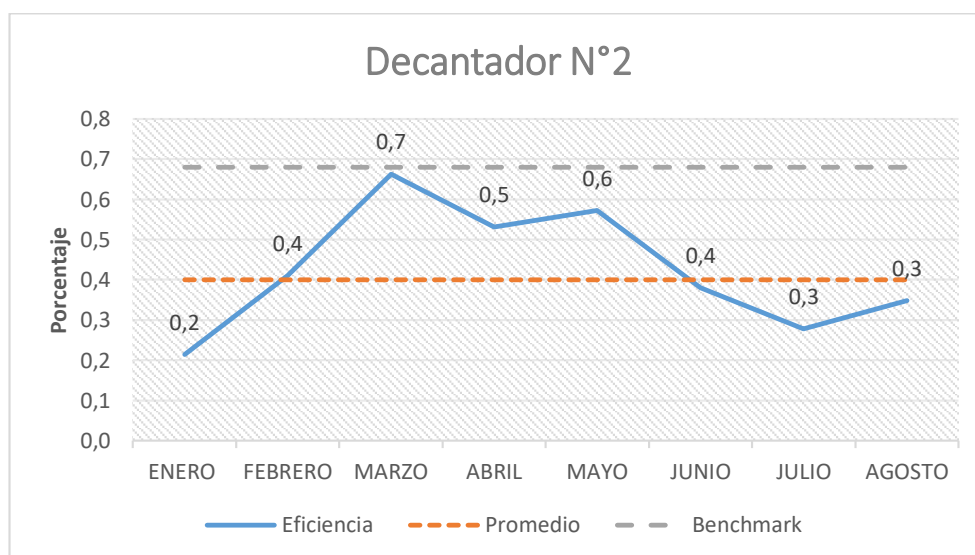
- Incremento de retro lavados de filtros. Cuando disminuye la eficiencia de la etapa de decantación, previo al ingreso de los filtros, se produce un incremento en la cantidad de retro lavados de las unidades de filtración de la planta N°2, que debe ser realizada cada 12 horas, a diferencia de los filtros de la planta N°1, cada 24 horas, además de un aumento en casi el doble del tiempo que toma lavarlos (normalmente 1 hora).
- Reducción del nivel de servicio. El mecanismo actual de retro lavado, conlleva a que, durante el tiempo que dura este proceso, se paralice uno de los equipos de bombeo, que impulsa el agua tratada hacia uno de los Cantones servidos, lo que evidencia una considerable afectación al nivel del servicio percibida por el usuario final.

- Incremento en costos operativos. El valor óptimo del gradiente de velocidad, en el mecanismo de floculación de un decantador, disminuye al aumentar la dosis de químico coagulante (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2004). Si en aras de mitigar los efectos mencionados anteriormente, mediante una sobre dosificación de químicos coagulantes, significaría un incrementando en el consumo de policloruro de aluminio, y por tanto de los costos operativos.
- Incumplimientos de normas. La ineficiencia del decantador y por ende la saturación de los filtros puede ocasionar, en un futuro cercano, el colapso de las unidades, pudiendo afectar directamente a la calidad del líquido vital producido e inclusive llevar al incumplimiento de la Norma NTE INEN 1108, requisitos para agua para Consumo Humano, sexta revisión 2020-04 y del Reglamento para el control y vigilancia de la calidad del agua potable, emitido por la Secretaria del Agua y el Ministerio de Salud Pública. Es de suma importancia, asegurar la calidad del líquido vital, ya que de ella depende, por un lado, la imagen de los Municipios como prestadores del servicio y por otro, el más importante, la salud y bienestar de los usuarios.

Producto del análisis de la serie de tiempo presentada en la figura 3, se presentan las siguientes consideraciones:

- GAP o diferencia entre las eficiencias de los decantadores: 28,9%
- % reducción que se desea reducir del GAP: 60%
- Objetivo: 58,44%
- % Reducción: 41%

Considerando que la diferencia entre el promedio de eficiencia del Decantador N°2 y la referencia o benchmark interno, que constituye la eficiencia del Decantador N°1, es de 28.9% y proponiendo la reducción de esa diferencia en un 41%, se plantea que, la eficiencia del Decantador N°2 podría alcanzar el 58,44%.



**Figura 1.6 Serie de tiempo eficiencia Decantador N°2**

Fuente: Elaboración Propia

Determinando las condiciones óptimas de operación, de los factores que influyen en la eficiencia del decantador N°2, a través de la implementación de diseño de experimentos, se puede plantear el incremento de la eficiencia operativa del Decantador de la Planta N°2, un 41%, de 41,1% (promedio enero 2020 a agosto 2020) a 58%, desde Julio 2021.

## **1.5. Definición del problema**

¿**Qué?**: Disminución de la eficiencia operativa.

¿**Dónde?**: Del decantador de la planta N°2.

¿**Cuándo?**: Durante el proceso de floculación, cuando se observan niveles medios de turbiedad

¿**Qué tanto?**: El porcentaje de eficiencia es en promedio 41%.

¿**Cómo lo sé?**: Los rendimientos promedios del Decantador 1, para ese rango de turbiedades es de 70%.

Disminución de la eficiencia operativa del decantador de la Planta N°2, durante el proceso de floculación, cuando se observan niveles medios de turbiedad. El porcentaje de eficiencia es en promedio 41%; los rendimientos promedios del Decantador 1, para ese rango de turbiedades es de 70%.

## **1.6. Objetivos**

### **1.6.1. Objetivo General**

Incrementar la eficiencia operativa del Decantador de la Planta N°2, con la aplicación de diseño de experimentos.

### **1.6.2. Objetivos específicos**

- Determinar los factores que tienen influencia sobre la Eficiencia del Decantador.
- Determinar los niveles adecuados de operación que incrementen la eficiencia del decantador de acuerdo a los factores identificados a través del Diseño de Experimentos.
- Evaluar los resultados obtenidos en prueba piloto

## 1.7. Descripción de la metodología

Montgomery (2004) define un diseño de experimentos como “Las pruebas en las que intencionalmente se cambian las variables de entrada de un proceso, para poder identificar cambios en las respuestas de salida” (pág. 572). “La metodología del diseño experimental, introducida en las etapas iniciales en las que se diseñan nuevos productos, cuando se mejoran diseños de productos existentes y cuando se optimizan los procesos de manufactura, suele ser la clave del éxito global del producto” (pág. 569).

En la industria, es común realizar experimentos o pruebas con la intención de resolver un problema o comprobar una hipótesis, con base en el ensayo y error, siendo el análisis de datos muy intuitivo; aunque en ocasiones se logran mejoras, existen situaciones complejas, en las que este tipo de experimentación no es suficiente y resulta mucho más eficaz, la aplicación del diseño estadístico de experimentos, que determina cuáles pruebas se deben realizar y de qué manera, garantizando una buena respuesta a las interrogantes planteadas, en un lapso corto de tiempo y utilizando pocos recursos (Gutiérrez Pulido & De La Vara, 2008); es por ello que, en el caso de la presente propuesta, se busca incrementar la eficiencia del proceso de floculación, aplicando esta metodología para la experimentación dentro del Decantador de alta rata N°2.

Existen investigaciones en el campo del tratamiento del agua, especialmente vinculantes con el diseño de experimentos, tales como:

- El estudio del impacto de ciertos compuestos sobre la remoción de la materia orgánica disuelta por coagulación-floculación en condiciones óptimas, donde “Los experimentos se realizaron en un equipo de prueba de jarras, utilizando un diseño factorial fraccionado para determinar los factores de influencia significativa, y uno de superficie de respuesta para estimar las condiciones óptimas de operación de los procesos evaluados” (Sandoval-Reyes & Ramírez, 2019) (pág.889).
- La evaluación de las variables necesarias para un proceso de electrocoagulación en el tratamiento de aguas crudas, mediante el establecimiento de una celda electrolítica, con diferentes configuraciones y evaluando los porcentajes de remoción, para así determinar la eficiencia del proceso, aplicando un diseño 2k con una sola réplica y un análisis multivariado de varianza usando un software estadístico (Perozo Cuicas & Abreu Cuadra, 2017) (Perozo Cuicas & Abreu Cuadra, 2017).

Como es posible percibir, el diseño de experimentos, es una metodología adecuada para ser aplicada dentro del proceso de floculación.

Para la resolución de la problemática de la unidad de decantación de la planta potabilizadora de agua, se realizará el diseño del experimento, cuyo procedimiento puede dividirse en cinco etapas macro (Montgomery, 2004):

1. Planeación pre experimental (identificación del problema, elección de factores y niveles y la selección de variable de respuesta)
2. Elección del diseño experimental
3. Realización del experimento
4. Análisis de datos
5. Finalmente conclusiones y recomendaciones.

La planeación pre experimental, establece las bases de un experimento exitoso y comprende varios pasos, como la identificación y enunciación del problema, planteado en los literales 1.1.3 y 1.1.4 del presente, a partir de los datos históricos y la oportunidad de mejora identificada en el decantador N°2.

Dentro de la etapa de planeación, se incluye la elección de los factores y niveles, para lo cual se realizará análisis de datos disponibles y reuniones con el personal operativo involucrado en el proceso de tratamiento, considerando a priori, como factores de influencia a: la velocidad del motor de la mezcla lenta (rpm), niveles de lodos en el concentrador y tiempo entre las purgas de lodos realizadas manualmente.

Dados los históricos presentados, se considerará como variable de respuesta la eficiencia del Decantador, expresada a manera de porcentaje de remoción de turbiedad (turbiedad agua cruda – turbiedad agua clarificada/ turbiedad agua cruda), con base en la cual se medirán los resultados del experimento.

Las demás etapas consideradas dentro del diseño del experimento y los periodos para su implementación se detallan en la figura 1.7.

N°	ACTIVIDADES	INICIO	FINAL	JUNIO		JULIO					AGOSTO				SEPTIEMBRE			
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
1	Reuniones para socializar el proyecto con los involucrados	28-jun-21	30-jun-21	■														
2	Determinación de factores y selección de diseño	1-jul-21	11-jul-21		■	■												
3	Realizar gamba y reuniones para escoger niveles de factores	12-jul-21	18-jul-21				■											
4	Selección de diseño experimental y aleatorización de corridas	19-jul-21	25-jul-21					■										
5	Ejecución del experimento y recolección de datos	26-jul-21	15-ago-21						■	■	■							
6	Analizar datos y sacar conclusiones	9-ago-21	15-ago-21							■								
7	Corrida confirmatoria para validación de resultados	16-ago-21	22-ago-21									■						
8	Entrenamiento para la aplicación de condiciones adecuadas de operación	16-ago-21	29-ago-21									■	■					
9	Seguimiento al proceso con las condiciones adecuadas de operación	30-ago-21	19-sep-21											■	■	■		

**Figura 1.7 Hoja de ruta Diseño de experimentos para Decantador N°2**

Fuente: Elaboración Propia

# CAPÍTULO 2

## 2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

La metodología implementada para la ejecución del presente proyecto, parte del análisis de los procesos llevados a cabo dentro de la unidad de decantación objeto de estudio, junto con la revisión bibliográfica y el análisis de los datos disponibles, se procede a realizar un diseño factorial  $2^3$ , considerando la velocidad de la mezcla lenta, el tiempo entre purgas y el uso de polímero, como factores de influencia para incrementar la eficiencia del Decantador N°2, midiendo el porcentaje de la turbiedad removida en la unidad, usando para ello, equipo del laboratorio de la empresa potabilizadora de agua.

### 2.1. Elección de factores

Producto de la lluvia de ideas de técnicos y personal operativo, inmerso en la operación de los decantadores, se plantean a priori como potenciales causas de la disminución en la eficiencia del Decantador N°2, las descritas en la figura 2.1 sobre el diagrama de causa efecto y se establecen los niveles para los factores elegidos (Tabla 2.1.2)

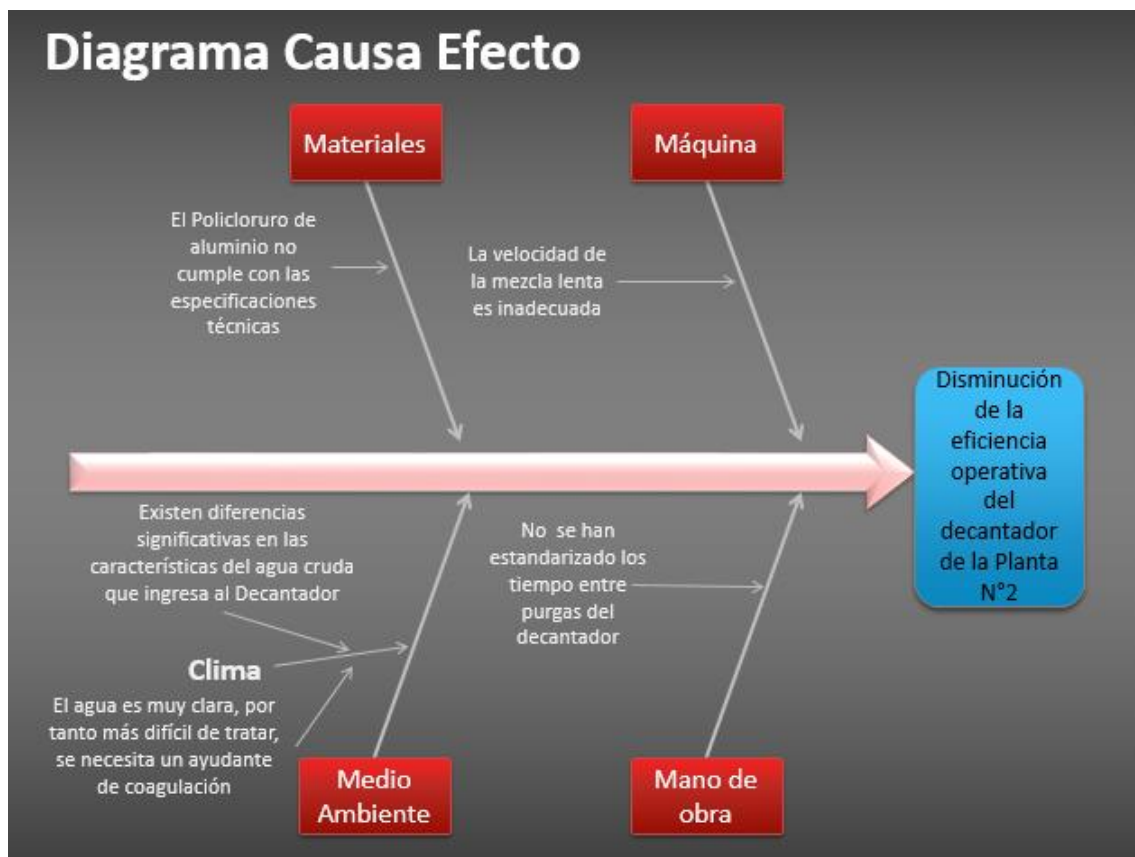


Figura 2.1 Diagrama Causa efecto

Fuente: Elaboración Propia

## 2.2. Plan de verificación de causas

En la tabla 2.2.1, se detalla en resumen, la justificación del análisis de las causas potenciales, para ineficiencia del Decantador N°2.

**Tabla 2.1 Plan de verificación de causas**

Causa potencial	Teoría sobre el efecto	¿Cómo se verificará?	Estado	Resultado
				Justificación
<b>El Policloruro de aluminio no cumple con las especificaciones técnicas</b>	Los distintos lotes de Policloruro de aluminio, entregados por el proveedor, varían su composición y características, afectando la eficiencia del tratamiento en el decantador N°2	Comparación de los resultados de test de jarras de los lotes recibidos mediante Diagrama de cajas y Prueba de hipótesis	Completado	No es causa. Valor $P=0,64$ . No se rechaza $H_0$ . No existe diferencia significativa en la eficiencia de los diferentes lotes de Policloruro de aluminio. Eficiencia promedio de 81%
<b>Existen diferencias en las características del agua cruda que ingresa al Decantador</b>	Si las diferencias, en las turbiedades del agua cruda, son significativas, durante el periodo de estudio, influyen en la eficiencia del decantador N°2	Análisis de los niveles de turbiedad registrados para el periodo de estudio, mediante gráfica I-MR.	Completado	No es causa. La turbiedad en el agua cruda, es estable en el tiempo, no se observa ningún punto fuera de control
<b>El agua es muy clara, por tanto más difícil de tratar, es necesario un ayudante de coagulación</b>	El tratamiento se complica, considerando la influencia del coeficiente de aglomeración, que es mucho menor en las aguas claras que en las de turbiedad elevadas	Estadísticos descriptivos de los niveles de turbiedad registrados marzo, junio y julio 2021	Completado	Sí es causa. En los meses de junio-julio, la turbiedad mínima de 5.95 NTU, máximo 8.2 NTU y en promedio 6.88 NTU. En el periodo marzo y julio, se aprecia la diferencia significativa en las turbiedades en las dos estaciones climáticas

Causa potencial	Teoría sobre el efecto	¿Cómo se verificará?	Estado	Resultado
				Justificación
<b>La velocidad de la mezcla lenta es inadecuada</b>	La velocidad de las paletas que generan la mezcla lenta, evitan la adecuada formación de los flóculos	Comparar los resultados del diseño de experimento, a diferentes niveles de velocidad de mezcla lenta.	En proceso	
<b>No se han estandarizado los tiempos entre purgas del decantador</b>	El tiempo entre purgas muy amplio o muy corto, tendrá impacto en la eficiencia del decantador	Comparar los resultados del diseño de experimento, a diferentes tiempos entre purgas	En proceso	

Fuente: Elaboración Propia

- **Policloruro no cumple con las especificaciones técnicas:**

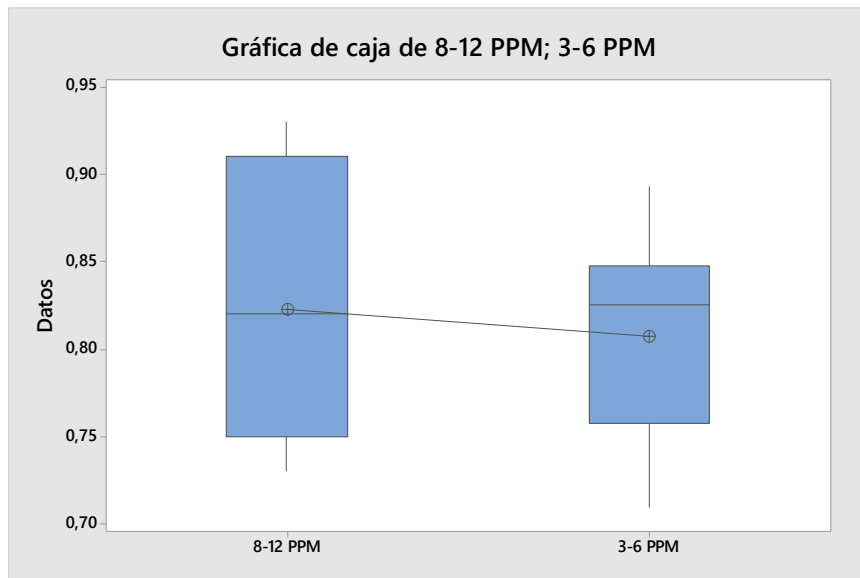
Ante el supuesto de que, los distintos lotes de Policloruro de aluminio, entregados por el proveedor, varían su composición y características, afectando la eficiencia del tratamiento en el decantador N°2, se realiza la comparación de los resultados de test de jarras de los lotes recibidos (tabla 2.1.1) mediante diagrama de cajas y prueba de hipótesis.

**Tabla 2.2 Resultados test de jarras lotes de Policloruro de Aluminio**

LOTE	RESULTADOS TEST DE JARRAS	
	8-12 PPM	3-6 PPM
<b>1</b>	82%	85%
<b>2</b>	93%	71%
<b>3</b>	85%	80%
<b>4</b>	75%	89%
<b>5</b>	75%	84%
<b>6</b>	73%	73%
<b>7</b>	82%	83%
<b>8</b>	93%	85%
<b>9</b>		75%
<b>10</b>		83%
<b>11</b>		82%
<b>12</b>		78%

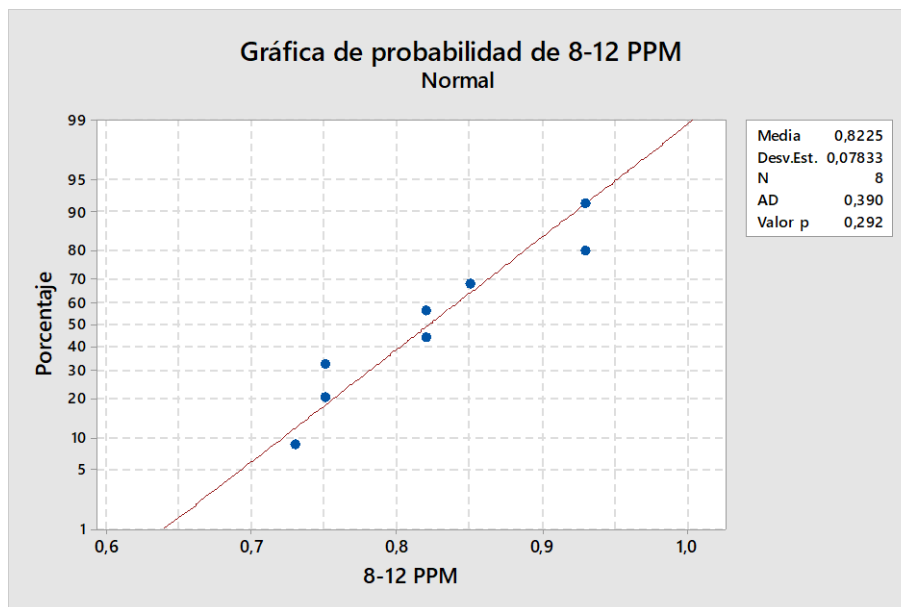
Fuente: Elaboración Propia





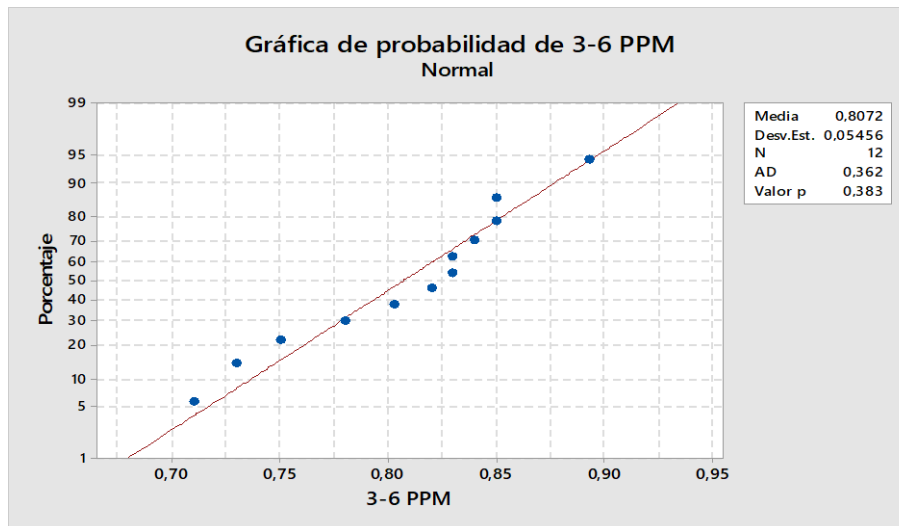
**Figura 2.2 Diagrama de cajas test de jarras**

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 2.3 Prueba de normalidad test de jarras, concentración de solución 8 a 12 ppm**

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 2.4 Prueba de normalidad test de jarros, concentración solución 3 a 6ppm**

Fuente: Elaboración Propia

Confirmada la normalidad de los datos del test de jarros (Valor P 0,292 y 0,383), se procede a realizar la prueba de hipótesis (figura 2.1.3).

### Prueba T e IC de dos muestras: 8-12 PPM; 3-6 PPM Método

$\mu_1$ : media de 8-12 PPM

$\mu_2$ : media de 3-6 PPM

Diferencia:  $\mu_1 - \mu_2$

*No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.*

### Estimación de la diferencia

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
0,0153	(-0,0548; 0,0855)

### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
0,48	11	0,640

**Figura 2.5 Prueba de hipótesis test de jarros**

Fuente: Elaboración Propia

Dado que la hipótesis planteada es:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

Donde  $\mu_1$  es el porcentaje de remoción de turbiedad logrado, por los diversos lotes de Policloruro de aluminio, en las pruebas de jarras, realizadas en el laboratorio de la empresa, con soluciones concentradas de 8 a 12 ppm (partes por millón); siendo  $\mu_2$ , los resultados del test, con concentraciones de soluciones de 3 a 6 ppm.

Con el valor  $p=0.640$ , no se rechaza  $H_0$ , es decir no existe diferencia significativa en las eficiencias de los diversos lotes del químico coagulante, por lo que no se considera un factor de influencia, en el proceso de clarificación del agua en el decantador N°2.

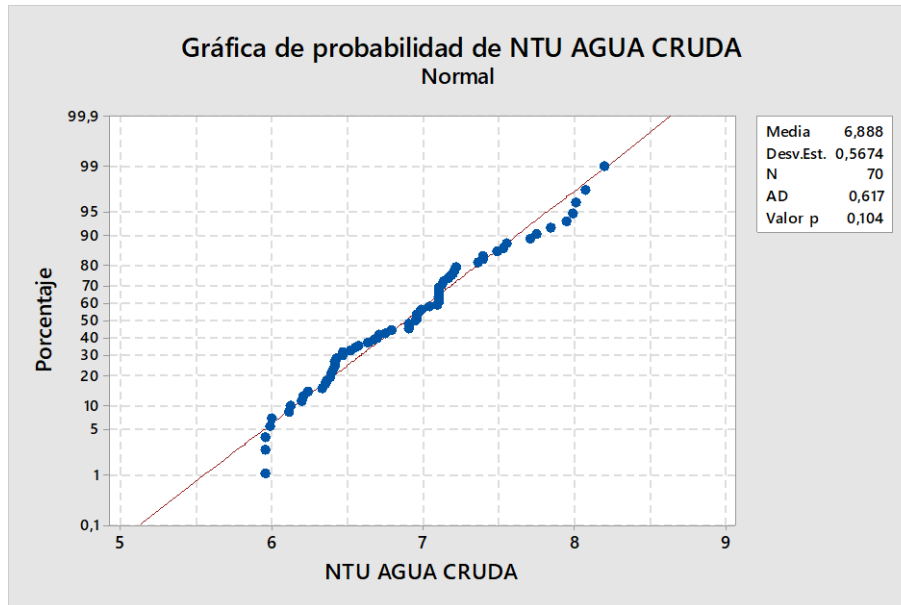
- **Existen diferencias significativas en las características del agua que ingresa al decantador:**

Grandes variaciones en la turbiedad del agua que ingresa al decantador, durante el periodo de tiempo del estudio, serían un factor de influencia para la eficiencia del decantador N°2.

**Tabla 2.3 Registro de turbiedades agua cruda junio-julio 2021**

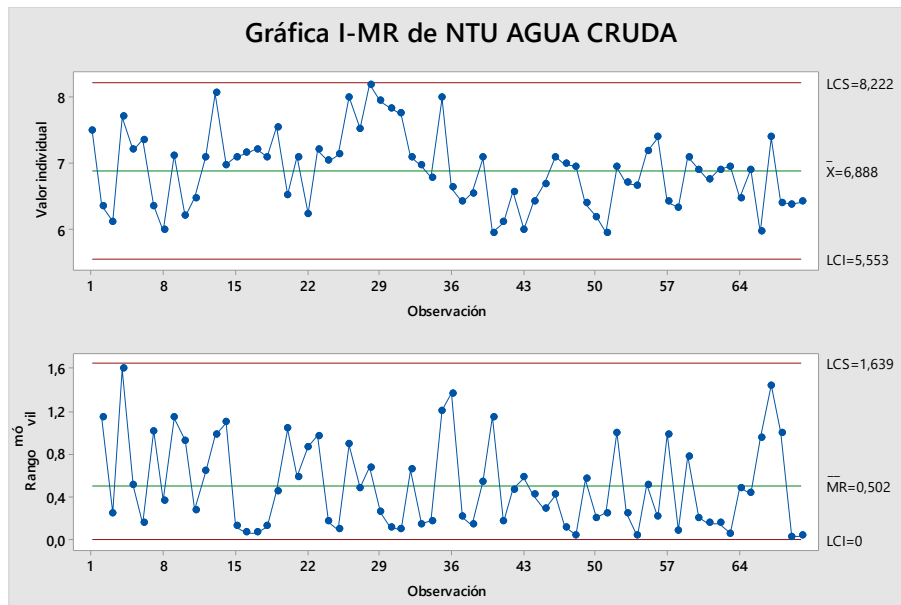
#Muestra	Fecha	NTU Agua Cruda	#Muestra	Fecha	NTU Agua Cruda	#Muestra	Fecha	NTU Agua Cruda
1	7-jun-21	7,49	25	17-jun-21	7,13	48	1-jul-21	6,95
2	7-jun-21	6,36	26	18-jun-21	8,01	49	1-jul-21	6,39
3	7-jun-21	6,12	27	18-jun-21	7,53	50	1-jul-21	6,19
4	8-jun-21	7,71	28	18-jun-21	8,2	51	2-jul-21	5,95
5	8-jun-21	7,21	29	18-jun-21	7,95	52	2-jul-21	6,94
6	8-jun-21	7,36	30	21-jun-21	7,84	53	2-jul-21	6,7
7	9-jun-21	6,35	31	21-jun-21	7,75	54	5-jul-21	6,67
8	9-jun-21	5,99	32	21-jun-21	7,1	55	5-jul-21	7,18
9	9-jun-21	7,12	33	22-jun-21	6,96	56	5-jul-21	7,39
10	10-jun-21	6,2	34	22-jun-21	6,79	57	6-jul-21	6,41
11	10-jun-21	6,47	35	22-jun-21	7,99	58	6-jul-21	6,33
12	10-jun-21	7,1	36	23-jun-21	6,63	59	6-jul-21	7,1
13	11-jun-21	8,07	37	23-jun-21	6,42	60	7-jul-21	6,9
14	11-jun-21	6,98	38	23-jun-21	6,55	61	7-jul-21	6,75
15	11-jun-21	7,1	39	24-jun-21	7,09	62	7-jul-21	6,9
16	14-jun-21	7,16	40	24-jun-21	5,95	63	7-jul-21	6,95
17	15-jun-21	7,22	41	24-jun-21	6,11	64	8-jul-21	6,47
18	15-jun-21	7,1	42	28-jun-21	6,57	65	8-jul-21	6,9
19	15-jun-21	7,55	43	28-jun-21	6	66	8-jul-21	5,96
20	16-jun-21	6,52	44	28-jun-21	6,41	67	9-jul-21	7,39
21	16-jun-21	7,1	45	30-jun-21	6,69	68	9-jul-21	6,4
22	16-jun-21	6,24	46	30-jun-21	7,1	69	9-jul-21	6,38
23	17-jun-21	7,2	47	30-jun-21	6,99	70	9-jul-21	6,41
24	17-jun-21	7,04						

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 2.6 Prueba de normalidad NTU Agua Cruda**

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 2.7 Gráfica I-MR de los NTU del Agua Cruda**

Fuente: Elaboración Propia

Confirmada la normalidad de los datos de turbiedad del agua cruda (Figura 2.1.1.5), con valor P igual a 0.104 (no se rechaza  $H_0$ : La distribución de los datos es normal), se analiza la Figura 2.1.1.6, donde la gráfica de rangos móviles, muestra que la variación del proceso está bajo control. Al observar la gráfica de observaciones individuales, ningún punto está fuera de control. El proceso es estable en el tiempo.

- **En verano, el agua es muy clara, por tanto más difícil de tratar, es necesario un ayudante de coagulación.**

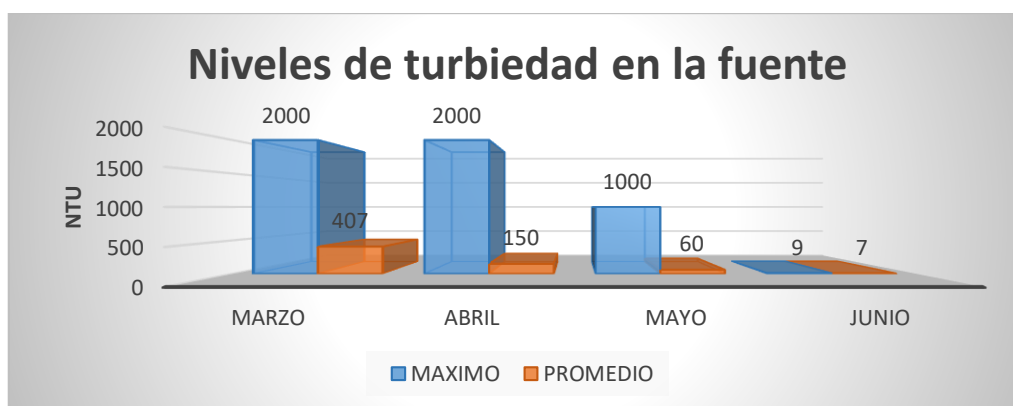
Es importante recalcar que, el objetivo del presente proyecto, es optimizar el tratamiento de clarificación del agua, llevado a cabo en el decantador N°2, cuando los niveles de turbiedad del agua cruda son medios (verano), ya que cuando la turbiedad es elevada, durante la época invernal, la eficiencia incrementa considerablemente, producto de un principio básico de la clarificación, cuanto mayor es la turbiedad del agua cruda, mayor será el coeficiente de aglomeración. En la práctica, se sabe que siempre es más difícil flocular aguas de baja turbiedad (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2004).

Con base en los datos de la Tabla 2.2.3, correspondientes al registro de turbiedades agua cruda junio-julio 2021, se realiza el análisis de los estadísticos descriptivos (Figura 2.1.1.7). Además la representación gráfica de la turbiedad máxima y promedio mensual durante el periodo marzo-junio 2021, registrada por el área de control de calidad de la empresa de agua de potable (figura 2.1.1.8).

Variable	N	N*	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	CoefVar	Mínimo	Q1	Mediana	Q3
NTU AGUA CRUDA	70	0	6,8876	0,0678	0,5674	8,24	5,9500	6,4100	6,9450	7,1850
Variable	Máximo	Rango								
NTU AGUA CRUDA	8,2000	2,2500								

**Figura 2.8 Estadísticos descriptivos turbiedades agua cruda junio-julio 2021**

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 2.9 Turbiedad máxima y promedio mensual durante el periodo marzo-junio 2021**

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en la figura 2.1.1.8, las turbiedades del agua cruda, durante los meses marzo y abril, fueron elevadas, debido al fuerte temporal y frecuentes precipitaciones lluviosas. Sin embargo, a partir del mes de junio y julio, la turbiedad

mínima de 5.95 NTU, máximo 8.2 NTU y en promedio 6.88 NTU (Figura 2.1.1.7). El agua tratada durante el periodo de experimentación, puede ser clasificada como agua clara y difícil de tratar mediante los procesos llevados a cabo dentro del decantador.

### 2.3. Elección de niveles para los factores

En la Tabla 2.2.1, sobre el plan de verificación de causas, se establece que, la velocidad de la mezcla lenta en el decantador, los tiempos entre purgas de lodos y el uso de polímero como ayudante de coagulación, son los factores considerados para la experimentación.

Referente al primero de los factores, “Cuanto mayor es el gradiente de velocidad, más rápida es la velocidad de aglomeración de las partículas. Mientras tanto, a medida que los flóculos aumentan de tamaño, crecen también las fuerzas de cizallamiento hidrodinámico, inducidas por el gradiente de velocidad. Los flóculos crecerán hasta un tamaño máximo, por encima del cual las fuerzas de cizallamiento alcanzan una intensidad que los rompe en partículas menores” (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2004, pág. 285).

Considerando que, como se describe en el capítulo 1, el decantador N°2, generalmente opera con una intensidad de 30 rpm en la mezcla lenta y dada la posible influencia de la velocidad, en el crecimiento de los flóculos y por ende de la eficiencia del decantador, se establecen niveles menores y el usualmente empleado (5 y 20 rpm), para el factor de la velocidad de mezcla lenta, durante el diseño de experimento.

Los estudios, no determinan la periodicidad para la remoción de lodos, la cual puede realizarse de forma continua o intermitente, siendo la última, empleada en aguas relativamente claras, como es el caso del presente proyecto (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2004). Por ello, en base a la observación del personal operativo, se fijan como niveles para el tiempo entre purgas, 1 y 2 horas.

Como tercer factor, se considera el uso de polímero de origen orgánico, carga catiónica, peso molecular bajo, también llamado copolímero de etileno diamina en solución; empleado como auxiliar de floculación, durante la experimentación, con una concentración de dilución de 1g/l y dosis de 0.2 ppm. Con el uso del polímero, “Se busca aumentar la velocidad de sedimentación de los flóculos, la resistencia de los mismos a las fuerzas de la cizalla, que pueden ocurrir en el transporte del agua floculada y la disminución de la dosis de coagulante primario” (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2004)

**Tabla 2.4 Niveles para los factores**

Factores	Niveles	
Velocidad mezcla lenta (rpm)	5	20
Tiempo entre purgas (hora)	1	2
Uso de polímero	Si	No

Fuente: Elaboración Propia

## 2.4. Desarrollo del experimento

Se planteó para el procedimiento experimental, un diseño factorial  $2^3$ , tomando como factores de estudio la velocidad de la mezcla lenta en el decantador, los tiempos entre purgas de lodos y el uso de polímero, como ayudante de floculación. La variable de respuesta fue la eficiencia del Decantador, cuantificada mediante el porcentaje de remoción de turbiedad dentro de la unidad, durante el periodo de experimentación.

Considerando que, no fue posible realizar todas las pruebas en un turno laboral, se emplea la técnica de separación en bloques para reducir la posible variabilidad.

**Tabla 2.5 Diseño factorial  $2^3$**

Orden Corrida	Bloques	Rpm mezcla lenta	Tiempo entre purgas	Uso de polímero
1	1	5	2	Si
2	1	20	1	Si
3	1	20	2	No
4	1	5	1	No
5	3	5	2	Si
6	3	5	1	No
7	3	20	2	No
8	3	20	1	Si
9	2	5	1	No
10	2	20	2	No
11	2	5	2	Si
12	2	20	1	Si

Fuente: Elaboración Propia

## 2.5. Medición de turbiedad (variable de respuesta)

La medición del porcentaje de turbiedad removida en el decantador, es realizada luego de calibrar el turbidímetro (Hach 2100Q) con soluciones buffer estandarizadas. Se tomaron muestras del agua que ingresa al aireador y del agua que sale del decantador (vertedero) para la lectura correspondiente. Entre cada muestra analizada se realizó la limpieza de la celda con un paño a fin de que no queden residuos que interfieran con la medición.

Mediante análisis de varianza (ANOVA) se evalúan la influencia de las rpm en la mezcla lenta, las horas entre purgas y el uso de polímero, al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores.

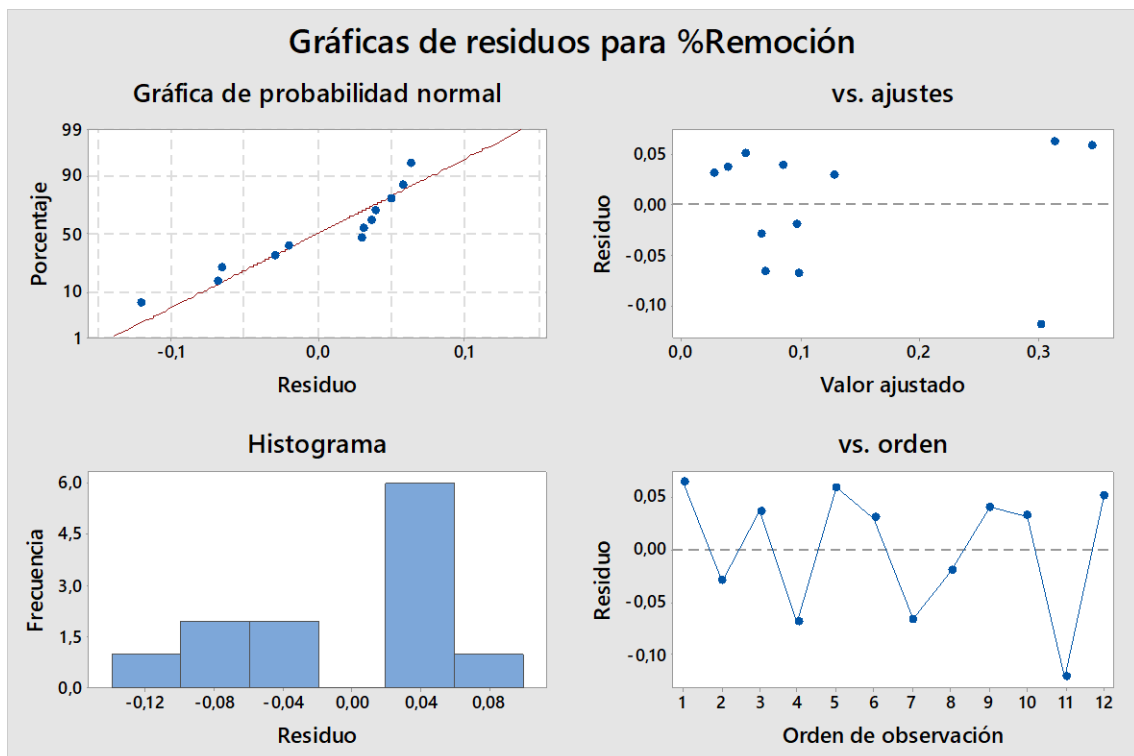
Asegurando el principio de aleatoriedad, para la combinación de niveles de los factores, en el desarrollo del experimento, se empleó el orden de corrida proporcionado por el software Minitab 18, mismo con el que se obtienen los análisis estadísticos y gráficos.

# CAPÍTULO 3

## 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

### 3.1. Análisis de supuestos

Se procede a realizar el análisis de los supuestos de distribución normal del error, de la varianza homogénea e independencia del error vs. Tiempo, a través de las gráficas presentadas en la figura 2.5.1.



**Figura 3.1 Gráfica de residuos del error para el porcentaje de remoción de turbiedad**

Fuente: Elaboración Propia

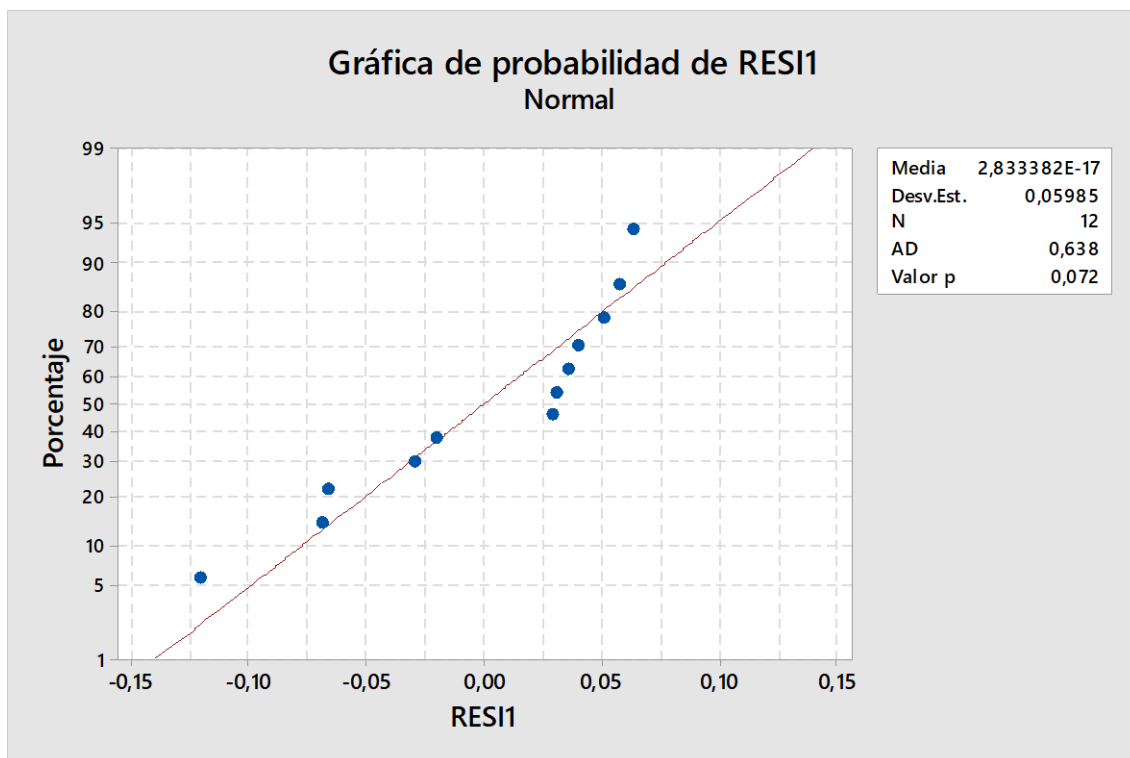
Como se aprecia, en la gráfica superior izquierda, las observaciones tienden a ubicarse cerca de la línea recta, a lo largo de esta. Se verifica que el supuesto de normalidad se cumple, a través de la gráfica de probabilidad (figura 2.5.2) para el residuo, que muestra un valor p de 0.072, por lo que no se rechaza la hipótesis nula, expresada de la siguiente forma:

$H_0$ : Los residuos tienen una distribución normal

Vs

$H_1$ : Se rechaza la hipótesis de comportamiento normal de los residuos





**Figura 3.2 Gráfica de probabilidad para Residuos**

Fuente: Elaboración Propia

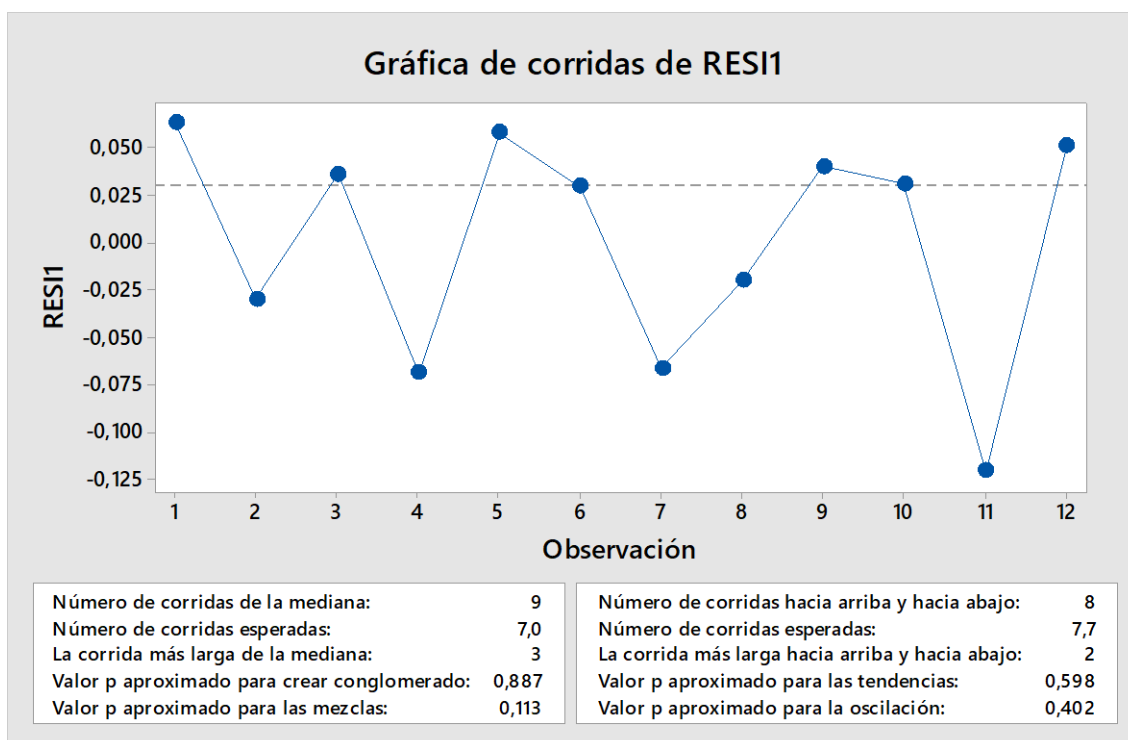
El supuesto de independencia del error se cumple no existen comportamientos con marcados patrones, de acuerdo a la gráfica Residuo vs. Ajustes (Figura 2.5.1).

En la gráfica Residuo vs. Orden (Figura 2.5.1), se muestra aparentemente un comportamiento independiente de los residuos, sin tendencias ni patrones, lo cual se corrobora con la gráfica de corridas para el residuo (Figura 2.5.3 y tabla 2.5.1).

**Tabla 3.1 Hipótesis de la gráfica de corridas para residuo**

Planteamiento de la Hipótesis	Valor P	Criterio
H <sub>0</sub> : Los datos tienen comportamiento aleatorio vs H <sub>1</sub> : Los datos muestran existencia de grupos	0,887	No se rechaza H <sub>0</sub> . El residuo tiene comportamiento aleatorio
H <sub>0</sub> : Los datos tienen comportamiento aleatorio vs H <sub>1</sub> : Los datos muestran existencia de mezclas	0,113	
H <sub>0</sub> : Los datos tienen comportamiento aleatorio vs H <sub>1</sub> : Los datos muestran existencia de tendencias	0,598	
H <sub>0</sub> : Los datos tienen comportamiento aleatorio vs H <sub>1</sub> : Los datos muestran existencia oscilatoria	0,402	

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 3.3 Gráfica de corridas para el Residuo**

Fuente: Elaboración Propia

### 3.2. Determinación de significancia estadística de factores

Para determinar si los factores rpm en la mezcla lenta, las horas entre purgas y el uso de polímeros, considerados en el modelo, tienen significancia estadística, sobre la respuesta, porcentaje de remoción de turbiedad, se toma como nivel de significancia de 5% ( $\alpha$  de 0.05). Los resultados del análisis del diseño factorial se muestran en la tabla 2.6.1.

**Tabla 3.2 Significancia de factores.**

#### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	0,145342	0,029068	4,43	0,049
Bloques	2	0,003735	0,001867	0,28	0,762
Lineal	3	0,141607	0,047202	7,19	0,021
Rpm mezcla lenta	1	0,070188	0,070188	10,69	<b>0,017</b>
Horas entre purgas	1	0,026960	0,026960	4,11	0,089
Uso polímero	1	0,044459	0,044459	6,77	<b>0,041</b>
Error	6	0,039405	0,006567		
Total	11	0,184747			

Fuente: Elaboración Propia

La hipótesis planteada:

$H_0$ : El factor no tiene efecto sobre la eficiencia del decantador

Vs

$H_1$ : El factor tiene efecto sobre la eficiencia del decantador

Dos de los tres factores usados para la experimentación, velocidad de mezcla lenta y uso de polímero, con valores P de 0.017 y 0.041, respectivamente, demuestran una asociación estadísticamente significativa entre este factor y la variable de respuesta, porcentaje de remoción de turbiedad del decantador. Mientras que se rechazan las horas entre purgas, como factor de influencia, con un valor P de 0.089.

### 3.3. Determinación ajuste del modelo a los datos

El  $R^2$  ajustado (Tabla 2.7.1), indica que el modelo propuesto explica el 60,90% de la variabilidad en la remoción de turbiedad en el decantador, lo cual es aceptable.

**Tabla 3.3 Ajuste del modelo**

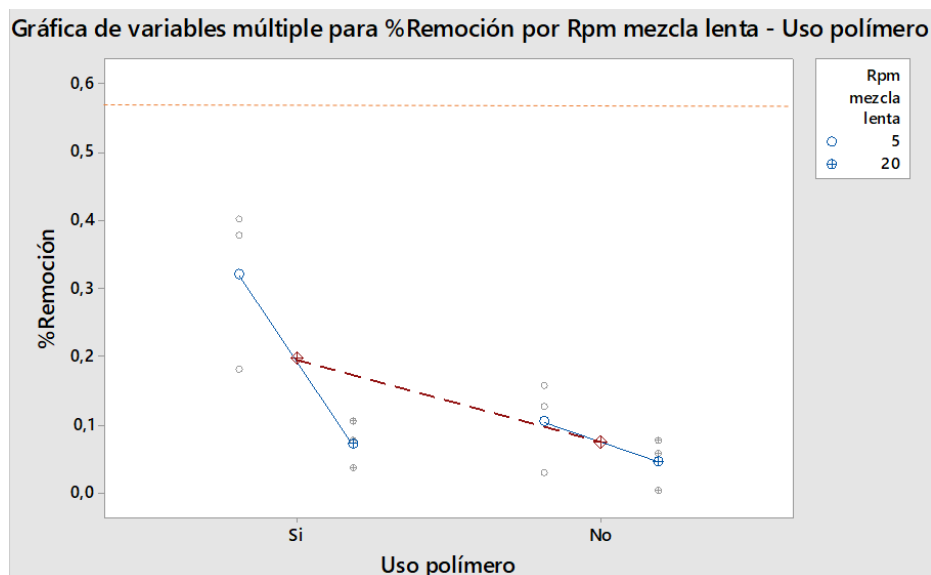
Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0810400	78,67%	<b>60,90%</b>	14,68%

Fuente: Elaboración Propia

### 3.4. Determinación de las condiciones óptimas de operación

Mediante la gráfica de variables múltiples (Figura 2.8.1), se procede a determinar, las condiciones óptimas de operación, siendo 5 rpm, la velocidad adecuada para la mezcla lenta y confirmada la necesidad de utilizar polímero como ayudante de floculación, para incrementar hasta un 32%, la eficiencia en el proceso de remoción de turbiedad, llevado a cabo en el Decantador N°2.



**Figura 3.4 Gráfica de variables múltiples**

Fuente: Elaboración Propia

### 3.5. Corrida verifcatoria

Con la finalidad de observar el comportamiento de la variable de respuesta, en función de las condiciones óptimas de operación, encontradas con la aplicación del presente diseño de experimento, se procede a realizar la corrida verifcatoria, misma que consiste en 71 corridas (Cálculo tamaño de muestra n, anexo A).

**Tabla 3.4 Resultados corrida verifcatoria**

Nº Corrida	Fecha	Turbiedad Ingreso decantador	Turbiedad salida decantador	%Remoción
1	10-ago-21	8	5,82	27%
2	10-ago-21	9,2	4,98	46%
3	10-ago-21	8,6	5,08	41%
4	10-ago-21	7,6	5,21	31%
5	10-ago-21	9,4	4,46	53%
6	10-ago-21	7,5	5,44	27%
7	10-ago-21	8,5	5,53	35%
8	10-ago-21	8,6	5,11	41%
9	10-ago-21	7,3	5,28	28%
10	10-ago-21	8,5	4,93	42%
11	10-ago-21	7,7	4,62	40%
12	10-ago-21	7,8	4,61	41%
13	10-ago-21	8,9	4,41	50%
14	10-ago-21	8,9	4,29	52%
15	10-ago-21	9,2	4,12	55%

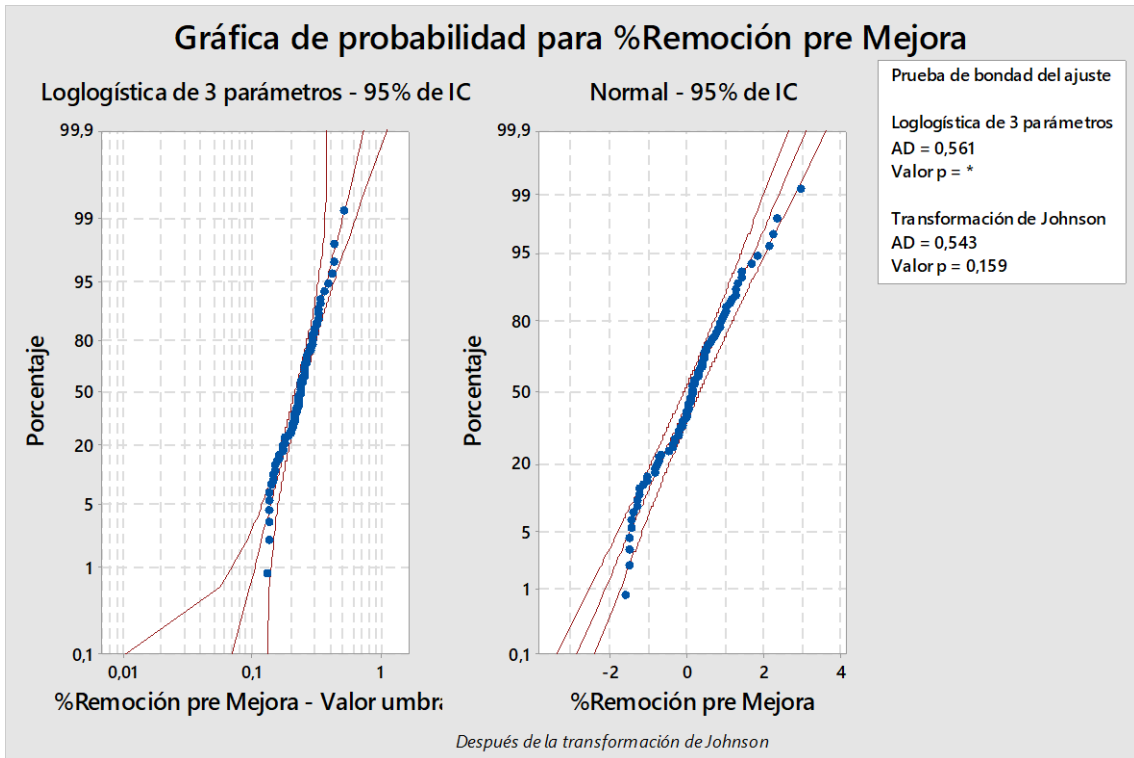
<b>N° Corrida</b>	<b>Fecha</b>	<b>Turbiedad Ingreso decantador</b>	<b>Turbiedad salida decantador</b>	<b>%Remoción</b>
16	10-ago-21	8,9	4,21	53%
17	11-ago-21	9,2	5,38	42%
18	11-ago-21	10,2	3,22	68%
19	11-ago-21	9,3	5,38	42%
20	11-ago-21	9,5	6,4	33%
21	11-ago-21	9,4	6,58	30%
22	11-ago-21	8,6	5,45	37%
23	11-ago-21	10,9	4,78	56%
24	11-ago-21	10,2	5,1	50%
25	11-ago-21	9,3	5,12	45%
26	11-ago-21	9,6	5,8	40%
27	11-ago-21	10,1	4,82	52%
28	11-ago-21	9,1	4,98	45%
29	11-ago-21	8,6	5,79	33%
30	11-ago-21	9,6	4,84	50%
31	11-ago-21	8,9	4,4	51%
32	11-ago-21	8,6	4,65	46%
33	12-ago-21	8,5	4,77	44%
34	12-ago-21	9,3	5,22	44%
35	12-ago-21	9,2	4,1	55%
36	12-ago-21	9,3	5,1	45%
37	12-ago-21	8,9	5,53	38%
38	12-ago-21	7,8	4,48	43%
39	12-ago-21	8	4,6	43%
40	12-ago-21	8,8	4,23	52%
41	12-ago-21	9,4	5,96	37%
42	12-ago-21	9,8	5,71	42%
43	12-ago-21	8,3	4,77	43%
44	12-ago-21	9,4	5,09	46%
45	12-ago-21	9,7	4,73	51%
46	12-ago-21	10	4,2	58%
47	12-ago-21	8,5	4,88	43%
48	12-ago-21	9,1	4,97	45%
49	13-ago-21	7,3	4,34	41%
50	13-ago-21	9,6	5,77	40%
51	13-ago-21	8,7	4,55	48%
52	13-ago-21	8,5	5,49	35%
53	13-ago-21	9,3	4,97	47%
54	13-ago-21	7,7	4,88	37%
55	13-ago-21	9,2	5,18	44%
56	13-ago-21	8,7	5,85	33%

N° Corrida	Fecha	Turbiedad Ingreso decantador	Turbiedad salida decantador	%Remoción
57	13-ago-21	9,8	5,19	47%
58	13-ago-21	8,7	4,68	46%
59	13-ago-21	7,6	4,87	36%
60	13-ago-21	8,2	4,86	41%
61	13-ago-21	9,5	4,88	49%
62	13-ago-21	7,5	5,11	32%
63	13-ago-21	9,4	4,26	55%
64	13-ago-21	8,7	4,89	44%
65	14-ago-21	9,3	5,14	45%
66	14-ago-21	8,6	5,21	39%
67	14-ago-21	9,4	4,7	50%
68	14-ago-21	8,6	4,66	46%
69	14-ago-21	9,2	5,17	44%
70	14-ago-21	8,7	5,01	42%
71	14-ago-21	7,9	5,33	33%

Fuente: Elaboración Propia

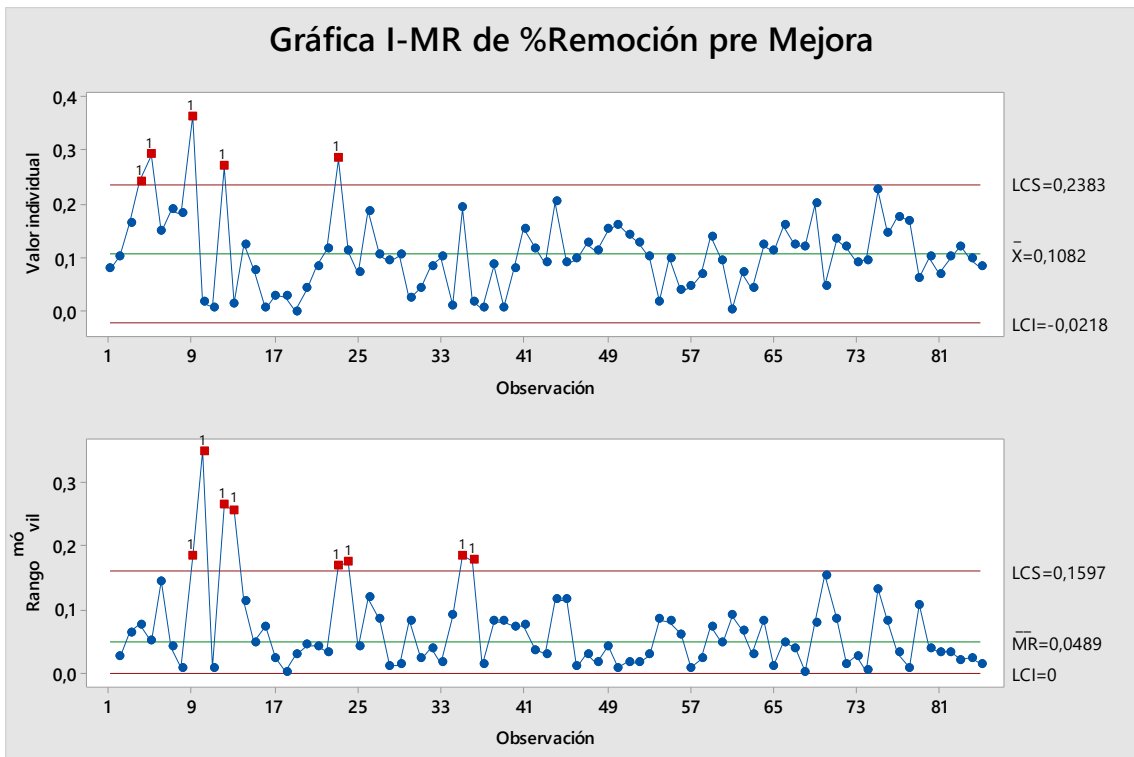
### 3.6. Análisis de capacidad del proceso, previo a la aplicación de mejora

Considerando los datos de la eficiencia del Decantador N°2, correspondientes a 85 observaciones (Anexo 2), tomadas durante los meses de junio y julio, previo a la implementación de la mejora, periodo en el cual, se presentan niveles de turbiedad en el ingreso del decantador, similares a las que se observaron durante la experimentación, se procede a realizar el respectivo análisis de capacidad, que permita una comparación de las condiciones previas y posteriores, a la optimización de las condiciones de operación de mezcla lenta y uso de polímero.



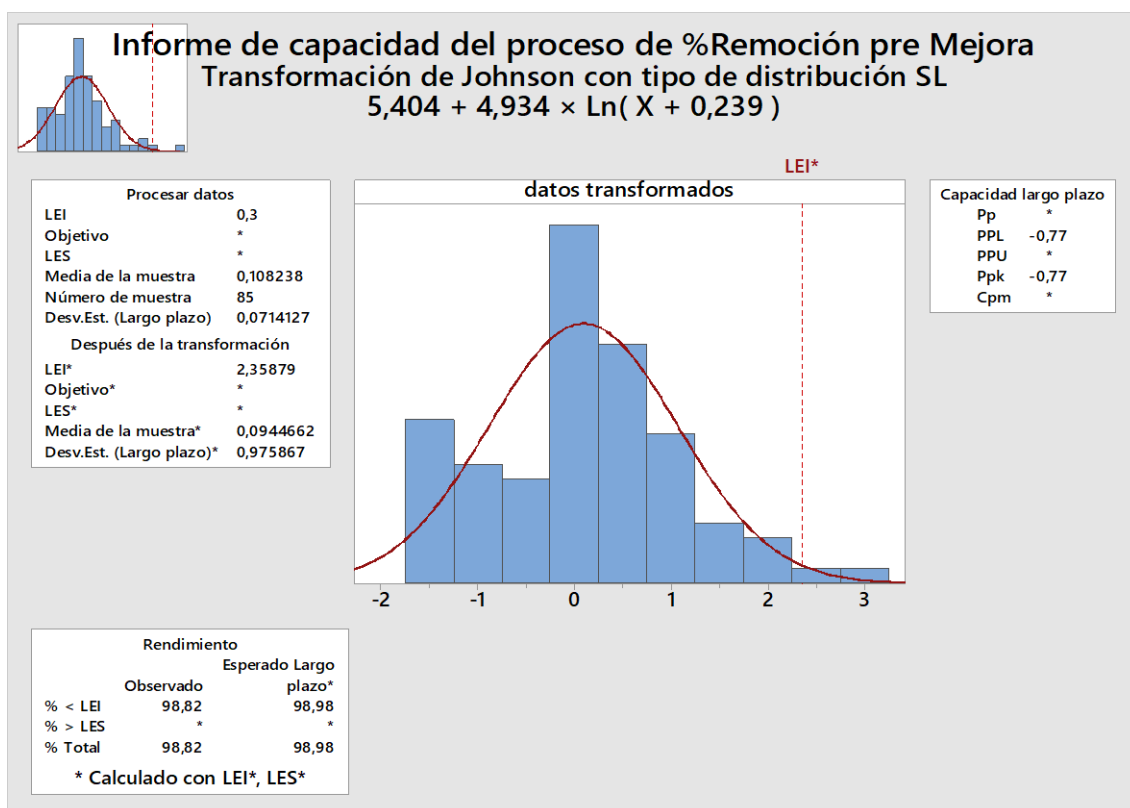
**Figura 3.5** Identificación de la distribución para %Remoción antes de la mejora

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 3.6** Gráfica de valores individuales para %Remoción antes de la mejora

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 3.7 Análisis de capacidad %Remoción antes de la mejora**

Fuente: Elaboración Propia

Se realiza la verificación de los supuestos previo al análisis de capacidad. La figura 2.10.1, demuestra que el porcentaje de remoción de turbiedad, previo a la mejora, tiene una distribución normal, después de la transformación de Johnson. Del mismo modo se observa que el proceso no es estable, se encuentra fuera de control estadístico (Figura 2.10.2).

En el antecedente del presente proyecto, se planteó una eficiencia promedio del decantador, que consideró un rango más amplio de turbiedades de ingreso a la unidad (5 a 60 NTU), durante el año 2020. Sin embargo, durante la experimentación, producto de las condiciones climáticas impredecibles, el rango de turbiedad en el ingreso, fue de entre 7.30 NTU y 10.90 NTU. Lo descrito, limita fijar un objetivo más alto, por lo que se plantea como límite de especificación, para el porcentaje de remoción de turbiedad en el decantador, un 30%, cifra que significa triplicar la eficiencia promedio de la variable respuesta, de 11% previo a la implementación de la mejora (Anexo 3).

El análisis de capacidad (Figura 2.10.3), demuestra que el proceso de remoción de turbiedad, llevado a cabo en el Decantador N°2, no es capaz de cumplir con la especificación, de al menos remover en un 30% la turbiedad (Ppk= - 0,77, menor a 0,67). La proporción de la remoción de turbiedad, fuera del límite de especificación es de 98,82%.



### 3.7. Análisis de capacidad posterior a la aplicación de la mejora

A partir del análisis de los resultados de la corrida verificatoria (Tabla 2.9.1), posterior a la implementación de las condiciones óptimas de operación halladas, se procede a realizar el análisis de capacidad del proceso.

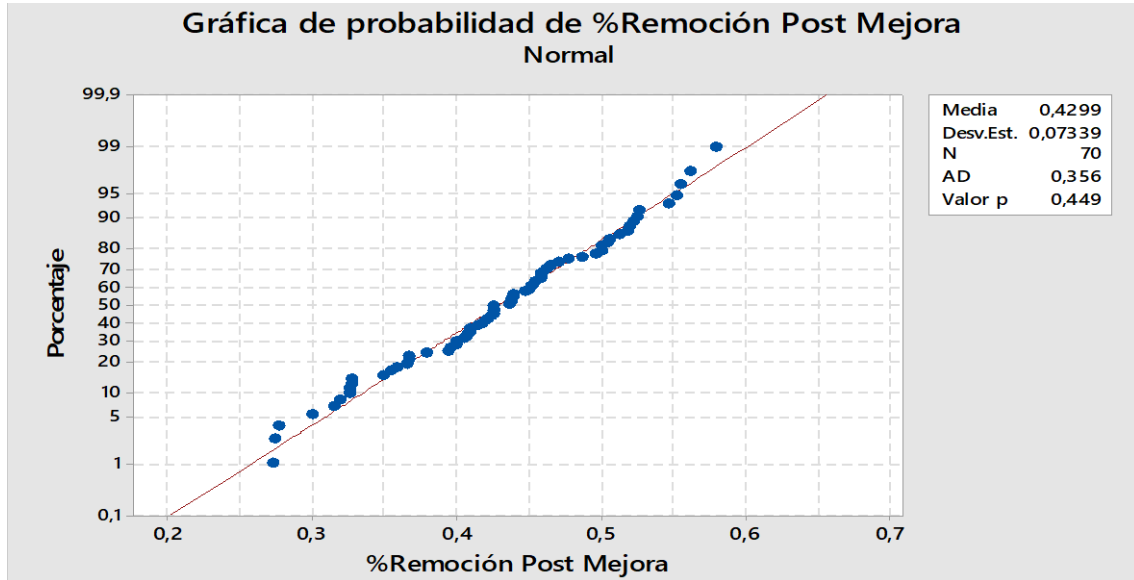


Figura 3.8 Gráfica de probabilidad %Remoción posterior a la mejora

Fuente: Elaboración Propia

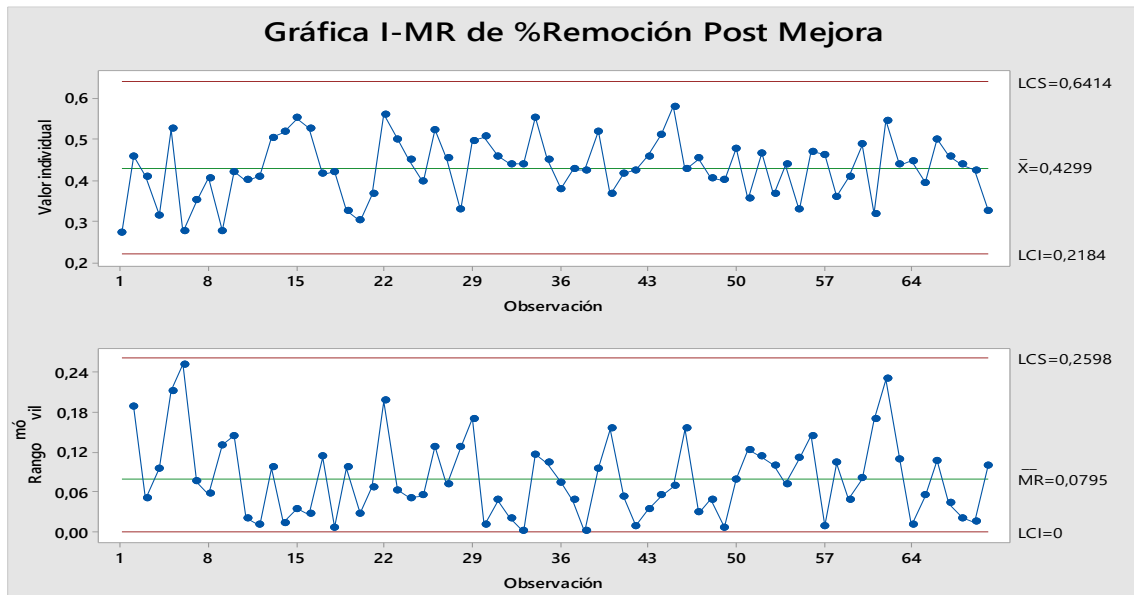
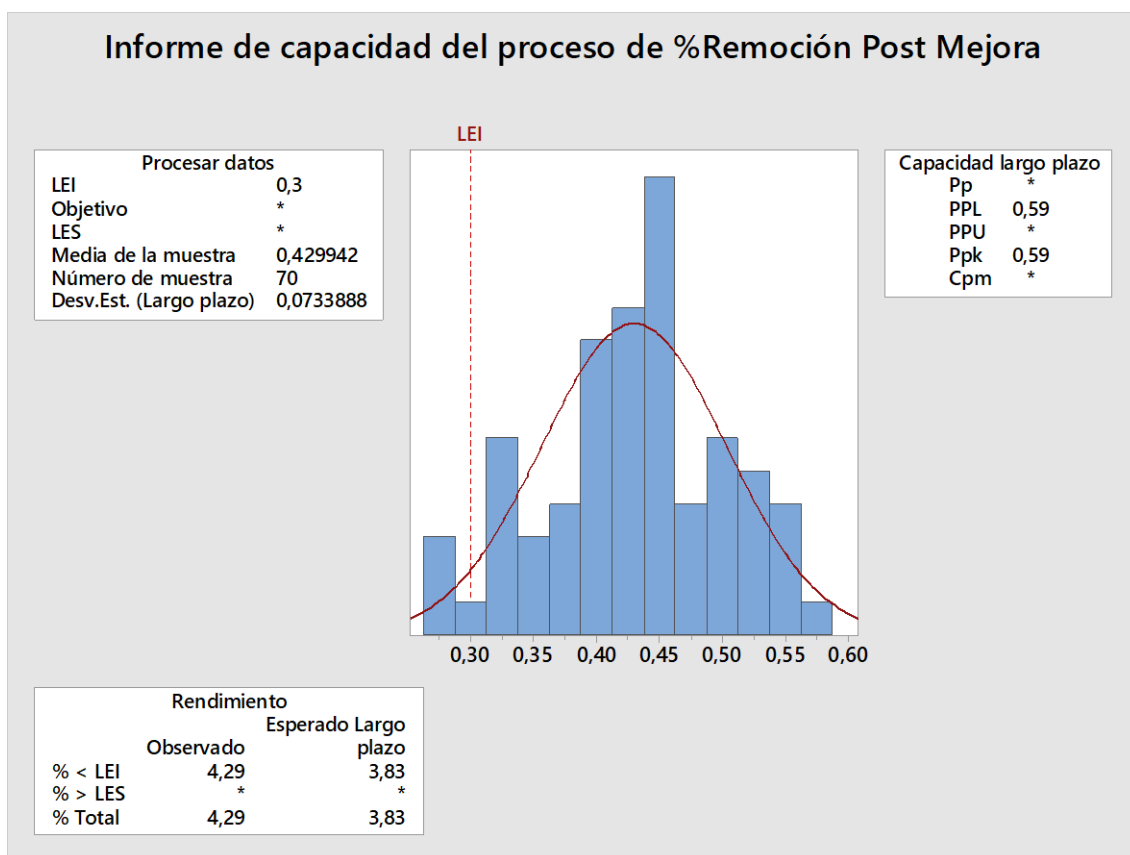


Figura 3.9 Gráfica de valores individuales para %Remoción posterior a la mejora

Fuente: Elaboración Propia



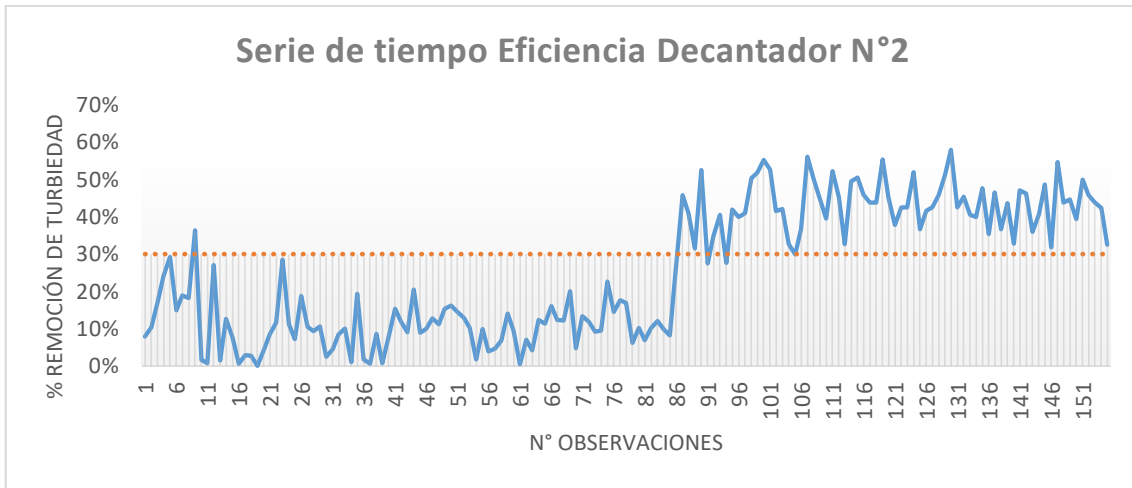
**Figura 3.10 Análisis de capacidad %Remoción posterior a la mejora**

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que los supuestos se cumplen, los datos del porcentaje de remoción, posterior a la aplicación de la mejora, tienen una distribución probabilista normal (Figura 2.11.1) y el proceso se encuentra bajo control (Figura 2.11.2)

El proceso de remoción de turbiedad, llevado a cabo en el Decantador N°2, no es capaz de cumplir con la especificación, de al menos remover en un 30% la turbiedad ( $Ppk = 0.59$ , menor a  $0.67$ ). Sin embargo, la proporción de la remoción de turbiedad, fuera del límite de especificación disminuyó considerablemente de 98,98% inicialmente, hasta un proyectado de sólo 3,83% de las observaciones fuera del límite.

En la serie de tiempo (Figura 2.11.4) se puede observar la evolución de la variable respuesta, en función del tiempo, a pesar de que la variabilidad aún es significativa, es notorio el incremento del porcentaje de remoción de turbiedad.



**Figura 3.11 Serie de tiempo Eficiencia Decantador N°2**

Fuente: Elaboración Propia

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

- Durante el proceso de potabilización del agua, es posible incrementar la eficiencia operativa del Decantador de la Planta N°2, hasta un 58% y un 42% en promedio, empleando polímero como ayudante de coagulación y estableciendo 5 rpm como velocidad de mezcla lenta, cuando los niveles de turbiedad son bajos (7 a 11 NTU).
- Los factores que influyen en la eficiencia del Decantador son la velocidad de mezcla lenta y el uso polímero como ayudante de coagulación. Se descarta, a través del diseño de experimento, que los tiempos entre purgas de lodos, afecten la operación de la unidad, durante la época de estiaje.

### 4.2. Recomendaciones

- Evaluar la eficiencia del Decantador, cuando las condiciones climáticas lo permitan y los niveles de turbiedad varíen sus rangos, considerando que los factores, velocidad de mezcla lenta y uso de polímero tienen influencia en la variable respuesta.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2004). *Tratamiento de agua para el consumo humano, Plantas de filtración rápida, Manual I: Teoría*. Lima: CEPIS/OPS.
- Gutiérrez Pulido, H., & De La Vara, S. R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. México: McGraw-Hill Interamericana.
- Montgomery, D. (2004). *Control Estadístico de la calidad*. Limusa Wiley.
- Perozo Cuicas, J. R., & Abreu Cuadra, R. L. (2017). Evaluación de la electrocoagulación en el tratamiento de agua potable. *Química Viva*, 56-69.
- Sandoval-Reyes, J. L., & Ramírez, Z. R. (2019). Remoción simultánea de materia orgánica disuelta y microcistina-LR por los procesos de preoxidación y coagulación-floculación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 889-900.

## **6. ANEXOS**

## Anexo 1. Determinación número de muestra para corrida verficatoria

$$n = \left(\frac{2s}{d}\right)^2$$

Donde:

n: Tamaño de muestra mínimo para la corrida verficatoria

2: Representa un nivel de confianza del 95%

S: Estima la desviación estándar de los datos

d: Nivel de precisión de la muestra. Diferencia que se espera detectar

Rpm mezcla lenta	Horas entre purgas	Uso polímero	Turbiedad Ingreso	Turbiedad salida	%Remoción
5	2	Si	8,34	5,2	37,6%
5	2	Si	7,9	4,73	40,1%
5	1	No	8,57	7,23	15,6%
5	2	Si	8,22	6,73	18,1%
<b>Promedio</b>					0,279
<b>Desviación estándar</b>					0,13
<b>%Error</b>					10
<b>Error promedio</b>					0,03
<b>Z alfa/2</b>					1,96
<b>n</b>					71

## Anexo 2 Resultados %Remoción antes de la mejora

N° Muestra	Fecha	NTU ingreso decantador 2	NTU salida decantador 2	%Remoción
1	7-jun-21	7,49	6,9	8%
2	7-jun-21	6,36	5,7	10%
3	7-jun-21	6,12	5,1	17%
4	8-jun-21	7,71	5,84	24%
5	8-jun-21	7,21	5,1	29%
6	8-jun-21	7,36	6,26	15%
7	9-jun-21	6,35	5,15	19%
8	9-jun-21	5,99	4,9	18%
9	9-jun-21	7,12	4,53	36%
10	10-jun-21	6,2	6,1	2%
11	10-jun-21	6,47	6,42	1%
12	10-jun-21	7,1	5,18	27%
13	11-jun-21	8,07	7,95	1%
14	11-jun-21	6,98	6,1	13%
15	11-jun-21	7,1	6,55	8%
16	14-jun-21	7,16	7,12	1%
17	15-jun-21	7,22	7,01	3%
18	15-jun-21	7,1	6,9	3%
19	15-jun-21	7,55	7,55	0%
20	16-jun-21	6,52	6,24	4%
21	16-jun-21	7,1	6,5	8%
22	16-jun-21	6,24	5,51	12%
23	17-jun-21	7,2	5,15	28%
24	17-jun-21	7,04	6,25	11%
25	17-jun-21	7,13	6,62	7%
26	18-jun-21	8,01	6,5	19%
27	18-jun-21	7,53	6,74	10%
28	18-jun-21	8,2	7,43	9%
29	18-jun-21	7,95	7,11	11%
30	21-jun-21	7,84	7,65	2%
31	21-jun-21	7,75	7,4	5%
32	21-jun-21	7,1	6,5	8%
33	22-jun-21	6,96	6,26	10%
34	22-jun-21	6,79	6,72	1%
35	22-jun-21	7,99	6,44	19%
36	23-jun-21	6,63	6,51	2%
37	23-jun-21	6,42	6,38	1%
38	23-jun-21	6,55	5,98	9%
39	24-jun-21	7,09	7,04	1%
40	24-jun-21	5,95	5,48	8%
41	24-jun-21	6,11	5,17	15%
42	28-jun-21	6,57	5,79	12%



N° Muestra	Fecha	NTU ingreso decantador 2	NTU salida decantador 2	%Remoción
43	28-jun-21	6	5,46	9%
44	28-jun-21	6,41	5,1	20%
45	30-jun-21	6,69	6,09	9%
46	30-jun-21	7,1	6,4	10%
47	30-jun-21	6,99	6,1	13%
48	1-jul-21	6,95	6,17	11%
49	1-jul-21	6,39	5,41	15%
50	1-jul-21	6,19	5,19	16%
51	2-jul-21	5,95	5,09	14%
52	2-jul-21	6,94	6,04	13%
53	2-jul-21	6,7	6,02	10%
54	5-jul-21	6,67	6,55	2%
55	5-jul-21	7,18	6,47	10%
56	5-jul-21	7,39	7,1	4%
57	6-jul-21	6,41	6,11	5%
58	6-jul-21	6,33	5,9	7%
59	6-jul-21	7,1	6,1	14%
60	7-jul-21	6,9	6,25	9%
61	7-jul-21	6,75	6,72	0%
62	7-jul-21	6,9	6,41	7%
63	7-jul-21	6,95	6,66	4%
64	8-jul-21	6,47	5,67	12%
65	8-jul-21	6,9	6,12	11%
66	8-jul-21	5,96	5	16%
67	9-jul-21	7,39	6,48	12%
68	9-jul-21	6,40	5,62	12%
69	9-jul-21	6,38	5,1	20%
70	9-jul-21	6,41	6,1	5%
71	12-jul-21	6,51	5,64	13%
72	12-jul-21	6,7	5,9	12%
73	12-jul-21	5,93	5,38	9%
74	13-jul-21	6,4	5,79	10%
75	13-jul-21	6,33	4,9	23%
76	13-jul-21	7,01	5,99	15%
77	14-jul-21	7,48	6,16	18%
78	14-jul-21	7,21	5,99	17%
79	14-jul-21	7,2	6,75	6%
80	15-jul-21	8,78	7,89	10%
81	15-jul-21	8,23	7,66	7%
82	15-jul-21	8,07	7,25	10%
83	16-jul-21	7,27	6,39	12%
84	16-jul-21	7,1	6,41	10%
85	16-jul-21	6,9	6,33	8%

**Anexo 3 Estadísticos descriptivos: Resultados Turbiedad ingreso decantador en la etapa de implementación de la mejora**

Variable	N	N*	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana
Turbiedad Ingreso decantador	71	0	8,8704	0,0901	0,7590	7,3000	8,5000	8,9000
Variable	Q3		Máximo	Rango				
Turbiedad Ingreso decantador	9,4000		10,9000	3,6000				