



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Facultad de Ciencias Químicas
Carrera de Ingeniería Ambiental

**“EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN
EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE EL
CEBOLLAR”**

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Ambiental

Modalidad: Proyecto técnico

Autores:

Freeddy Adrián Criollo Illescas

CI: 0105347561

fredcy10@hotmail.com

Viviana Elizabeth Lara Delgado

CI: 0604461384

vivieliza_244@hotmail.com

Director:

Ing. Fausto Fernando García Ávila

CI: 0301454617

Cuenca – Ecuador

21- octubre-2020



RESUMEN

El presente proyecto fue desarrollado en la Planta de Tratamiento de Agua Potable "El Cebollar" (PTAP), y tuvo como finalidad realizar una evaluación de las condiciones hidráulicas, dosis óptimas, eficiencia de los procesos de coagulación y floculación. La evaluación hidráulica permitió obtener los gradientes de velocidad y tiempos de retención tanto de la coagulación como de la floculación, que fueron necesarios para aplicarlas en las pruebas de jarras y de esa forma se obtuvo resultados con las condiciones similares de la PTAP. Se ejecutaron ensayos de jarras entre los meses de marzo hasta agosto del 2019, para obtener la dosis óptima de sulfato de aluminio (SA) y polímero catiónico (PC) en base a parámetros de turbiedad (TURB), color aparente (CA) y pH, aplicados a caudales de 1000, 950 y 800 l/s del agua cruda. Los resultados de las pruebas de jarras se utilizaron para realizar las curvas de dosificación y eficiencia de sulfato de aluminio tipo A (SAGA), sulfato de aluminio tipo B (SAGB) y PC.

Usando SAGA en las pruebas de jarras se obtuvo un promedio del porcentaje de remoción de TURB (96.11 %) y del CA (98.60 %); cuando se usó SAGB se obtuvo un promedio del porcentaje de remoción de TURB (95.65%) y CA (97.82%), para los dos casos el pH tuvo una variabilidad dentro del rango bibliográfico. Por otro lado, al aplicar el coagulante junto con el floculante se obtuvo 5% más de los porcentajes de remoción que al suministrar solo SA. Además, se determinó que el PC tiene un comportamiento similar al ser usado con los dos coagulantes con relación al porcentaje de remoción de TURB, CA y variación de pH. La dosis de SAGA utilizada fue menor en comparación con el SAGB.

Los resultados que fueron obtenidos servirán para mejorar la potabilización del agua en los procesos analizados. Además, mejorará la eficiencia en la dosificación del coagulante y floculante, consecuentemente generará la reducción de los costos por compra de químicos.

Palabras claves: Sulfato de aluminio, polímero catiónico, clarificación, potabilización, optimización de coagulantes, ensayo de jarras, gradiente de velocidad, trazadores, tiempo de retención y curva de dosificación.



ABSTRACT

This project was developed in the Treatment Plant "El Cebollar" Drinking Water (PTAP). Its purpose was to evaluate the hydraulic conditions, optimal doses, efficiency of the coagulation and flocculation processes. The hydraulic evaluation allowed obtaining the gradients of speed and retention times of both coagulation and flocculation, which were necessary to apply them in the jar tests. The results were obtained with the similar conditions of the PTAP. Jar tests were carried out from March to August 2019 in order to obtain the optimal dose of aluminum sulfate (SA) and cationic polymer (PC) based on turbidity parameters (TURB), apparent color (CA) and pH, which were applied to flows of 1000, 950 and 800 l / s of raw water. The jar test results were used to perform the dosing and efficiency curves for Type A Aluminum Sulfate (SAGA), Type B Aluminum Sulfate (SAGB) and PC.

Using SAGA in the jar tests, an average removal percentage of TURB (96.11%) and CA (98.60%) was obtained; when SAGB was used, an average removal percentage of TURB (95.65%) and CA (97.82%) was obtained. For both cases the pH had variability within the bibliographic range. On the other hand, when applying the coagulant together with the flocculant, a 5% more of the removal percentages were obtained than when supplying only SA. Moreover, it was determined that the PC has a similar behavior by being used with the two coagulants regarding the percentage removal TURB , CA and pH variation. The dose of SAGA used was lower compared to SAGB.

The results that were obtained will serve to improve the purification of water in the analyzed processes. In addition, it will improve the efficiency in the dosing of the coagulant and flocculant, and consequently, it will generate the reduction of the costs for the purchase of chemicals.

Key words: Aluminum sulfate, cationic polymer, clarification, purification, coagulant optimization, jar test, speed gradient, tracers, retention time and dosing curve.



LISTA DE ABREVIATURAS

Al₃SO₄: Sulfato de Aluminio

CA: Color aparente

CV: Color verdadero

H₂O: Agua

NaCl: Cloruro de Sodio

NOM: Materia Orgánica Natural

PC: Polímero catiónico

PTAP: Planta de Tratamiento de Agua Potable

PVC: Policloruro de vinilo

RPM: Revoluciones por Minuto

SA: Sulfato de aluminio

SAGA: Sulfato de aluminio granular tipo A

SAGB: Sulfato de aluminio granular tipo B

SDT: Sólidos disueltos totales

TURB: Turbiedad

UPC: Unidades de Platino Cobalto



TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	2
LISTA DE ABREVIATURAS	4
AGRADECIMIENTOS	17
DEDICATORIA	18
CAPÍTULO I	19
INTRODUCCIÓN	19
1.1 ANTECEDENTES.....	19
1.2 PROBLEMÁTICA.....	20
1.3 OBJETIVOS	21
1.3.1 Objetivo General	21
1.3.2 Objetivos Específicos	21
1.4 JUSTIFICACIÓN	22
CAPÍTULO II : MARCO TEÓRICO	23
2.1 AGUA POTABLE	23
2.2 PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL AGUA.....	23
2.3 COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN	25
2.3.1 Coagulación.....	25
2.3.2 Estabilidad coloidal	25
2.3.3 Factores que afectan al proceso de coagulación.....	27
2.3.4 Tipos de coagulantes	27
2.3.5 Mecanismo de Coagulación	28
2.3.6 Floculación	29
2.3.7 Factores que intervienen.....	29
2.3.8 Clasificación de los floculantes	30
2.3.9 Mecanismo de floculación.....	30
2.4 ENSAYO DE JARRAS	31
CAPÍTULO III : METODOLOGÍA	32
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	32
3.1.1 Descripción de los procesos que se realizan en la PTAP	33
3.2 EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES HIDRÁULICAS	34
3.2.1 Caudales	34
3.2.2 Evaluación del mezclador- coagulación.....	39
3.2.3 Evaluación de los floculadores	43
3.2.4 Evaluación del comportamiento hidráulico	48
3.3 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA.....	54



3.3.1 Muestreo	54
3.3.2 Recolección de muestras	54
3.3.3 Materiales, reactivos y equipos utilizados en el laboratorio.....	55
3.3.4 Preparación de las soluciones	56
3.3.5 Cálculo de dosificación de las soluciones	58
3.3.6 Procedimiento pruebas de jarras.....	59
3.3.7 Análisis estadístico para el coagulante y floculante.	60
3.3.8 Eficiencia del coagulante y floculante.....	62
3.3.9 Análisis de costos para el coagulante y el floculante	63
CAPÍTULO IV : RESULTADOS Y DISCUSIONES	64
4.1 EVALUACIÓN DE CONDICIONES HIDRÁULICAS	64
4.1.1 Caudales de agua cruda	64
4.2 EVALUACIÓN DE MEZCLADORES – COAGULACIÓN	65
4.2.1 Tiempo de retención teórico y real	66
4.2.2 Intensidad de la mezcla rápida	67
4.3 EVALUACIÓN DE LOS FLOCULADORES	70
4.3.1 Geometría de la unidad.....	70
4.3.2 Caudales de operación en los floculadores.....	71
4.3.3 Tiempo de retención	74
4.3.4 Intensidad de la floculación.....	75
4.3.5 Características hidráulicas (evaluación de la eficiencia hidráulica y tipo de flujo en el floculador)	77
4.4 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA.....	83
4.4.1 Condiciones de operación de las pruebas de jarras	83
4.4.2 Ensayo de jarras para coagulante y floculante	84
4.4.3 Análisis estadístico para el coagulante y floculante	89
4.4.4 Eficiencia del Coagulante y floculante	92
4.4.5 Análisis de costos para el coagulante y el floculante	97
CAPÍTULO V : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	101
CONCLUSIONES	101
RECOMENDACIONES	104
CAPÍTULO VI : REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
CAPÍTULO VII : ANEXOS.....	113
7.1 Anexo VII-A: Fichas técnicas del equipo	113
7.2 Anexo VII-B: Datos de las condiciones iniciales del agua cruda	117
7.3 Anexo VII-C: Resultados de la evaluación de los floculadores.....	119
7.4 Anexo VII-D: Evidencias fotográficas de los equipos utilizados	122
7.5 Anexo VII-E: Evidencias fotográficas de las pruebas realizadas en la planta.....	123



7.6	Anexo VII-F: Fichas técnicas de los químicos	125
7.7	Anexo VII-G: Resultados de los caudales registrados	128
7.8	Anexo VII-H: Relación entre el gradiente de velocidad y las pruebas de jarras	129
7.9	Anexo VII-I: Ensayos de laboratorio son SAGB para un caudal de 1000 l/s	130
7.10	Anexo VII-J: Método de Wolf- Resnick	133
7.11	Anexo VII-K: Curvas de tendencia	135
7.12	Anexo VII-L: Índice de Morrill	138
7.13	Anexo VII-M: Resultados pruebas de jarras	141
7.14	Anexo VII-N: Resultados de dosis óptimas de turbiedad, color y pH	149
7.15	Anexo VII-O: Curvas de dosificación coagulante	157
7.16	Anexo VII-P: Resultados estadísticos	161
7.17	Anexo VII-Q: Curvas de dosificación floculante	163
7.18	Anexo VII-R: Curvas de eficiencia de coagulante y floculante	164

TABLA DE FIGURAS

Figura 2.3-1: Potencial Zeta	26
Figura 2.3-2: Coagulación por adsorción.	28
Figura 2.3-3: Coagulación por barrido.	29
Figura 3.1-1: Ubicación de la Planta de Tratamiento de Agua “El Cebollar”	32
Figura 3.2-1: Punto de muestreo canal de conducción externo.	35
Figura 3.2-2: Puntos de muestro canal de ingreso interno	36
Figura 3.2-3: Curva de calibración	38
Figura 3.2-4: Sección para la inyección del trazador y la toma de muestras en la unidad de la mezcla rápida.	40
Figura 3.2-5: Puntos de muestreo de los floculadores.	45
Figura 3.2-6: Puntos de muestreo de las unidades de floculación.	47
Figura 3.2-7: Concentración de trazador en efluente de un reactor.	49
Figura 3.2-8: Curva de 1-F(t). Cantidad de trazador que pertenece al reactor (l)	50
Figura 3.2-9: Índice de Morrill.	53
Figura 4.1-1: Análisis del caudal total de ingreso a la PTAP	65
Figura 4.2-1: Canal rectangular con cambio de pendiente	66
Figura 4.2-2: Simbología para las dimensiones del canal rectangular con cambio de pendiente.	67
Figura 4.3-1: Vista de planta del Floculador 1 (derecha) y Floculador 2 (izquierda). ...	70
Figura 4.3-2: Pérdida de carga del floculador 1 (corte longitudinal)	76



Figura 4.3-3: Curva de tendencia para un caudal de 1000 l/s en el floculador 1.....	77
Figura 4.3-4: Método de Wolf - Resnick para un caudal de 1000 l/s en el floculador 1	80
Figura 4.3-5: Índice de Morril para un caudal de 1000 l/s en el floculador 1.	82
Figura 4.4-1: Curva de dosis óptima de coagulante para un caudal de 1000 l/s.....	85
Figura 4.4-2: Gráfica semilogarítmica de la TURB inicial vs dosis óptima para un caudal de 1000 l/s.....	86
Figura 4.4-3: Curvas de dosificaciones del PC con SAGA y SAGB para un caudal de 1000 l/s.....	88
Figura 4.4-4: Gráficas de Q-Q plots. En el parte superior se encuentra la normalidad del coagulante y en la parte inferior del floculante con el coagulante para un caudal de 1000 l/s.....	90
Figura 4.4-5: Comparación de la eficiencia de remoción de TURB y CA para un caudal de 1000 l/s SA.....	95
Figura 4.4-6: Eficiencia del PC para un caudal de 1000 l/s.....	98
Figura 4.4-7: Comportamiento de los costos anuales del coagulante y floculante para los caudales trabajados.	100
Figura 7.1-1: Especificaciones del HQ40D Kit multímetro digital, electrodo pH gel y Conduct Std.....	113
Figura 7.1-2: Especificaciones del Medidor digital TDS (sólidos disueltos totales) para calidad de agua.....	113
Figura 7.1-3: Especificaciones del Molinete Global Water modelo FP211	114
Figura 7.1-4: Especificaciones del equipo de pruebas de jarras (ORBECO HELIGE modelo ET)	114
Figura 7.1-5: Especificaciones del colorímetro	115
Figura 7.1-6: Especificaciones del medidor de pH.....	115
Figura 7.1-7: Especificaciones de la balanza analítica Sartorius.....	116
Figura 7.1-8: Especificaciones del destilador – modelo AC-L4.7.....	116
Figura 7.1-9: Especificaciones del Hach 2100Q Portable Turbidity Meter Manual	117
Figura 7.3-1: Pérdida de carga - Floculador 2 (Corte frontal)	119
Figura 7.4-1: Kit multiparámetro para medir la conductividad.....	122
Figura 7.4-2: Equipo utilizado para medir sólidos disueltos totales.....	122
Figura 7.4-3: Equipo para medir el pH	122
Figura 7.4-4: Colorímetro para medir el color.....	122
Figura 7.4-5: Equipo utilizado para destilar el agua, ocupada para lavar los equipos..	122
Figura 7.4-6: Equipo utilizado para pesar el SAGA y SAGB	122
Figura 7.4-7: Equipo utilizado para medir la turbiedad.....	123
Figura 7.4-8: Equipo de pruebas de jarras - 4 paletas.....	123
Figura 7.4-9: Equipo de pruebas de jarras - 6 paletas.....	123
Figura 7.5-1: Mezcla de la Solución de cloruro de sodio en San Miguel de Potushi ...	123
Figura 7.5-2: Medición de parámetros fisicoquímicos en San Miguel de Potushi	123
Figura 7.5-3: Cloruro de sodio.....	123
Figura 7.5-4: Colocación de cloruro de sodio para pruebas de trazadores	124
Figura 7.5-5: Mezcla de la solución cloruro de sodio para pruebas de trazadores	124
Figura 7.5-6: Solución de cloruro de sodio en la PTAP	124



Figura 7.5-7: Envases utilizadas para pruebas de trazadores.....	124
Figura 7.5-8: Cloruro de sodio pesada para las pruebas de trazadores	124
Figura 7.5-9: Pesado del cloruro de sodio	124
Figura 7.5-10: Envases utilizados para el equipo de jarras.....	124
Figura 7.5-11: Balones de aforo para realizar las soluciones	124
Figura 7.5-12: Mortero para triturar el SAGA y SAGB	124
Figura 7.6-1: Hoja de seguridad del sulfato de aluminio, Grado 2, tipo B Grueso	125
Figura 7.6-2: Hoja de seguridad de sulfato de aluminio Grado 1 tipo A Grueso	126
Figura 7.6-3: Hoja de seguridad del polímero	127
Figura 7.8-1: Relación del gradiente de velocidad con las revoluciones por minuto de un equipo de prueba de jarras con recipiente de 1 litro	129
Figura 7.10-1 : Método de Wolf - Resnick para un caudal de 950 l/s en el floculador 1.	133
Figura 7.10-2: Método de Wolf - Resnick para un caudal de 800 l/s en el floculador 1.	133
Figura 7.10-3: Método de Wolf - Resnick para un caudal de 1000 l/s en el floculador 2.	134
Figura 7.10-4: Método de Wolf - Resnick para un caudal de 950 l/s en el floculador 2	134
Figura 7.10-5: Método de Wolf - Resnick para un caudal de 800 l/s en el floculador 2.	135
Figura 7.11-1: Tiempo de retención de la mezcla rápida.	135
Figura 7.11-2: Curva de tendencia para un caudal de 950 l/s en el floculador 1.....	136
Figura 7.11-3: Curva de tendencia para un caudal de 800 l/s en el floculador 1.....	136
Figura 7.11-4: Curva de tendencia para un caudal de 1000 l/s en el floculador 2.....	137
Figura 7.11-5: Curva de tendencia para un caudal de 950 l/s en el floculador 2.....	137
Figura 7.11-6: Curva de tendencia para un caudal de 800 l/s en el floculador 2.....	138
Figura 7.12-1: Índice de Morril para un caudal de 950 l/s en el floculador 1	138
Figura 7.12-2: Índice de Morril para un caudal de 800 l/s en el floculador 1	139
Figura 7.12-3: Índice de Morril para un caudal de 1000 l/s en el floculador 2	139
Figura 7.12-4: Índice de Morril para un caudal de 950 l/s en el floculador 2	140
Figura 7.12-5: Índice de Morril para un caudal de 800 l/s en el floculador 2	140
Figura 7.15-1: TURB inicial vs dosis óptima para un caudal de 950 l/s	157
Figura 7.15-2: Gráfica semilogarítmica de la TURB inicial vs dosis óptima para un caudal de 950 l/s.....	158
Figura 7.15-3: TURB inicial vs dosis óptima para un caudal de 800 l/s	159
Figura 7.15-4: Gráfica semilogarítmica de la TURB inicial vs dosis óptima para un caudal de 800 l/s.....	160
Figura 7.16-1: Gráficas de Q-Q plots. En el parte superior se encuentra la normalidad del coagulante y en la parte inferior del floculante con el coagulante para un caudal de 950 l/s.....	161
Figura 7.16-2: Gráficas de Q-Q plots. En el parte superior se encuentra la normalidad del coagulante y en la parte inferior del floculante con el coagulante para un caudal de 800 l/s.....	162



Figura 7.17-1: Curvas de dosificaciones con los dos coagulantes y el empleado en la PTAP para un caudal de 950 l/s.....	163
Figura 7.17-2: Curvas de dosificaciones con los dos coagulantes y el empleado en la PTAP para un caudal de 800 l/s.....	163
Figura 7.18-1: Comportamiento de la eficiencia de TURB, CA y pH para un caudal de 950 l/s del SA.....	164
Figura 7.18-2: Comportamiento de la eficiencia de TURB, CA y pH para un caudal de 800 l/s del SA.....	165
Figura 7.18-3: Eficiencia del polímero para un caudal de 950 l/s	166
Figura 7.18-4: Eficiencia del polímero para un caudal de 800 l/s	167

TABLAS

Tabla 3.2-1: Relación de Temperatura	42
Tabla 4.1-1: Resultados de la curva de calibración de SDT	64
Tabla 4.2-1: Dimensiones del canal rectangular con cambio de pendiente.....	66
Tabla 4.3-1: Dimensiones de los floculadores 1 y 2.....	70
Tabla 4.3-2: Resumen del número de pantallas y compartimentos	71
Tabla 4.3-3: Resultados del cálculo del número de compartimentos y pantallas	71
Tabla 4.3-4: Resultados de los métodos utilizados para determinar el caudal en cada floculador	73
Tabla 4.3-5: Resumen pruebas de trazadores floculadores 1 y floculador 2	74
Tabla 4.3-6: Resultados de tiempo de retención teórico para los caudales trabajados... ..	75
Tabla 4.3-7: Perdida de carga y gradiente de velocidad con los caudales de 1000, 950 y 800 l/s.....	76
Tabla 4.3-8: Resultados de los parámetros para la curva de distribución de los tiempos de retención hidráulica.....	78
Tabla 4.3-9: Resultados de los criterios para analizar la curva de tendencia para un caudal de 1000 l/s.....	79
Tabla 4.3-10: Resultados del método de Wolf -Resnick	81
Tabla 4.3-11: Resultados del índice de Morrill	83
Tabla 4.4-1: Condiciones de calibración del equipo.....	83
Tabla 4.4-2: Resultados de la prueba Shapiro-Wilk.....	89
Tabla 4.4-3: Resultados de la prueba de Fligner – Killeen.....	91
Tabla 4.4-4: Resultados de la prueba de t-student	92
Tabla 7.2-1: Resultados de los Parámetros iniciales en las pruebas de jarras para un caudal de 1000 l/s.....	117
Tabla 7.2-2: Resultados de los Parámetros iniciales en las pruebas de jarras para un caudal de 950 l/s.....	117
Tabla 7.2-3: Resultados de los Parámetros iniciales en las pruebas de jarras para un caudal de 800 l/s.....	118
Tabla 7.2-4 : Resultados de los Parámetros iniciales en las pruebas de jarras para un caudal de 1000 l/s	118



Tabla 7.2-5: Resultados de los Parámetros iniciales en las pruebas de jarras para un caudal de 950 l/s.....	118
Tabla 7.2-6 : Resultados de los Parámetros iniciales en las pruebas de jarras para un caudal de 800 l/s	118
Tabla 7.3-1: Resultados de los cálculos en la intensidad de floculación para un caudal de 1000 l/s.....	119
Tabla 7.3-2 : Resultados de los cálculos en la intensidad de floculación para un caudal de 950 l/s.....	119
Tabla 7.3-3: Resultados de los cálculos en la intensidad de floculación para un caudal de 800 l/s.....	120
Tabla 7.3-4: Resultados de los cálculos en la intensidad de floculación para un caudal de 1000 l/s.....	120
Tabla 7.3-5: Resultados de los cálculos en la intensidad de floculación para un caudal de 950 l/s.....	121
Tabla 7.3-6 : Resultados de los cálculos en la intensidad de floculación para un caudal de 800 l/s.....	121
Tabla 7.7-1: Resumen de los caudales registrados en los canales internos y canal de conducción	128
Tabla 7.9-1: Dosis óptima para un caudal de 1000 l/s- SAGB.....	130
Tabla 7.9-2: Calor aparente óptimo para un caudal de 1000 l/s- SAGB	131
Tabla 7.9-3 : pH óptimo para un caudal de 1000 l/s- SAGB.....	132
Tabla 7.13-1: Resultados de las pruebas de trazadores con un caudal de 1000 l/s en el floculador 1.....	141
Tabla 7.13-2: Resultados de las pruebas de trazadores con un caudal de 950 l/s en el floculador 1.....	142
Tabla 7.13-3: Resultados de las pruebas de trazadores con un caudal de 800 l/s en el floculador 1.....	143
Tabla 7.13-4: Resultados de las pruebas de trazadores con un caudal de 1000 l/s en el floculador 2.....	144
Tabla 7.13-5: Resultados de las pruebas de trazadores con un caudal de 950 l/s en el floculador 2.....	146
Tabla 7.13-6: Resultados de las pruebas de trazadores con un caudal de 800 l/s en el floculador 2.....	148
Tabla 7.14-1: Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 1000 l/s – SAGB.....	149
Tabla 7.14-2: Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 1000 l/s – SAGA.....	150
Tabla 7.14-3: Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 950 l/s- SAGB	151
Tabla 7.14-4: Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 950 l/s – SAGA.....	151
Tabla 7.14-5: Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 800 l/s- SAGB	152



Tabla 7.14-6: Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 800 l/s- SAGA.....	152
Tabla 7.14-7: Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 1000 l/s - SAGB del polímero.	153
Tabla 7.14-8: Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 1000 l/s – SAGA del polímero	154
Tabla 7.14-9: Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 950 l/s - SAGB del polímero.	154
Tabla 7.14-10 : Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 950 l/s – SAGA del polímero	155
Tabla 7.14-11: Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 800 l/s - SAGB del polímero.	155
Tabla 7.14-12: Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 800 l/s – SAGA del polímero.	156

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Freddy Adrián Criollo Illescas en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación de los procesos de coagulación y floculación en la Planta de Tratamiento de Agua Potable de El Cebollar", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGANICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 21 de octubre de 20

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Freddy A. Criollo Illescas", written over a horizontal line.

Freddy Adrián Criollo Illescas

C.I: 0105347561

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Viviana Elizabeth Lara Delgado en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación de los procesos de coagulación y floculación en la Planta de Tratamiento de Agua Potable de El Cebollar", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 21 de octubre de 2020



Viviana Elizabeth Lara Delgado

C.I: 0604461384

Cláusula de Propiedad Intelectual

Freeddy Adrián Criollo Illescas, autor del trabajo de titulación “Evaluación de los procesos de coagulación y floculación en la Planta de Tratamiento de Agua Potable de El Cebollar”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 21 de octubre de 2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Freddy Criollo Illescas", written over a horizontal line.

Freddy Adrián Criollo Illescas

C.I: 0105347561

Cláusula de Propiedad Intelectual

Viviana Elizabeth Lara Delgado, autora del trabajo de titulación “Evaluación de los procesos de coagulación y floculación en la Planta de Tratamiento de Agua Potable de El Cebollar”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 21 de octubre de 2020

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser la de Viviana Elizabeth Lara Delgado, con un nombre que se repite varias veces.

Viviana Elizabeth Lara Delgado

C.I: 0604461384



AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a Dios por la fuerza y sabiduría que nos impartió para completar el trabajo de titulación.

Agradecemos a nuestros padres que nos apoyaron en todo este tiempo de manera incondicional y siempre estuvieron presentes en las dificultades.

Además, a la Universidad de Cuenca, a cada una de las personas que conforman la Facultad de Ciencias Químicas por los valores impartidos dentro y fuera de las aulas.

Expresamos nuestra gratitud de manera especial al Ing. Fernando García por el apoyo, compromiso, dirección y aporte de conocimiento para culminar este trabajo de titulación. Siempre estuvo dispuesto apoyarnos en las dudas y problemas al realizar este proyecto.

Freddy C.

Viviana L.



DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres y hermanos, a pesar de las circunstancias duras nunca dejaron de apoyarme para terminar la universidad. Sobre todo, a mi madre Lastenia, que fue inefable la paciencia en todos estos años de estudio.

Freeddy C.

“Todo lo puedo en Cristo que me fortalece”

Filipenses 4:13

Quiero dedicar el trabajo de titulación a mis padres Nancy Delgado y Omar Lara por su apoyo incondicional en cada momento del camino a mis hermanos Katherine, Isabel y Lenin por estar siempre dispuestos a ayudar y a escuchar cada dificultad presentada. Quienes han sido y serán indispensables para mi formación personal, académica y profesional.

Viviana L.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El tema ambiental relacionado con el agua tomó fuerza a partir de los años 60; y para el siglo XXI es uno de los desafíos que más sobresale en los temas relacionados con salud pública y calidad de vida. A nivel mundial el 45% de la población no tiene acceso directo al agua potable, pero no solo tiene que ver con la potabilización existente, sino también con una potabilización eficaz, pues alrededor de dos mil quinientos millones de personas no cuentan con una potabilización óptima (Américo, 2013).

El agua es considerado como uno de los recursos renovable más fundamental para cualquier forma de vida, sin embargo, el alto crecimiento poblacional, avance de la fronteras agrícolas y los contaminantes emergentes hacen cada día más difícil la potabilización del agua (Pérez et al., 2006).

El agua superficial es contaminada principalmente por residuos domésticos e industriales, estas descargas alteran fuentes naturales que al llegar a las captaciones para la potabilización del agua resultan muy costosas y difíciles de tratar. Las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) involucran varios procesos en la potabilización, el cual depende directamente de la contaminación del agua captada. Estos procesos son controlados para obtener condiciones de consumo óptimas y cumplir con los estándares sanitarios del país, debido a las altas cargas de contaminantes químicos, físicos y biológicos (Gómez Anaya et al., 2017).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), se debe consumir alrededor de los 100 litros por persona al día, para cumplir con las necesidades básicas (Howard, 2003). De acuerdo la Empresa Pública de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA EP), cada persona consume alrededor de 220 litros de agua diarios. Por ello, es necesario un tratamiento más rápido y óptimo para abastecer las necesidades, evitando desperdicios al potabilizarla.

La ciudad de Cuenca tiene alrededor de 174 proyectos de agua potable tanto en la zona urbana como en la rural. Los principales suministros de agua potable en la zona urbana son: La PTAP “El Cebollar” ubicada en la zona Noreste de la ciudad, la PTAP “Tixán” ubicada en la parroquia de Chiquintad, la PTAP de “Culebrillas” ubicada en la zona



Noroccidente de la ciudad y la PTAP de “Sustag” ubicada en la parroquia de San Joaquín. Actualmente, entre las cuatro Plantas de Potabilización tienen la capacidad de producir 3290 litros por segundo, y solo la PTAP “ El Cebollar” produce alrededor de 1000 l/s, es decir alrededor del 30 % del consumo total de agua en el caso urbano de Cuenca (Ávila, 2013).

1.2 PROBLEMÁTICA

En la actualidad, dar un buen tratamiento de potabilización al agua cruda es esencial para el consumo humano, para esto las plantas de tratamiento tipo convencional utilizan varios procesos físicos como químicos, que ayudan a eliminar los posibles agentes nocivos del agua. Dentro de los físicos, tenemos: el proceso de filtración y sedimentación; y como químicos tenemos: los procesos de coagulación, desinfección y floculación. Estos procesos anteriores si no son manejados adecuadamente con procedimientos técnicos de operación correctos generan un efecto contrario para los cuales fueron diseñados. Es así que un funcionamiento óptimo se garantiza por medio de evaluaciones de eficiencia permitiendo una conservación del recurso agua y suministrando de forma continua a la población (Gologan & Popescu, 2016).

La coagulación sirve para la coalescencia del material sedimentable, debido a la reducción de las fuerzas de repulsión de los coloides. Por otro lado, la floculación permite que las partículas se acumulen para formar flóculos que facilitan su eliminación por procesos como la sedimentación y filtración (Aguilar et al., 2002). La coagulación así como la floculación son considerados como parte elemental para la potabilización del agua, por ello es indispensable tener una dosificación adecuada en estos procesos (Ebeling et al., 2003). Esta importancia se debe a la generación de flóculos, si estos son pequeños, ligeros y frágiles no se podrá tener una buena sedimentación. Consecuentemente, los flóculos pueden pasar los filtros y alterar la calidad del líquido vital, perjudicando negativamente a los consumidores. Además, los filtros necesitarían un mantenimiento continuo generando pérdidas económicas a la empresa y disminuyendo el rendimiento del tratamiento en general.

En una Planta de Potabilización existe un monitoreo de pH solo por motivos logísticos, sin embargo, es un factor muy significativo, porque esta correlacionado directamente con la eficiencia en la remoción de flóculos. La alteración de la solubilidad de compuestos de hierro o de aluminio, la sobredosificación de químicos y la variación del tiempo de formación de flocs, surgen como efectos al no considerarse un pH adecuado. Además, no



existe un control interno en la planta para la regulación de los valores de pH, el cual rodea de 6.5 a 8 (Vargas, 2004b).

Otro de los factores influyentes en la aplicación de coagulante y floculante son los caudales de ingreso para el tratamiento. Por ello, los medios y aparatos de medición de los caudales en la Planta de Tratamiento deben estar funcionando adecuadamente. Si los equipos no están calibrados y verificados, existe una gran posibilidad de una dosificación ineficiente de químicos, generando que los flóculos no precipiten al contrario floten provocando espumas en algunas zonas de las unidades donde se realiza la sedimentación y floculación (Castrillón & Pascual, 2003).

En la PTAP “El Cebollar” fue realizado este caso de estudio, que tiene una capacidad para suministrar 1000 l/s y abastece a más del 30 % de las personas que viven en la zona urbana. Durante los últimos 16 años no se ha realizado una evaluación de los procesos coagulación y floculación que permita establecer las condiciones hidráulicas y dosis óptima de químicos.

Aguas arriba de la captación, el uso de suelo y ecosistemas han cambiado con los años, lo que provoca una alteración en las propiedades fisicoquímicos del agua cruda. La deforestación, pastoreo de ganado vacuno y actividad agrícola, contaminan el agua, ocasionando mayor dificultad en tratarla para consumo humano (Chulluncuy, 2011)

La elaboración de nuevas curvas de dosificación de químicos fue urgente para asegurar un proceso de potabilización óptimo. Además, las propiedades más representativas que influyen para elaborar las curvas de dosificación de coagulante y floculante son: TURB, CA y pH; estos parámetros permitieron determinar las dosis óptimas para la potabilización del agua en la PTAP “El Cebollar” (Ávila, 2013).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Evaluar los procesos de coagulación y floculación, con el fin de optimizar la dosis de sulfato de aluminio y polielectrolito en la Planta de Tratamiento de Agua Potable “El Cebollar”

1.3.2 Objetivos Específicos

- Evaluar las características hidráulicas existentes en las unidades de floculación y coagulación.



- Determinar la dosis óptima de sulfato de aluminio granular tipo A, tipo B y polielectrolito por medio de ensayos de jarras.
- Realizar curvas de dosificación de coagulante y floculante con los resultados de los ensayos de jarras.
- Analizar la eficiencia entre el sulfato de aluminio granular tipo A, tipo B y polielectrolito.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Las características como el tamaño, densidad, estructura y resistencia de los flóculos son importantes para determinar la concentración y dosis correcta de los productos químicos a ser administrada. Una sobredosificación generaría ineficiencias en los procesos y pérdidas económicas, también causaría que el mantenimiento sea más continuo (Jiang, 2015). El desarrollo de este tema permitirá obtener una dosificación óptima de SA y PC. También, ahorraría gastos innecesarios en la PTAP por la compra de químicos y retro lavado de filtros. Se incluye además que, evaluando los procesos se determinará actividades innecesarias o se reducirá la frecuencia de la limpieza del sedimentador y floculador (Barajas & León, 2015).

El uso eficiente de los procesos representa un enfoque prioritario para los productores de agua, además forma parte de una estrategia necesaria para la protección de elementos contaminantes y patógenos. En contraste, un análisis de los procesos operativos, curva para la dosificación de químicos, condiciones hidráulicas y mecánicas, permiten que la incertidumbre operativa se reduzca, así como los riesgos ambientales, toxicológicos y salubres (Gologan & Popescu, 2016).

Las PTAP tienen una importancia significativa en la sociedad, de tal manera que la gestión del líquido vital es indispensable en las políticas públicas y privadas. Por ello, es necesario un manejo eficiente de las PTAP en donde sus procesos pueden ser controlados y evaluados de forma continua. Una optimización de los procesos de potabilización, evitará que la salud pública esté en riesgo y garantizará una mejor calidad de vida a la población cuencana (Gologan & Popescu, 2016).



CAPÍTULO II : MARCO TEÓRICO

2.1 AGUA POTABLE

El agua es conocida como el disolvente universal, porque tiene la capacidad de diluir la mayoría de sustancias que se encuentran en el mundo, se puede encontrar en tres estados (líquido, sólido y gaseoso). Es considerado como un líquido vital para todos los organismos vivos, debido a que actúa en los procesos bioquímicos que tienen lugar en la naturaleza, además de ayudar al organismo a eliminar toxinas y mantenerse hidratado (Vargas, 2004b).

Para la potabilización del agua debe existir un sistema con obras que permitan una captación, conducción, tratamiento, almacenamiento y finalmente la distribución. El producto del proceso antes mencionado, es el agua potable, que llega hasta la acometida domiciliaria. Por ello es indispensable realizar un muestreo para medir parámetros durante y después del tratamiento que se emplea en el agua. Estos parámetros determinan si el agua potable es apta para el consumo humano y constituye una barrera preventiva fundamental en la salud pública basada en el requisito del límite máximo permitido de las normas.

A nivel nacional la siguiente norma es aplicable en los sistemas de abastecimientos públicos y privados que permite estandarizar varios requisitos indispensables para mantener la calidad de agua óptima. La Norma Técnica Ecuatoriana 1108 (INEN, 2011) establece que el agua potable debe cumplir el límite máximo permitido de varios requisitos específicos como: características físicas, inorgánicos, orgánicos y requisitos microbiológicos (máximo). En esta norma se describe el límite máximo permitido de las características físicas del agua potabilizada para el consumo humano en: turbiedad (TURB) 5 NTU, color aparente (CA) 15 UPC, olor y sabor no objetable.

2.2 PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL AGUA

A continuación, se presenta las propiedades más importantes que se deben considerar para evaluar el tratamiento del agua:

Propiedades físicas

- a) **Turbiedad:** Se refiere a una propiedad visual que causa una obstrucción de los rayos lumínicos por el agua, la TURB en cuerpos de agua es ocasionada por partículas de varios tamaños entre los cuales están: residuos orgánicos e



inorgánicos, limos, arcillas, microorganismos entre otros (Romero, 2005a). La TURB podría considerarse como una de las principales propiedades para el abastecimiento público de agua potable, por ello se debe considerar tres razones esenciales: A) estético, porque el agua turbia es indicativo de contaminación, B) económico, debido a que si aumenta la TURB el costo de tratamiento aumenta, y C) desinfección, para que sea efectivo el químico tiene que tener contacto con los agentes patógenos (Sawyer et al., 2001).

- b) Color:** Es otra propiedad física óptica que es causada comúnmente por compuestos de hierro, magnesio y desechos orgánicos (Sawyer et al., 2001). El color del agua se divide en: el color verdadero (CV), es aquella agua que se ha eliminado la turbiedad; y el CA, el cual incluye las sustancias coloidales, es decir el estado del agua incluida la TURB (Romero, 2005a).
- c) pH:** Es definido como una expresión matemática que representa la actividad (concentración efectiva) de los iones H^+ . Así mismo, para el tratamiento en las unidades de coagulación, desinfección y almacenamiento, se tiene que realizar mediciones permanentes, pues existe un pH óptimo en estos procesos de 6.5 a 8. (Sawyer et al., 2001).
- d) Temperatura:** Esta propiedad desempeña un papel esencial, porque influye en la actividad microbiana y su desarrollo, debido a que las bacterias se proliferan más rápido en temperaturas altas. Además, la temperatura influye en las reacciones entre el agua y los químicos utilizados para potabilizar agua cruda (Vargas, 2004b).
- e) Conductividad:** Es una propiedad muy usada en estudios que analizan agua, porque da un valor aproximado de los sólidos disueltos. La conductividad es la capacidad que adquiere el agua para transportar electricidad, por medio de los elementos disueltos ionizados y de la variación de temperatura (Romero, 2005a).

Propiedades químicas

- a) Alcalinidad:** Es un parámetro químico de la capacidad para neutralizar los ácidos, reaccionar con los iones hidrogeno y aceptar protones. Esta propiedad se debe esencialmente a la presencia de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos. Además, es un parámetro fundamental en el desarrollo de la coagulación para que las sustancias coagulantes formen hidróxidos insolubles (Romero, 2005b).



- b) Acidez:** Es la capacidad para reaccionar con iones hidróxidos y para ceder protones. Las aguas ácidas son extremadamente corrosivas, por eso su importancia en la potabilización de agua. En las fuentes naturales de agua la acidez se da por encontrarse con elementos de dióxido de carbono (CO_2) (Romero, 2005b).

2.3 COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN

Los procesos de coagulación – floculación son esenciales para el tratamiento de agua, por lo que tienen que ser controlados periódicamente, de estos dependerá la eficiencia en los procesos posteriores (sedimentación y filtración). Dentro del proceso de coagulación tiene lugar la mezcla rápida, aquí se añaden los coagulantes con el fin de desestabilizar las partículas coloidales, es importante la dosis que se aplique y la concentración. La floculación se realiza en las unidades de floculación y básicamente consiste en que las partículas removidas chocan unas con otras aglomerándose formando los flocs (Irfan et al., 2017).

2.3.1 Coagulación

En el proceso de coagulación intervienen reacciones y transferencias de masa. Además, consta de tres pasos: adición de coagulante, desestabilización de la partícula e interacción de materia orgánica natural y coagulante (American Water Works Association, 2002).

2.3.2 Estabilidad coloidal

Los coloides son partículas muy pequeñas (1 y 10 nm) que solo se sedimentan por acción de la coagulación-floculación y sedimentación. Los coloides desafían la ley de la gravedad gracias a dos propiedades: movimiento browniano y área superficial extremadamente grande, según su afinidad se clasifican en hidrofóbicos e hidrofílicos (Romero, 2005c).

Los coloides hidrofílicos se llaman también coloides reversibles, porque reaccionan con el agua, lo cual permite que los coloides se deshidraten y formen material orgánico, estos pueden ser removidos más fácilmente debido a la acción de la coagulación. Los coloides hidrofóbicos son llamados irreversibles, porque no reaccionan con el agua y para ser removidos se utilizan procesos físicos, además la estabilidad se debe a un fenómeno eléctrico (Romero, 2005c).

Existen dos fuerzas que intervienen para que los coloides se estabilicen: la primera, es de Van der Waals o conocida como fuerza de atracción que en las partículas es causada por la interacción de dipolos; y la segunda, la fuerza electrostática (fuerza repulsora) (Fair, 2002). Cabe recalcar que los coloides están rodeados por una doble capa, donde la interior está cargada negativamente y la exterior cargada positivamente. La teoría de doble capa sirve para explicar la estabilidad de los coloides, cuyo valor está dado por el potencial zeta (Lorenzo, 2006).

El Potencial Zeta es el potencial eléctrico que existe entre el plano deslizante en la envoltura del agua y la masa de la partícula (Romero, 2005c). La Ecuación de Helmholtz específica al potencial zeta, se presenta como:

$$L = \frac{4\pi Sq}{D} \quad \text{Ecuación 2.3-1: Potencial Zeta}$$

Dónde:

L: Potencial Zeta (mV)

S: Espesor donde influye la carga sobre la partícula

q: Carga sobre la partícula

D: Constante dieléctrica del líquido

En la Figura 2.3-1 se presenta el funcionamiento teórico de la doble capa. Además, se presenta la organización de las cargas que permiten la estabilización de las partículas coloidales.

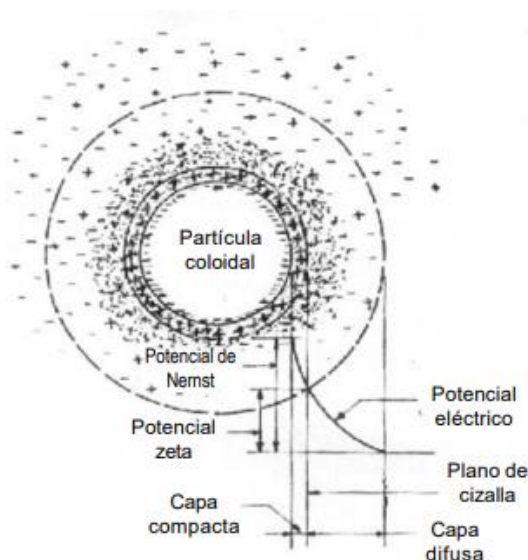


Figura 2.3-1: Potencial Zeta.

Fuente: (Vargas, 2004c).



En la coagulación, cuando existe un Potencial Zeta de cero, se debe a que la partícula no se mueve hacia el cátodo o ánodo (coagulación ineficiente), por otra parte la coagulación es efectiva cuando el Potencial Zeta está muy alejado del cero (Fair, 2002).

Para que la floculación sea eficiente, sucede lo contrario a la coagulación, el Potencial Zeta debe tener un valor de cero (0), esto favorece al desequilibrio de fuerzas y permiten que las partículas no permanezcan en la superficie, cuando esto ocurre se llama Punto isoelectrónico (Lorenzo, 2006).

Para lograr que se aglomeren las partículas de forma óptima es necesario que las fuerzas electrostáticas sean menos intensas que las de Van der Waals, esto permite formar agrupaciones de coloides que se pueden sedimentar fácilmente por la fuerza de gravedad (Vargas, 2004c).

2.3.3 Factores que afectan al proceso de coagulación

Entre los factores que afectan al proceso de coagulación según Punmia et al., (2016) tenemos los siguientes:

- Cantidad o dosis de coagulante.
- Características del agua: temperatura, pH, tipo y cantidad de materia suspendida.
- Tiempo, velocidad y método de mezcla.
- Condiciones físicas de mezcla: tipo de vertedero o canal y resalto hidráulico.

2.3.4 Tipos de coagulantes

Los coagulantes más comunes que se utilizan en la clarificación del agua son: sulfato ferroso, sulfato férrico, cal, carbonato de magnesio, cloruro férrico, polielectrolitos, y sulfato de aluminio (Dar Lin, 2007).

El alumbre o SA es la sal ácida más utilizada en la potabilización del agua, esto se debe a su fácil uso y bajo costo. La velocidad de reacción en la floculación y la coagulación varía dependiendo de la naturaleza y los precipitados disueltos en el agua. En varios casos acidifica el agua, al cual posteriormente puede regularse con cal, y puede también generar dureza. Su sobredosificación puede provocar pos precipitado causando una TURB mayor (Dar Lin, 2007).

El SA tiene una masa molecular aproximada de 600 (Romero, 2005c). El alumbre se disocia con el agua en Al^{3+} y SO_4^{2-} . El Al^{3+} se combina con el coloide negativo neutralizando la carga o puede combinarse con el OH^- , formando hidróxido de aluminio

de carácter coloidal que permite una aglomeración de las partículas. Además, el Al^{3+} permite una distribución rápida y equitativa del coagulante en el volumen del agua.

Los problemas que se generan si no se dosifica bien este coagulante, es la corrosión excesiva en tuberías de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP). También reduce la dureza del agua pues el calcio se convierte en sulfato de calcio, normalmente la dosis varía entre 5 a 50 mg/l y el pH efectivo en la coagulación va de 5.5 a 8 (Romero, 2005c).

2.3.5 Mecanismo de Coagulación

Al utilizar compuestos inorgánicos en la unidad de coagulación, se desarrollan dos mecanismos importantes:

Coagulación por adsorción: En la Figura 2.3-2 se puede observar la neutralización de carga que consiste en formar especies solubles hidrolizadas. Al ser administrado el coagulante en el agua se forman compuestos como: $\text{Al}(\text{OH})_4$, Al^{3+} y $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, desestabilizando las partículas y facilitando la aglomeración de flóculos (Vargas, 2004c). Esta desestabilización se produce cuando el agua cruda es muy turbia, además, la reacción puede llegar a un tiempo máximo de hasta 1 segundo.

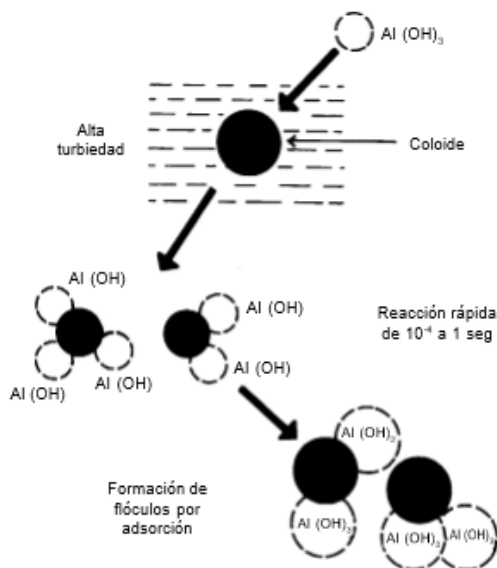


Figura 2.3-2: Coagulación por adsorción.
Fuente: (Vargas, 2004c).

Coagulación por barrido: La velocidad de reacción es lenta, puede tardar entre 1-7 segundos, esto se debe a la calidad del agua (baja turbiedad). Cuando el coagulante es administrado al agua, esta reacciona y se forman compuestos de hidróxido de aluminio para adherirse al coloide y arrastrarlo (Vargas, 2004c). En la Figura 2.3-3 se puede observar con más detalle el proceso de coagulación por barrido.

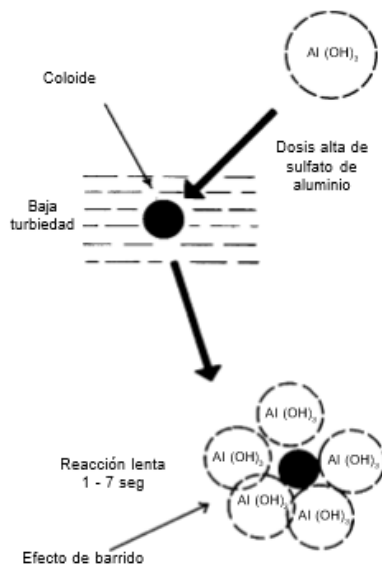


Figura 2.3-3: Coagulación por barrido.
Fuente: (Vargas, 2004c).

2.3.6 Floculación

La floculación sirve específicamente para ayudar a la coagulación (Romero, 2006a). A continuación, se enumera algunas acciones del floculante:

1. Forma flóculos más fuertes y grandes que facilitan la sedimentación.
2. Minimiza las fluctuaciones de temperatura que retarda la coagulación.
3. Reduce la dosificación del coagulante.
4. Disminuye la generación de lodos.

2.3.7 Factores que intervienen

- Naturaleza del agua, debido a que afecta a los hidroxilos en las cadenas poliméricas, produciendo un desequilibrio del sistema en la sección fisicoquímico (Vargas, 2004e).
- Tiempo de floculación, porque si el proceso se retrasa o se adelanta baja su eficiencia. Por eso es necesario tomar todas las precauciones antes de diseñar una PTAP y después de la construcción mantener estas condiciones (Vargas, 2004e).
- Gradiente de velocidad, porque cuanto mayor sea el gradiente mayor será la rapidez de acumulación de las partículas. De forma general, es recomendado que el gradiente de velocidad esté entre los valores de 20 a 100 s^{-1} (Vargas, 2004e).
- Caudal operativo, porque al aumentar o reducir el caudal lo hace también la dosificación óptima del floculante y el tiempo que el agua se retiene en la floculación. En los floculadores hidráulicos, al reducir el caudal operativo el



tiempo de retención se incrementa y consecuentemente el gradiente de velocidad disminuye, por el contrario, cuando se incrementa el caudal también se va incrementando paulatinamente el gradiente de velocidad, pero disminuye el tiempo de retención (Vargas, 2004e).

2.3.8 Clasificación de los floculantes

Existe una variedad de ayudantes de coagulación, pero los más utilizados son: sílice activada, agentes lastradores y polielectrolitos.

El ayudante de coagulación polielectrolito, es un compuesto sintético que se clasifican en aniónicos, no iónicos, y catiónicos, cada uno se utiliza en función de las propiedades que presenta el agua cruda. Los polielectrolitos no iónicos producen iones negativos y positivos, cuando se utiliza este floculante, las dosis son altas en relación a otros floculadores, esta dosis rodea un rango de 1 a 10 mg/l (Romero, 2006a).

Los polielectrolitos catiónicos se utilizan comúnmente en potabilización de fuentes con aguas naturales, debido que al disolverse producen iones de carga positiva. Además, el PC se utiliza con el SA o sulfato férrico, por su efectividad. Por otro lado, los polielectrolitos aniónicos al disolverse producen iones de carga negativa, y se usan para remover sólidos de carga positiva. Es común el uso de los polielectrolitos aniónicos junto a coagulantes que contengan hierro. Para los dos tipos de polielectrolitos, las dosis van desde 0,01 a 1 mg/l (Romero, 2006a)

2.3.9 Mecanismo de floculación

Después de la desestabilización de las partículas coloidales en las unidades de coagulación, empieza el proceso donde actúa el floculante. La floculación se da de forma secuencial iniciando: primero, con la fase pericinética se da por el movimiento browniano, donde las partículas más pequeñas comiencen a aglutinarse dando como resultado el microflóculo inicial. Segundo, cuando las partículas se han acumulado empieza la floculación ortocinética, que consiste en desarrollar el microflóculo más estable. Finalmente, se da la sedimentación diferencial la cual se fundamenta en la aglutinación y precipitación de las partículas grandes junto a las partículas pequeñas que se encuentran suspendidas (Vargas, 2004e).



2.4 ENSAYO DE JARRAS

Esta prueba simula varios procesos de las PTAP a una escala menor, parecido a lo de un laboratorio (Lorenzo, 2006). Además, es un método técnico, que permite realizar comparaciones entre diferente dosis de químicos como el SA y PC.

El equipo, que realiza este ensayo, es un agitador mecánico con velocidades que van desde los 0 hasta 400 rpm (Vargas, 2004d). Contiene normalmente: cuatro o seis paletas que trabajan al mismo tiempo, un iluminador de flóculos localizado en la base del agitador y vasos de cristal o de plástico de 1000 o 2000 ml con boca ancha (Nalco et al., 1982). La variación de las jarras, paletas y rpm del equipo nos ayuda para comparar varias combinaciones en la dosificación de insumos químicos que están condicionadas a las características hidráulicas de las PTAP. Según Romero (2005c), este ensayo también sirve para determinar: los niveles de mezcla adecuados, tiempos de mezcla, pH óptimo, las dosis óptimas de floculante y de coagulante.

CAPÍTULO III : METODOLOGÍA

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) “El Cebollar” está ubicada al noreste de la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay a 2560 msnm, como se puede visualizar en la Figura 3.1-1. La construcción de la PTAP inició en 1949, con el pasar de los años fue ampliada dos veces: la primera, en 1971 con un caudal operativo de 556 l/s y la segunda, en 1993 con un caudal operativo de 1000 l/s. La captación se origina en las cuencas de los ríos Tomebamba y Sayausí; la captación del primer río tiene la capacidad aproximada de 800 l/s y la captación del río Sayausí abarca un caudal de alrededor de 427 l/s (Ávila, 2013).

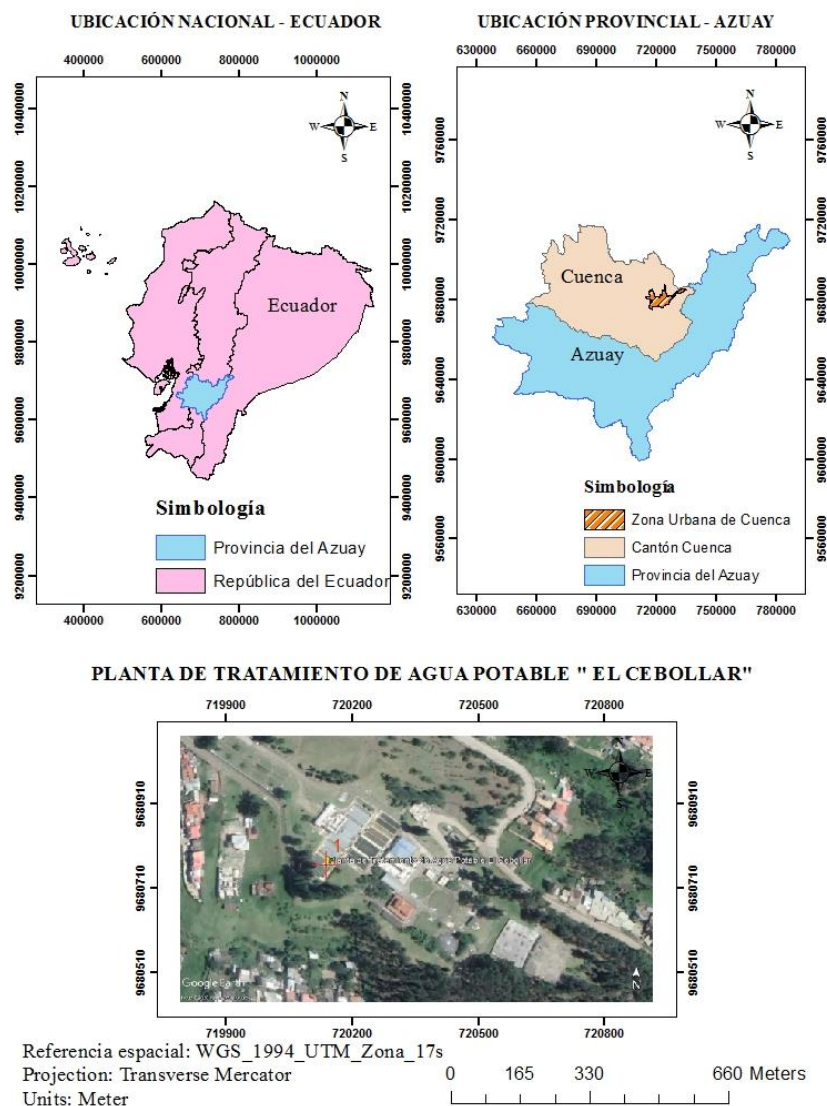


Figura 3.1-1: Ubicación de la Planta de Tratamiento de Agua “El Cebollar”.
 Elaboración: Criollo & Lara (2020).

3.1.1 Descripción de los procesos que se realizan en la PTAP

Dentro del proceso de la clarificación del agua, se engloba varios procesos físicos y químicos. En los procesos físicos tenemos cribado, aireación, sedimentación, y filtración. Mientras que en los procesos químicos se incluyen coagulación, floculación y desinfección (Fair, 2002). En el Diagrama 3.1-1 se aprecia las etapas de potabilización usadas en la PTAP.

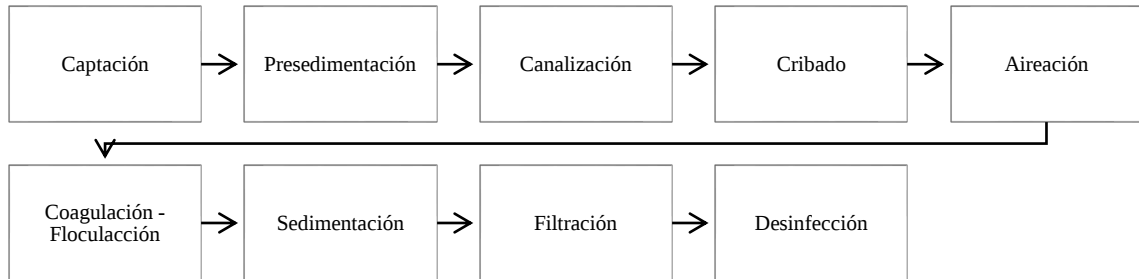


Diagrama 3.1-1: Proceso de tratamiento en la PTAP “El Cebollar”.
Elaboración: Criollo & Lara (2020).

El canal cerrado de conducción empieza en los presedimentadores hasta llegar a la PTAP con una longitud de 7,2 Km, el canal es de hormigón rectangular con tapas de piedras en algunos tramos y cemento en otros. Al final del canal se encuentra el vertedero lateral que permite el rebose de excesos por medio de dos compuertas: la primera, controla el ingreso del caudal de agua cruda para ser utilizada en otras actividades, y la segunda, es una compuerta con motor que controla el ingreso del caudal de agua cruda para la potabilización.

Al ingreso del agua cruda a la PTAP se encuentra una estación de medición de caudal donde se encuentran los caudalímetros (medidores ultrasónicos) posteriormente, el agua es conducida por medio de dos canales Parshall hacia la estación de dosificación de coagulación. La estación de dosificación es de dos plantas: en la planta superior se encuentran las bodegas de almacenamiento de SAGB, PC y dos tolvas del coagulante. En la planta inferior se encuentran dos dosificadores gravimétricos para la dosificación de SAGB y dos tanques de dosificación de PC. La unidad de mezcla rápida se ubica justo a la salida de la estación de dosificación del coagulante. El SAGB se administra en el resalto hidráulico del canal rectangular con cambio de pendiente por medio de una tubería tipo flauta de PVC (200 mm).

Después de la mezcla rápida, continua un canal central donde en la parte media se encuentra una pantalla de concreto que divide en el canal secundario izquierdo y derecho.

El canal izquierdo permite el ingreso de agua en los floculadores 1 y 2, el ingreso del caudal a los floculadores se regula por medio de compuertas. El canal derecho suministra agua para los demás floculadores, las compuertas están distribuidas de la siguiente manera: la primera compuerta, está ubicada al inicio del floculador 3; la segunda compuerta en el canal que conduce el agua al floculador 4 y 5; y la tercera compuerta se encuentra ubicada al inicio del floculador 5.

Todos los floculadores pertenecen al tipo hidráulico de flujo horizontal con pantallas de hormigón, el floculador 5 es diferente a los demás, porque tiene pantallas tipo Eternit (onduladas). El área que ocupa las unidades donde se realiza la floculación es de 1860 m².

Existen 4 unidades para la filtración con decantación de alta tasa y flujo ascendente con un área total de 1453 m². El edificio de filtros consta de dos plantas: en la planta superior se encuentran 12 unidades de filtros que se pueden apreciar a simple vista, la zona de comandos de filtros y la sala de operaciones. Mientras que, en la planta inferior se encuentran la galería de tubos, dosificadores de cloro gas y el taller de mantenimiento electro-mecánico. Por último, existen 6 tanques de almacenamiento para el agua tratada y desde este punto es distribuida a la población de la ciudad.

3.2 EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES HIDRÁULICAS

Las características hidráulicas evaluadas fueron: caudales, tiempos de retención, gradientes de velocidad e intensidad de mezcla. Todas las condiciones anteriores fueron necesarias para replicar los procesos de coagulación - floculación de la PTAP en las pruebas de jarras a escala del laboratorio y de esa manera obtener resultados más cercanos a la realidad. En los párrafos siguientes se detalla cada uno de los análisis que fueron realizados.

3.2.1 Caudales

Los métodos de dilución con trazadores y de área-velocidad (molinete), se utilizaron para determinar los caudales de operación total que ingresa a la planta. A continuación, se detallan estos procesos.

a. Método de dilución con trazadores por inyección instantánea

Este método nos permite determinar los caudales de arroyos, ríos y canales debido a su efectividad y bajo costo, es una de las técnicas más usadas. Se basa en incorporar un volumen y concentración establecida del trazador (NaCl) instantáneamente en la corriente

de agua, para posteriormente tomar muestras aguas abajo y medir los sólidos disueltos totales. Por medio de las muestras de los sólidos disueltos totales tomados a determinado intervalo de tiempo, se integra la ley de conservación de masas que corresponde a la variación de los sólidos disueltos totales con respecto al tiempo. Los sólidos disueltos totales tienden a elevarse a medida que el tiempo avanza hasta un punto máximo, para luego disminuir paulatinamente hasta su estado inicial, esta variabilidad de sólidos permite establecer el caudal en diferentes efluentes, esto fue realizado en el canal de conducción externo e interno de la PTAP.

En la Figura 3.2-1 se puede observar el canal de conducción externo de la PTAP, que va desde los presedimentadores hasta el ingreso de la PTAP. Se eligió este tramo a 3 Km antes del ingreso a la PTAP, debido a que las cubiertas del canal se pudieron remover fácilmente. El punto donde fue añadido el trazador de NaCl en la Figura 3.2-1 está representado por el punto rojo y donde fueron tomadas las muestras para la medición de conductividad está representada por el punto azul.

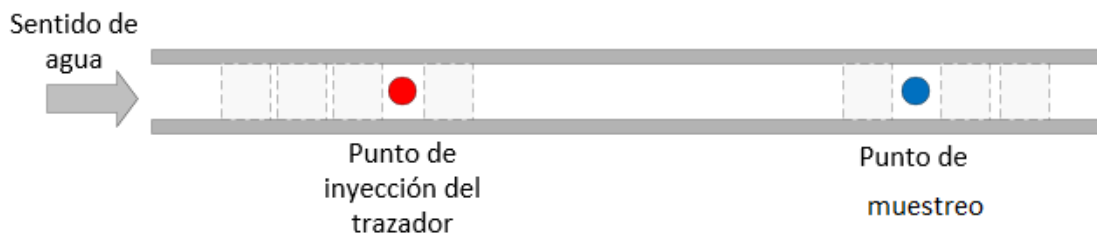


Figura 3.2-1: Punto de muestreo canal de conducción externo.
Fuente: Criollo & Lara (2020).

En la Figura 3.2-2 se presenta el vertedero lateral para excesos de caudal dentro de la PTAP, en este punto fue administrado el trazador de NaCl (punto rojo). Posteriormente, se observa la división de los dos canales internos los cuales fueron utilizados en la toma de muestras (puntos azules) para la medición de conductividad. Tanto las Figuras 3.2-1 y 3.2-2 representan los puntos de muestreo para obtener el caudal de operación total de agua cruda que ingresa a la PTAP.

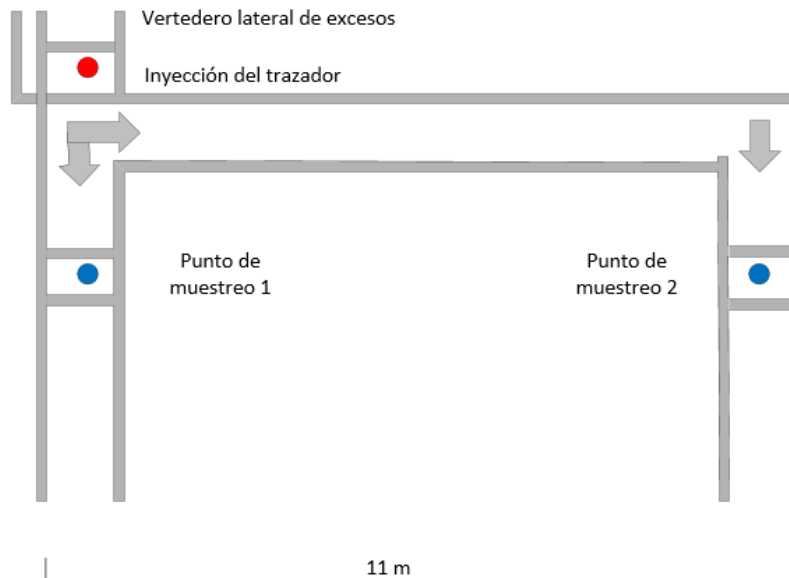


Figura 3.2-2: Puntos de muestro canal de ingreso interno.
Fuente: Criollo & Lara (2020).

Procedimiento:

Una vez identificados los puntos de muestreo, para el canal externo y canales internos, se procedió a calibrar el equipo en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cuenca. El equipo utilizado fue: HQ40D Kit multímetro digital, medidores portátiles de pH y conductividad/TDS que se puede observar en la Figura 7.1-1 (Anexo VII- A), cabe recalcar que este equipo fue utilizado para medir la conductividad durante todo el estudio. En los sitios de muestreo se prepararon los envases para la toma de muestras de agua. Posteriormente, se calculó el peso del NaCl y en un recipiente de 80 litros se colocó la cantidad de sal que permitió obtener una concentración de $30 \frac{mg\ Cl^-}{l}$. Se midió la conductividad y temperatura inicial del agua, así como de la solución de NaCl.

Basados en los estudios de Vargas (2005f), la Ecuación 3.2-1 permitió determinar el peso de NaCl en función del volumen de la sección del canal.

$$P = \frac{V * k * C_o}{l * 10^3}$$

Ecuación 3.2-1: Peso de cloruro de sodio

$$V = L * A * p$$

Ecuación 3.2-2: Volumen útil del canal

Dónde:

P: Peso del trazador en solución por añadir al canal de conducción (Kg)

V: Volumen útil del canal (m^3)

K: Constante de corrección

C_o: Concentración del trazador (mg/l)

l: Grado de pureza del trazador, fracción de la unidad

L: Largo de la sección del canal (m)

A: Ancho del canal (m)

p: Profundidad del canal (m)

El valor de la constante generalmente es 1.65 para NaCl, todo depende de trazador utilizado, este valor fue determinado según Vargas (2004b).

$$k = \frac{\text{Pesos de NaCl}}{\text{Peso Cl}} = \frac{23 + 35,5}{35,5} = 1,65$$

Una vez realizadas las pruebas, se determinó el caudal que ingresa a la PTAP en base a la metodología de inyección instantánea (Aguirre & Venegas, 2005). Para obtener el resultado de esta metodología se utilizó dos formas: Integrales y Regla de Simpson.

Para determinar el caudal se emplearon las siguientes ecuaciones:

-Integrales:

$$Q = \frac{V_1 C_1}{\int_{t_1}^{t_2} (SDT - SDTo) dt} \quad \text{Ecuación 3.2-3: Integral}$$

Dónde:

Q: Caudal (l/s)

V₁: Volumen del trazador – cloruro de sodio (l)

C₁: Sólidos disueltos totales en la solución trazadora (mg/l)

SDT: Sólidos disueltos totales del agua al final (mg/l)

SDTo: Sólidos disueltos totales del agua al inicio (mg/l)

$\int_{t_1}^{t_2} (SDT - SDTo) dt$: Representa el área bajo la curva

-Regla de Simpson:

$$Q = \frac{V_1 (SDT_1)}{\sum (SDT) \Delta t} \quad \text{Ecuación 3.2-4: Regla de Simpson}$$

$$Q = \frac{V_1 (SDT_1)}{\frac{\Delta t}{3[(SDT_0) + 4(SDT_1) + 2(SDT_2) + 4(SDT_3) + \dots + 2(SDT_{n-2}) + 4(SDT_{n-1}) + (SDT_n)]}}$$

Dónde:

Q: Caudal (l/s)

V₁: Volumen del trazador – cloruro de sodio (l)

SDT₁: Sólidos disueltos totales en la solución trazadora (mg/l)

SDT: Sólidos disueltos totales (mg/l) en el tiempo t en el punto de muestra

Δt : Intervalo de tiempo en la toma de muestras (s)

$\sum (SDT) \Delta t$: Representa el área bajo la curva.

SDT_n: Sólidos disueltos totales (mg/l) en el tiempo t en el punto de muestra

Para poder aplicar estas fórmulas, las conductividades de las muestras tomadas se transformaron a partes por millón (ppm). Mediante la curva de calibración con mínimos cuadrados de los SDT (mg/l) versus la conductividad del agua ($\mu\text{S}/\text{cm}$) se obtuvo la ecuación de la recta que se interseca en un punto y pendiente conocidos.

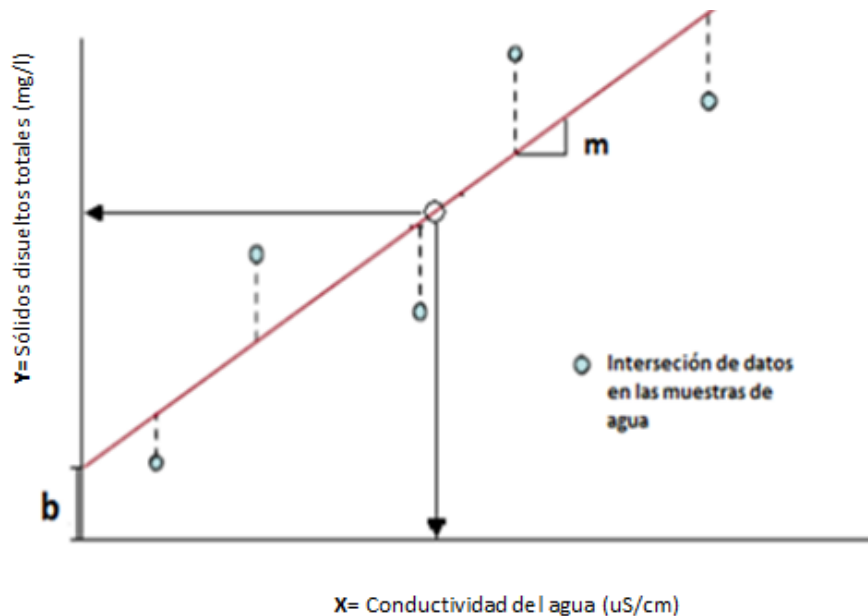


Figura 3.2-3: Curva de calibración
Fuente: (Dosal & Villanueva, 2008).

$$y = mx + b$$

Ecuación 3.2-5: Ecuación de la recta

$$SDT = mk + b$$

Ecuación 3.2-6: Ecuación de la recta modificada

Dónde:

SDT: Sólidos disueltos totales en el agua (mg/l)

K: Conductividad del agua ($\frac{\mu\text{S}}{\text{cm}}$)

m: Valor de la pendiente de la recta

b: Punto de intercepción en la ordenada

En la Figura 7.1-2 (Anexo VII - A), se encuentra el equipo COLOMETER Medidor de SDT-modelo BZ91 que fue utilizado para registrar los sólidos disueltos totales del agua.

b. Método área-velocidad (molinete)

El principio de este método se fundamenta en el dimensionamiento del canal, así como en la velocidad que adquiere el flujo del agua. Las Ecuaciones 3.2-7 y 3.2-8 fueron utilizadas para la obtención del caudal.



$$V_i = \frac{v_{0,2} + v_{0,8} + v_{0,6}}{3}$$

Ecuación 3.2-7: Velocidad del flujo del agua

$$Q = A * V_i$$

Ecuación 3.2-8: Caudal del agua

Dónde:

A: Área de una sección del canal (m²)

V_i: Velocidad registrada por el molinete a 20, 60 y 80 % de la profundidad del agua (m/s)

Q: Caudal del canal (m³/s)

Procedimiento:

Se obtuvo la velocidad del flujo por medio del equipo tipo Molinete Global Water modelo FP211, el cual se puede apreciar en la Figura 7.1-3 (Anexo VII - A), el cual primero fue calibrado antes de empezar las mediciones y fue utilizado durante todo el periodo de pruebas. Se eligió un tramo del canal (Figuras 3.2-1 y 3.2-2) y se obtuvo el área transversal del mismo, el molinete se introdujo en el canal para determinar la velocidad a varias profundidades bajo la lámina del agua (0.18, 0.54 y 0.72 metros), para esto se usó la Ecuación 3.2-7, que es utilizada para corrientes turbulentas por irregularidad del lecho (Humberto et al., 2012).

Finalmente, se reemplazó los datos obtenidos en la Ecuación 3.2-8, y se transformó los resultados en (l/s). Cabe recalcar que se aplicó este método para todos los canales tanto internos como externo, así como para las unidades de floculación.

3.2.2 Evaluación del mezclador- coagulación

Para analizar el funcionamiento de esta unidad fue necesario evaluar dos parámetros físicos con sus respectivos ensayos (Vargas, 2005b):

- a) Tiempo de retención que ocurre en la mezcla rápida
- b) Intensidad que ocurre en la mezcla rápida

a. Tiempo de retención de la unidad mezcla rápida

Se determinó el tiempo de retención teórico por medio del volumen de la unidad donde se realiza la mezcla rápida y el caudal máximo de operación. Por otro lado, la metodología de trazadores se usó para obtener también el tiempo de retención real.

Procedimiento:

a.1 Tiempo de retención teórico

Se utilizó un flexómetro para medir las dimensiones del canal rectangular con cambio de pendiente donde se desarrolla la mezcla rápida, luego se calculó el volumen en metros cúbicos y se procedió a transformar en litros. Finalmente, con los datos de volumen y caudal tomados en ese tiempo se ingresaron en la Ecuación 3.2-9 y se obtuvo el tiempo teórico en segundos.

$$t = \frac{V}{Q}$$

Ecuación 3.2-9: Tiempo de retención

Dónde:

V : Volumen de la unidad de mezcla rápida (l)

Q : Caudal de ingreso (l/s)

t : Tiempo de retención (s)

a.2 Tiempo de retención real

Se utilizó la Ecuación 3.2-1 para determinar la cantidad de NaCl que se necesitaba según el volumen de la mezcla rápida y que permitió obtener una concentración de 30 (mg/l), posteriormente se preparó una solución (NaCl + H₂O) en un recipiente de 43 litros. Se midió la conductividad y temperatura inicial del agua, así como de la solución (NaCl + H₂O). Se prepararon los envases de las muestras lavándolos con agua destilada.

La solución (NaCl + H₂O), fue administrada al inicio de la mezcla rápida (punto rojo) y la muestra fue tomada en el resalto hidráulico (punto azul), como se muestra en la Figura 3.2-4.

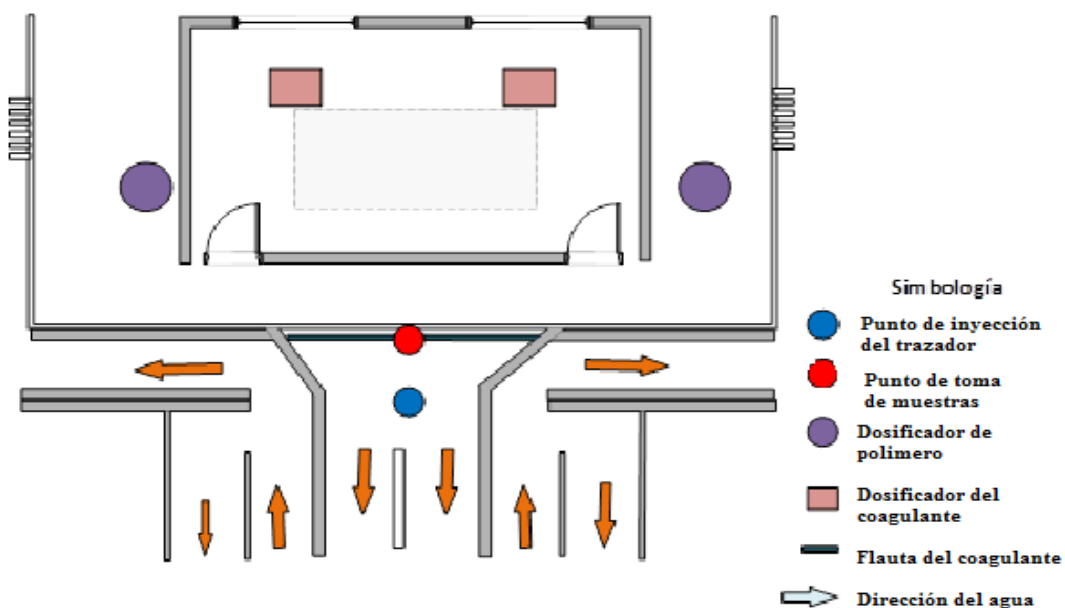


Figura 3.2-4: Sección para la inyección del trazador y la toma de muestras en la unidad de la mezcla rápida.

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Las muestras fueron tomadas cada 1 segundo de forma cronológica hasta que la conductividad llegue a ser la inicial. Una vez tomadas las muestras, se realizó un gráfico en el programa Microsoft Excel, donde se representa el tiempo con relación a la conductividad. El tiempo de retención corresponde a la conductividad mayor de las muestras de agua.

Para validar que el tiempo de retención sea el indicado se procedió a realizar otras pruebas sin recolectar muestras de agua de la siguiente manera: se calculó el peso del trazador y la concentración de la solución ($\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$) de forma similar que las anteriores pruebas. A continuación, se incorporó instantáneamente el trazador en la parte donde inicia la unidad de mezcla rápida, luego se midió la conductividad directamente introduciendo el electrodo al final del resalto hidráulico. En la Figura 3.2-4, se presenta donde fue sumergido el electrodo de conductividad para obtener el registro de los datos instantáneos.

b. Intensidad de la mezcla rápida

Fue indispensable que se determine el valor del gradiente de velocidad para evaluar las condiciones en la que se está operado la unidad de mezcla rápida, según (Romero, 2006b) y para aplicarla a las pruebas de jarras.

Procedimiento:

A continuación, se presenta las ecuaciones utilizadas para determinar el gradiente de velocidad en la mezcla rápida:

- Cálculo del caudal por unidad de ancho del canal rectangular con cambio de pendiente.

$$q = \frac{Q}{B}$$

- Se despeja h_1 y se reemplaza en la ecuación

$$h_1 = \frac{q}{V_1}$$

$$E_1 = h_1 + \frac{V_1^2}{2g}$$

$$E_1 = E_o = \frac{q}{V_1} + \frac{V_1^2}{2g}$$

- Despejando V_1 , tenemos:

$$V_1 = 2 \sqrt{\frac{2E_o}{3}} \cos \frac{\theta}{3}$$

Dónde:

$$\cos \theta = - \frac{g q}{\left(\frac{2 g E_o}{3} \right)^{1,5}}$$

- Cálculo del número de Froude debe tener un rango de 4.5 a 9:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g h_1}}$$

- h_2 se calculó mediante la siguiente formula:

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 F_1^2} - 1 \right)$$

- Donde la pérdida de carga, según Belanger, es la siguiente:

$$H = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4 h_1 h_2} \quad \text{Ecuación 3.2-10: Pérdida de carga}$$

La temperatura del agua fue aproximadamente 13 °C y fue tomada con el mismo equipo que se determinó la conductividad eléctrica. En las Tablas 7.2-1, 7.2-2, 7.2-3, 7.2-4, 7.2-5 y 7.2-6 (Anexo VII - B) se pudo apreciar los parámetros iniciales del agua cruda de los floculadores para los 3 caudales trabajados.

Se procedió a determinar $\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$, dependiendo de la temperatura que se registró anteriormente. En la Tabla 3.2-1 se indica el valor de $\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$ en función de varias temperaturas.

Tabla 3.2-1: *Relación de Temperatura*

Temperatura °C	$\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$
0	2337
4	2502
10	2737
15	2920
17	2998
20	3115
25	3267

Fuente: (Vargas, 2005b).

Para determinar el valor de $\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$ se utilizó la Ecuación 3.2-11 que corresponde a una interpolación lineal.

$$y_x = y_o + \frac{x - x_o}{x_1 - x_o} (y_1 - y_o) \quad \text{Ecuación 3.2-11: Interpolación lineal}$$

Finalmente, se empleó la Ecuación III-12 que permitió obtener el gradiente.

$$G = \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} * \sqrt{\frac{H}{T_R}} \quad \text{Ecuación 3.2-12: Gradiente de velocidad}$$

Dónde:

H: Pérdida de carga de la unidad donde se efectúa la mezcla rápida (m)

T_r: Tiempo de retención de la unidad donde se efectúa la mezcla rápida (s), obtenido del literal a.2

$\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$: Función de temperatura

γ : Peso específico del agua (N/m³)

μ : Viscosidad del agua (Pa.s)

3.2.3 Evaluación de los floculadores

Estas unidades fueron evaluadas mediante los siguientes ensayos:

- Geometría de la unidad
- Caudal de operación
- Tiempo de retención real, teórico y características de la unidad
- Intensidad de la floculación

a. Geometría de la unidad

Consistió en determinar: número de pantallas, número de compartimentos, uniformidad de los tramos, longitud total del floculador, el tipo y las dimensiones de las unidades de floculación (Vargas, 2005b).

Como ya se mencionó en el ítem 3.1.1 la PTAP tiene cinco floculadores hidráulicos de flujo horizontal, pero solo se trabajó en dos, porque el floculador 1 tiene características hidráulicas (tiempo de retención y gradiente) y físicas (dimensiones y diseño) similares al floculador 4, de la misma manera el floculador 2 es similar al floculador 3. Estos cuatro floculadores anteriores descritos abarcan alrededor del 80 % del caudal de ingreso, cabe recalcar también que el floculador 5 tiene dimensiones diferentes a los otros.

Procedimiento:



Mediante una observación y revisión de la bibliografía de diseño de los floculadores se identificó si los floculadores son horizontales o verticales, si hay deformaciones o roturas en las pantallas (Romero, 2006a). Posterior a eso, se determinó las medidas de los floculadores con la ayuda de una cinta topográfica de 50 m, para saber si cada tramo de la unidad es uniforme, finalmente se calculó el número de pantallas y compartimentos utilizando las Ecuaciones 3.2-13 y 3.2-14 respectivamente (Vargas, 2004e).

$$N = \frac{I}{B}$$

Ecuación 3.2-13: Número de compartimentos

Dónde:

I: Longitud total del recorrido del agua por los canales (m)

B: Ancho del floculador (m)

N: Número de compartimentos

$$N_p = N - 1$$

Ecuación 3.2-14: Número de pantallas

Dónde:

N_p: Número de pantallas

N: Número de compartimentos

b. Caudal de operación

Para determinar los caudales de cada floculador se aplicó los métodos de dilución con trazadores y área velocidad (molinete), que están detallados en el ítem 3.2.1. Se realizó estas pruebas en los floculadores para determinar que los caudales registrados en la PTAP sean correctos, y además para establecer la distribución de los caudales en los floculadores.

Procedimiento:

-Para el método de dilución con trazadores se trabajó con 1 kg de NaCl (sal común), en la Figura 3.2-5 se observa el punto de inyección de la solución (H₂O + NaCl) y el punto de toma de muestras cuya distancia fue de 10 metros. Las muestras fueron tomadas cada 5 segundos hasta que la conductividad inicial sea igual a la conductividad final. Más adelante, con el uso de la integral y de la regla de Simpson se obtuvo el caudal del floculador, el resultado final fue el promedio de las pruebas realizadas en el floculador. Lo anterior se replicó en cada floculador, para obtener el caudal respectivo en cada unidad.

-Para el método de área velocidad (molinete), se utilizó el área transversal del compartimento de cada floculador. El punto de medición para el molinete (punto rojo) se observa en la Figura 3.2-5. Se realizaron 5 pruebas en el floculador 1 para realizar un

promedio, el resultado del promedio es el caudal registrado en las pruebas, esto se replicó en cada floculador.

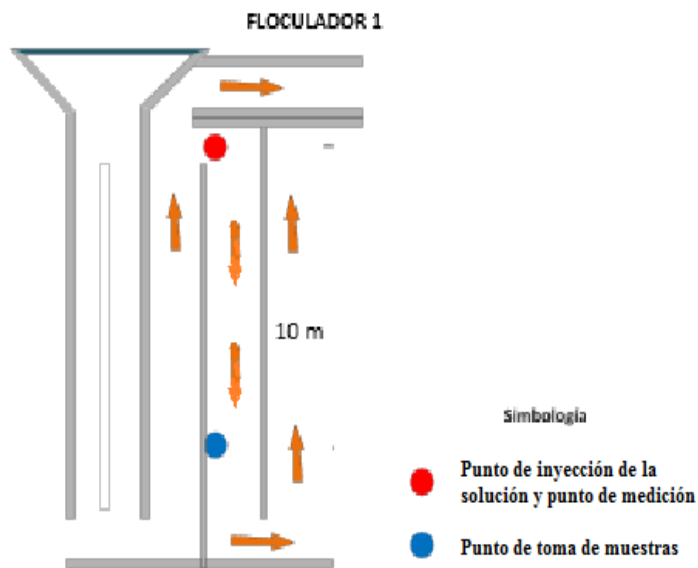


Figura 3.2-5: Puntos de muestreo de los floculadores.

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Finalmente, con la obtención de los caudales por disolución con trazadores y área velocidad, se procedió a realizar un promedio entre estos dos métodos

c. Tiempo de retención real, teórico y características de la unidad

Se utilizó la metodología de trazadores, tal como se desarrolló anteriormente para obtener el tiempo de retención en la unidad de mezcla rápida, considerando el volumen del floculador para este caso (Ítem 3.2.2). El tiempo de retención de las unidades de floculación, corresponde al valor más alto de conductividad durante la toma de muestras, sin embargo, es complicado determinar el tiempo exacto de la mezcla lenta, algunos de los motivos se deben a las zonas muertas en las unidades y a los cortos circuitos durante el proceso (Vargas, 2004a).

c.1 Tiempo de retención real

Procedimiento:

Primero, se realizó el cálculo para obtener el peso del trazador utilizando la Ecuación 3.2-1, los datos utilizados son los mismos, excepto el volumen de cada floculador; luego se preparó solución ($\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$) en un recipiente de 100 litros como se puede observar en las Figuras 7.5-3, 7.5-4 y 7.5-5 (Anexo VII - E). Posterior a eso se tomaron datos tanto de



la conductividad como de la temperatura del agua y la solución ($\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$). Después se prepararon los envases para la toma de muestras, estos fueron lavados con agua destilada.

Se añadió la solución de forma instantánea al inicio del floculador; una vez administrada la solución ($\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$), se tomaron muestras cada 30 segundos, hasta que la conductividad inicial sea igual que la final. La toma de muestras se realizó al final del floculador 1 y 2, a 50 cm bajo la lámina de agua y en el nivel medio del compartimento. En la Figura 3.2-6 se puede apreciar, el punto de inyección del trazador (punto azul) y donde fueron tomadas las muestras (punto rojo).

c.2 Tiempo de retención teórico

Se calculó mediante la Ecuación 3.2-9, que es una relación entre el caudal y volumen de cada floculador.

Procedimiento:

Se utilizó una cinta topográfica de 50 metros, para medir las dimensiones del floculador (largo, ancho y profundidad), luego se obtuvo el volumen del floculador en metros cúbicos (v_f). A continuación, se midió las pantallas del floculador, determinándose un volumen en metros cúbicos (v_p)

Se realizó una resta entre el volumen total de floculador y el volumen de las pantallas, como resultado se obtuvo el volumen de agua en el floculador (v_t). Por último, se registró el caudal de ingreso en ese instante y se despejó el tiempo de retención.

d. Intensidad de la floculación

Consistió en determinar la pérdida de carga y el gradiente de velocidad existentes en cada tramo del floculador (Vargas, 2005b).

Procedimiento:

Se estableció la pérdida de carga y gradiente de velocidad para los caudales más utilizados en la PTAP (1000, 950 y 800 l/s). Como material se utilizó un nivel manual con láser.

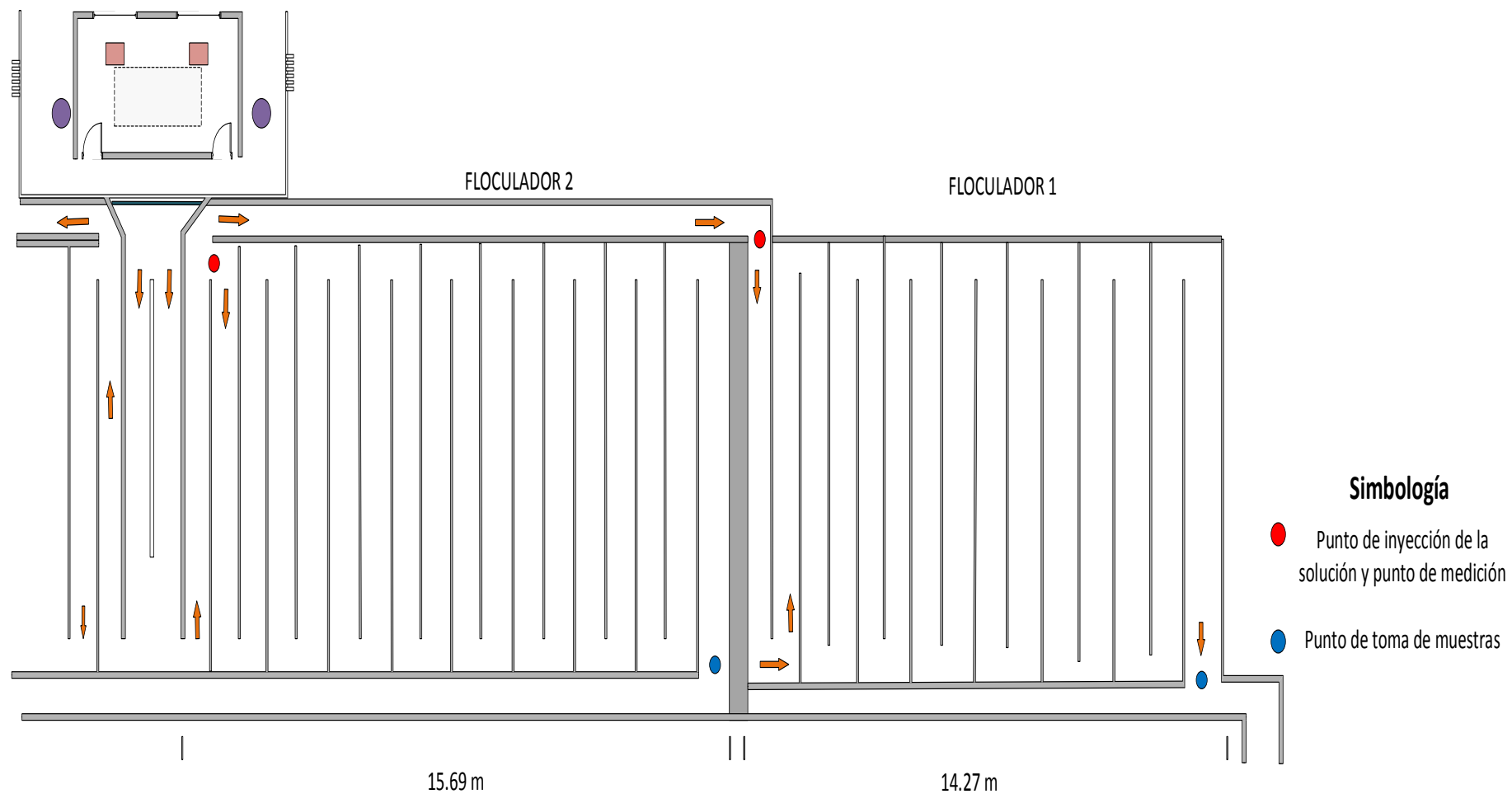


Figura 3.2-6: Puntos de muestreo de las unidades de floculación.
Fuente: Criollo & Lara (2020)

Primero, se tomó una altura referencial y luego en cada pantalla del floculador con una mira topográfica se tomó la medida hasta llegar a la medida referencial.

Para determinar la pérdida de carga se utilizó la Ecuación 3.2-15, según lo indicado por Vargas (2005b).

$$H = \text{Altura del agua } h_2 - \text{Altura del agua } h_1 \quad \text{Ecuación 3.2-15: Pérdida de carga}$$

Dónde:

H : Pérdida de carga (m)

h_1 : Altura 1 (m)

h_2 : Altura 2 (m)

Posteriormente se registró la temperatura del agua que fue aproximadamente de 13 °C, con ayuda de la Tabla 3.2-1 que corresponde a la relación de temperatura, se determinó el valor de $\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$. Finalmente, aplicando la Ecuación 3.2-12 se obtuvo el gradiente de velocidad para cada floculador.

3.2.4 Evaluación del comportamiento hidráulico

Las características hidráulicas fueron evaluadas en los floculadores, debido que, al pasar los años la floculación podría perder eficiencia en su proceso. Para este análisis se utilizó las metodologías de: Curva de tendencia, Modelo Simplificado de Wolf-Resnick y el Índice de Morrill según Vargas, (2005a) y Larriva & González, (2017).

a) Evaluación por el método de la curva de tendencia

La curva de tendencia tiene como objetivo principal analizar la eficiencia de la floculación en el proceso hidráulico. Esta evaluación se fundamenta en relacionar las condiciones de flujo del método de Wolf-Resnick con los parámetros obtenidos en esta curva. Por lo general los flujos anormales en las unidades hidráulicas se debe principalmente a cortocircuitos, espacios muertos y recirculaciones; los cortocircuitos se dan cuando el líquido de la unidad sale rápidamente, es decir antes del tiempo de retención, pasa lo contrario con los espacios muertos el agua fluye lentamente e incluso permanece estancada y la recirculaciones del agua causa un retraso en la salida normal del líquido (Kumaresan et al., 2006). A continuación, en la en la Figura 3.2-7 se presentan los parámetros que se requieren para realizar la evaluación de la curva.

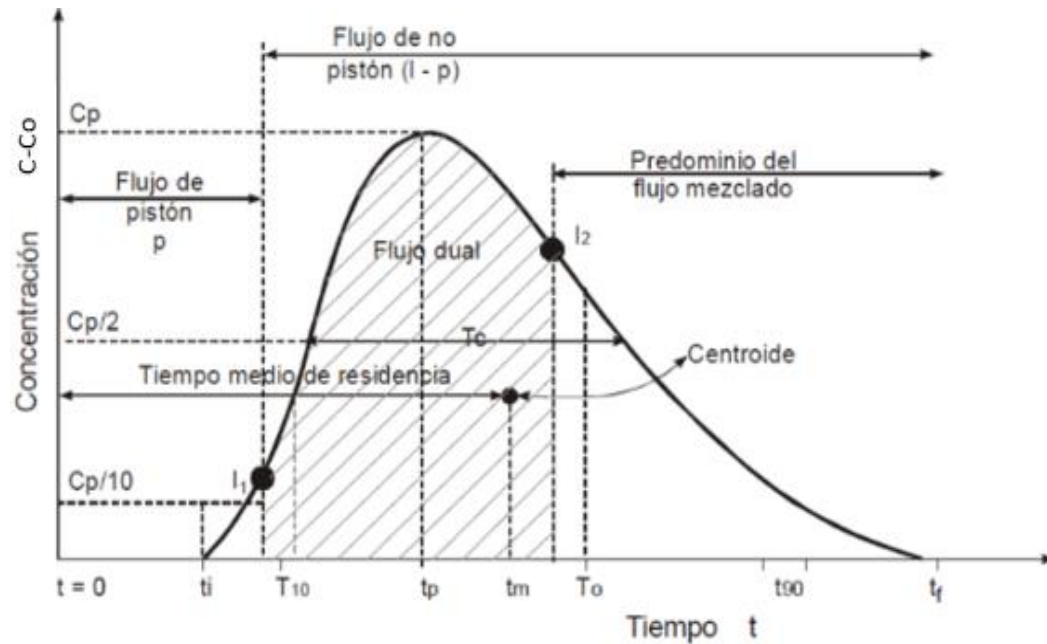


Figura 3.2-7: Concentración de trazador en efluente de un reactor.

Fuente: (Vargas, 2005a).

Dónde:

t_i : tiempo desde que se introduce el trazador en el agua cruda hasta que cambia la conductividad del mismo (min)

t_{10} : tiempo que representa el 10 % del trazador que pasa en relación al total del trazador(min)

t_p : tiempo modal, es decir representa la máxima concentración (min)

t_m : tiempo mediano, es decir representa el 50% del trazador que pasa en relación al total del trazador(min)

t_o : tiempo de retención teórico (min)

t_{90} : tiempo que representa el 90% del trazador que pasa en relación al total del trazador (min)

t_f : tiempo en que el agua cruda vuelve a tener la conductividad inicial (min)

C_o : concentración del trazador inicial (mg/l)

C_p : concentración del trazador máxima (mg/l)

Los criterios con que se analiza la curva de tendencia son los siguientes:

$\frac{t_i}{t_o}$	{	Medición de circuitos grandes: 1: Flujo pistón 0: Flujo mezclado <0.3: Paso directo entrada y salida
$\frac{t_m}{t_o}$		<1: Existencia de cortocircuitos hidráulicos > 1: Existencia de espacios muertos Relación flujo pistón y flujo mezclado
$\frac{t_p}{t_o}$		1: Flujo pistón 0: Flujo mezclado
$e = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_i)}{t_o}$	{	Excentricidad en la curva de tendencia 0: Flujo en pistón 2.3: Flujo mezclado ideal

Procedimiento:

Una vez realizadas las pruebas de trazadores, los datos obtenidos fueron tabulados en Microsoft Excel, se graficaron los valores de (t) en el eje de las abscisas y (C-Co) en el eje de las ordenadas. A continuación, se determinó los parámetros establecidos y finalmente se analizó la curva según los criterios descritos anteriormente.

b) Modelo simplificado de Wolf-Resnick

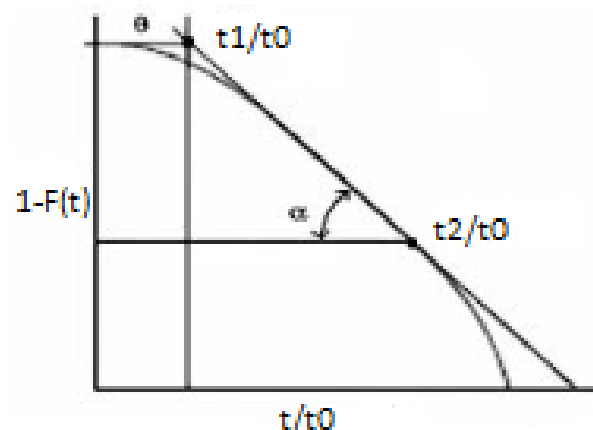


Figura 3.2-8: Curva de 1-F(t). Cantidad de trazador que pertenece al reactor (l).

Fuente: (Vargas, 2005a).

- Primero se partió de una condición ideal, donde no hay zonas muertas.

$$P + (1 - P) = 1$$

Ecuación 3.2-16:
Condición ideal

Dónde:

P : Flujo de pistón

$(1-P)$: Flujo de no pistón

- Ahora, considerando que hay espacios muertos la Ecuación 3.2-16, quedaría de la siguiente manera:

$$[P((1 - m))] + [(1 - P)(1 - m)] + m = 1$$

Dónde:

m : Zona muerta

$1-m$: Fracción sin la presencia espacios muertos

- Como ningún flujo tienen una mezcla perfecta la ecuación es según Vargas, (2004d):

$$\frac{C}{C_0} = e^{\frac{1}{(1-P)(1-m)} \left[\frac{t}{t_0} - P(1-m) \right]}$$

Dónde:

C : concentración del trazador que permanece en el floculador en el tiempo (mg/l)

C_0 : concentración del trazador aplicada en el tiempo inicial ($t=0$) (mg/l)

- La fracción que sale del reactor es $F(t)$, cuya ecuación es la siguiente:

$$F(t) = 1 - \frac{C}{C_0}$$

Ecuación 3.2-17:
Fracción de agua que
sale del reactor

- La ecuación de la recta es:

$$\log(F(t)) = \frac{-\log * e}{(1 - P)(1 - m)} \left[\frac{t}{t_0} - P(1 - m) \right]$$

Ecuación 3.2-18:
Ecuación de la recta

- Cuya pendiente es:

$$\tan(\alpha) = \frac{\log(e)}{(1 - P)(1 - m)}$$

- Si se hubiera flujo mezclado perfectamente la Ecuación 3.2-17 sería:

$$\log[1 - F(t)] = -t(\alpha) * \left(\frac{t}{t_0} - \theta \right)$$

Dónde:

$$\theta = P(1 - m)$$

θ : Flujo pistón con una fracción de espacio muerto

- La Ecuación de la pendiente quedaría de la siguiente manera:

$$\tan(\alpha) = \frac{\log * e}{(1 - m) * (1 - P)}$$

Ecuación 3.2-19:
Pendiente de la recta

Entonces:

- El flujo pistón es igual a:

$$P = \frac{\theta * \tan(\alpha)}{0,43429 + \theta * \tan(\alpha)}$$

Ecuación 3.2-20:
Flujo de pistón

- El flujo mezclado es igual a:

$$M = 1 - P$$

Ecuación 3.2-21:
Flujo mezclado

- El volumen de espacios muertos es igual a:

$$m = 1 - \frac{\theta}{P}$$

Ecuación 3.2-22:
Volumen de
espacios muertos

Para determinar los valores de θ y $\tan \alpha$ se necesita aplicar las siguientes ecuaciones:

$$\theta = \frac{t_1}{t_0}$$

Ecuación 3.2-23:
Ángulo para
determinar t_1/t_0

$$\tan \alpha = \frac{1}{\frac{t_2}{t_0} - \frac{t_1}{t_0}}$$

Ecuación 3.2-24:
Tangente del
ángulo

$\frac{t_1}{t_0}$: Relación entre el tiempo 1 respecto al tiempo teórico

$\frac{t_2}{t_0}$: Relación entre el tiempo 2 respecto al tiempo teórico

Procedimiento:

Después de realizar las pruebas de trazadores se determinó los tiempos de retención, la conductividad y la concentración inicial. Se procedió a realizar la tabulación de los datos en Microsoft Excel, donde se presentó tablas con los siguientes parámetros:

t: Tiempo de retención de cada muestra (min)

K: Conductividad de cada muestra ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

C_0 : Concentración inicial del trazador en el agua cruda (mg/l)

C: Concentración final del trazador en cada muestra (mg/l)

$(C-C_0)$: Concentración final en cada muestra – concentración inicial (mg/l)

(t/t_0) : Tiempo final transcurrido en cada prueba para tiempo de retención

$(\Sigma(C-C_0))$: Sumatoria de la concentración final – concentración inicial (mg/l)

Los valores de $[F(t)]$ y $[1-F(t)]$, se determinaron mediante las siguientes ecuaciones:

$$F(t) = \frac{\Sigma(C - C_0) * 100}{\Sigma(C - C_0)}$$

$$1 - F(t) = 100 - F(t)$$

Una vez determinados estos valores, se procedió a realizar la gráfica entre (t/t_0) en el eje de la abscisa y $[1-F(t)]$ en el eje de la ordenada, luego se trazó una línea tangente a la curva y se calculó el valor de $\tan(\alpha)$ y θ .

A continuación, se utilizaron las Ecuaciones 3.2-20, 3.2-21 y 3.2-22 para calcular el flujo pistón, flujo mezclado y volumen de zona muerta.

c) Índice de Morrill

En la Figura 3.2-9, se observa que los valores recomendados para calcular el índice son el 10 % y el 90% de trazador que pasa en un determinado tiempo (Vargas, 2005a).

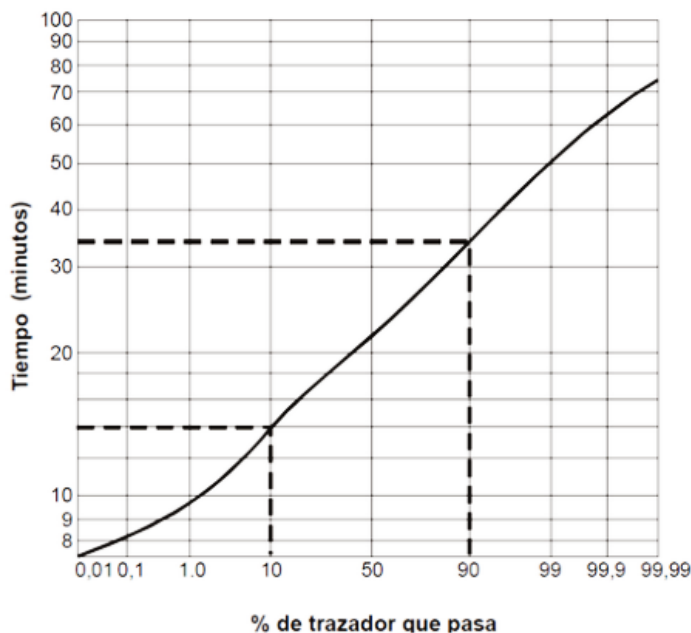


Figura 3.2-9: Índice de Morrill.

Fuente: (Vargas, 2005a).

Para calcular el índice se tiene que aplicar la Ecuación 3.2-25:

$$\text{Índice de Morrill} = \frac{\text{Tiempo en que pasa el 90\%}}{\text{Tiempo en que pasa el 10\%}} \quad \text{Ecuación 3.2-25: Índice de Morrill}$$

El índice de Morrill se analiza bajo los siguientes criterios:

- Si la curva es horizontal, significa que es flujo pistón y el índice es igual a 1.
- Si la curva tiende a una inclinación, significa que hay presencia de un flujo mezclado. Además, mientras más mezclado sea el flujo, también será mayor el ángulo que forma el eje de la x (abscisas) con la curva de tendencia. En contraste significa, que el tiempo que se retiene el agua en el floculador es más amplio e irregular.

Procedimiento:

Para calcular el índice de Morrill se procedió a graficar los valores de $F(t)$ en el eje de la abscisa y el tiempo (t) en el eje de la ordenada. Se calculó por interpolación los valores del 10% y 90% del trazador que pasa en la unidad de floculación, como última actividad se calculó el índice con la Ecuación 3.2-25.

3.3 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA

3.3.1 Muestreo

Fueron recolectadas muestras de agua cruda en el ingreso a la PTAP, seleccionando turbiedades bajas y altas durante los seis meses de muestreo. Estas muestras fueron utilizadas en el ensayo de jarras para determinar las dosis óptimas de coagulante y floculante para las diferentes turbiedades registradas. Estas dosis sirvieron para actualizar las curvas de PC y SA de la PTAP “El Cebollar” que serán utilizadas posteriormente por los operadores.

3.3.2 Recolección de muestras

La metodología que se utilizó fue por muestras simples, recolectadas de forma manual en el canal de ingreso de la PTAP. El periodo de pruebas fue de seis meses (marzo –agosto) para abarcar la temporada de invierno donde las turbiedades son más altas y verano donde las turbiedades se mantienen bajas. Se recolectaron y analizaron en total 216 pruebas con los tres caudales de agua cruda, se analizaron una mayor cantidad de pruebas con el caudal de 1000 l/s debido es más constante en la PTAP y por condiciones meteorológicas. Las



muestras fueron recogidas generalmente los días lunes, miércoles y viernes, durante el periodo antes mencionado o cuando fuera necesario después de fuertes precipitaciones.

La recolección de muestras se lo realizó en base a las referencias de la Norma Técnica Ecuatoriana Agua. Calidad de Agua. Muestreo. Técnicas de Muestreo (NTE INEN 2176, 2013). A continuación, se detallan los pasos:

- Los envases fueron tres recipientes azules (80 litros) y cinco recipientes blancos de plásticos (20 litros), cada uno con su tapa hermética. Los envases fueron lavados antes de recolectar la muestra y después de realizar los ensayos.
- Se recolectó una muestra de agua cruda en dos recipientes, que fueron posteriormente homogenizados para evitar alguna sedimentación previa.
- Luego de recolectar la muestra los envases fueron sellados y transportados al laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cuenca. Cabe recalcar que no se trabajó con todas las muestras en el laboratorio de ETAPA EP por la distancia que existe entre la PTAP “EL Cebollar” y la PTAP “Tixán”, hubo mayor facilidad en trasladar las muestras a la Universidad de Cuenca y menos perturbación de las mismas. Las muestras en ocasiones fueron analizadas el mismo día o al día siguiente, según NTE INEN 2176, (2013) el tiempo máximo de preservación es de 24 horas.

3.3.3 Materiales, reactivos y equipos utilizados en el laboratorio

El método de test de jarras sirve especialmente para determinar el tratamiento que se le debe aplicar al agua cruda, así como para establecer la dosis de coagulante y floculante. Este método es un proceso que se realiza a nivel de laboratorio para simular las condiciones reales del sistema operativo de las PTAP. Una de las condiciones que se puede experimentar en el test de jarras es la dosificación de productos químicos en distintos tiempos para obtener una dosis óptima (Satterfield, 2005).

No existe tiempo definido para realizar las pruebas de jarras, pero es recomendable ejecutarlas cuando: las sustancias químicas cambian, hay mejoras en los sistemas, cambia el caudal de ingreso y durante turbiedades muy altas o muy bajas (Satterfield, 2005).

Para simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación se utilizaron los siguientes equipos: Jar test marca ORBECO HELLIGE modelo ET 740 de la Universidad de Cuenca, laboratorio de Ingeniería Ambiental, en la Figura 7.1-4 (Anexo VII - A) se



muestra su ficha técnica; y el equipo Jar test marca B-KER se lo puede observar en la Figura 7.4-9 (Anexo VII - D), que se encuentra en la Planta de Tratamiento de Agua Potable de “Tixán”.

En las Figuras 7.5-10, 7.5-11 y 7.5-12 (Anexo VII - E) se puede observar de forma más detallada los materiales utilizados en los ensayos de jarras.

Materiales

- Dos lunas de reloj
- Dos balones de aforo de 100 ml
- Dos vasos de precipitación de 50 ml
- Cuatro vasos de precipitación de 1000 ml
- Varilla de vidrio
- Jeringas hipodérmicas desechables de 1,3,5 y 10 ml
- Dieciocho vasos plásticos esterilizados
- Espátula

Reactivos

- Sulfato de Aluminio, Grado 1, Tipo A grueso
- Sulfato de Aluminio, Grado 2, Tipo B grueso
- Agua cruda
- Agua destilada
- Polímero catiónico- Preastol tm 650 TR FLOCCULANT

Equipos

En los Anexos VII - A y VII - D se presentan las hojas técnicas e ilustraciones de cada equipo.

- HQ40D Kit multímetro digital, electrodo pH gel y Conduct Std
- Medidor digital TDS
- Colorímetro
- Medidor de pH
- Balanza analítica
- Destilador de agua
- Cronómetro

3.3.4 Preparación de las soluciones

A continuación, se presenta el proceso que se siguió para preparar las soluciones utilizadas en el laboratorio.

a) Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ tipo B

Para trabajar con SA las concentraciones varían entre 1 al 15 % en la mayoría de plantas convencionales. En los ensayos realizados se utilizó una concentración del 1%, debido a que en la PTAP también se utiliza esta concentración (Arboleda, 1973).



- En la PTAP

La adicción del coagulante es por vía seca, lo que significa que pasa por una tolva que se desliza hacia un pequeño tanque donde el coagulante se mezcla con agua, luego es distribuido en el resalto hidráulico por medio de una tubería PVC (200 mm) tipo flauta (orificios a lo largo de la tubería). En la Figura 7.6-1 (Anexo VII - F) se presenta la ficha técnica de SAGB.

- En laboratorio

Para los ensayos se trabajó con una solución al 1 %, utilizando SAGB. Las soluciones se preparaban cuando se realizaba el ensayo.

Procedimiento:

Se molió 1 g de SAGB, luego se colocó en un vaso de precipitación de 50 ml y se homogenizó. Después, se aforó a 100 ml y nuevamente se homogenizó, al final se colocó la solución en un vaso de precipitación.

b) Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ tipo A

El proceso que se utilizó para realizar la solución ($Al_2(SO_4)_3 + H_2O$) es el mismo que se realizó para el SAGB, solo que cambia el coagulante, en la Figura 7.6-2 (Anexo VII - F) se presenta la hoja de seguridad del SAGA.

c) Preparación de la solución de polímero catiónico

- En la PTAP

La adición de PC en la PTAP se lo realiza por medio de un tanque que mezcla 1800 litros de agua con 625 gramos de PC, es decir una concentración de 0,034 %. En la Figura 7.6-3 (Anexo VII - F) se presenta la hoja de seguridad.

La solución de PC debe suministrarse a 1/3 del tiempo total del recorrido del agua en los floculadores. Para comprobar este dato y suministrar el PC a escala del laboratorio en el tiempo que se dosifica en la PTAP, se procedió a realizar la prueba de trazadores para determinar el tiempo en el cual se suministra el PC dentro de la unidad de floculación.

- En el laboratorio



Para realizar los ensayos en el laboratorio se tomó la solución ya preparada de la PTAP. Cabe recalcar que la solución de PC se conserva por 24 horas, por esa razón en cada prueba que se realizó se tomó una nueva muestra de la PTAP.

3.3.5 Cálculo de dosificación de las soluciones

a) Sulfato de aluminio tipo A y tipo B

Para encontrar las dosis óptimas del coagulante, utilizamos la Ecuación 3.3-1 que representa el balance de masas modificada.

$$V * D = v * c$$

Ecuación 3.3-1: Balance de masas modificada

Dónde:

V: Volumen de la jarra (l)

D: Dosis del coagulante (mg/l)

v: Volumen de la solución – sulfato de aluminio + agua (l)

c: Concentración de coagulante (mg/l)

Este procedimiento se utilizó para las diferentes dosis que se aplicaron a las jarras. Dependiendo de la TURB y CA que presentaba el agua cruda fueron cambiando las dosis de coagulante. El volumen con el que se trabajó en cada vaso fue de 900 ml, para evitar derrames al momento de realizar los ensayos, debido a que en altas rpm del equipo de jarras generaba turbulencia y el agua se desbordaba del vaso.

b) Dosificación de polímero catiónico

Para encontrar las dosis óptimas del floculante, utilizamos la Ecuación 3.3-1 que representa el balance de masas modificada.

$$V * D = v * c$$

Ecuación 3.3-2: Balance de masas modificada

Dónde:

V: Volumen de la jarra (l)

D: Dosis del floculante (mg/l)

v: Volumen de la solución – polímero catiónico + agua (l)

c: Concentración de floculante (mg/l)

En una jarra se colocó el volumen de la solución de PC, y para las otras jarras solo se cambió las dosis realizándose el mismo cálculo consiguiendo los diferentes volúmenes

de la solución de PC. Los valores de las dosis deben estar en un rango de 0.02 a 0.2 (mg/l) para simular las dosis que son utilizadas dentro de PTAP.

3.3.6 Procedimiento pruebas de jarras

a. Proceso para encontrar dosis optima del coagulante:

Una vez recolectadas las muestras de agua y transportadas al laboratorio. Se homogenizó la muestra de agua cruda, luego se tomó una porción de muestra de agua cruda para medir TURB, CA y pH. A continuación, se preparó las soluciones de SAGB y SAGA al 1%, para determinar las dosis según las condiciones iniciales. Posteriormente, se calculó los volúmenes de la solución (coagulante) aplicando la Ecuación 3.3-1 y se colocó 900 ml de agua cruda homogenizada en cada vaso de precipitación. Se prepararon las jeringas con sus respectivos volúmenes de coagulantes (dosis).

Luego se encendió el equipo de prueba de jarras con 300 rpm (capacidad máxima) durante 30 segundos para representar la mezcla rápida. Se utilizó la configuración anterior para compensar las limitantes del equipo debido a que en la realidad las características son más de 1000 rpm durante 1 segundo. Después de transcurrir los 30 segundos de la mezcla rápida se inyectó el coagulante en todos los vasos de precipitación al mismo tiempo, además se programó el equipo de pruebas de jarras con los tiempos de retención y gradientes de velocidad calculados antes según la Tabla 4.4-1 para la mezcla lenta. Una vez transcurrido el tiempo de mezcla lenta, se retiraron las paletas y se dejó sedimentar por 20 minutos. Después del tiempo de sedimentación, se colocó 100 ml de agua en envases limpios, para medir TURB, CA y pH. Este proceso se realizó varias veces con el fin de obtener la dosis óptima (TURB y CA más bajos) con los dos coagulantes para verificar las pruebas.

Los resultados finales de las dosis óptimas de las diferentes turbiedades fueron graficados en el programa Microsoft Excel, para la realización de las dos curvas de dosificación del coagulante con los tres caudales experimentados. La primera es una representación gráfica con escalas lineales o proporcionales. En la segunda gráfica, un eje contiene una escala logarítmica y la otra lineal. Estas dos gráficas permitieron determinar, que representación se ajusta al modelo de una curva de dosificación del coagulante, para cual se calculó R^2 (coeficiente de determinación).

b. Proceso para encontrar dosis óptima del polímero



Una vez que se determinó la dosis óptima de coagulante, se procedió a realizar pruebas de jarras para obtener la dosis óptima de floculante, cuyos pasos se detallan a continuación:

En el laboratorio, se homogenizó la muestra de agua cruda de la PTAP. Se midió los parámetros de TURB, CA y pH, además, se colocó en las jarras 900 ml de agua cruda. A continuación, se realizaron los cálculos basados en la Ecuación 3.3.1 para determinar el volumen de la solución de polímero que se suministró en cada jarra. Con las jeringas se agregó la dosis óptima del coagulante y usando jeringas de 1 ml se añadió las dosis del floculante.

Durante la mezcla rápida a los 30 segundos se inyectó la dosis óptima del SA. Posteriormente, en la mezcla lenta a los 07:15 minutos se colocó el PC, se trabajó bajo los parámetros de la Tabla 4.4-1 los cuales fueron obtenidos mediante pruebas de campo con diferentes metodologías, luego se dejó sedimentar por 20 minutos. En envases limpios se agregó 100 ml para medir parámetros de TURB, CA y pH. Este proceso se repitió varias veces con las mismas turbiedades para validar la dosis óptima de PC y verificar los resultados. Cabe recalcar que el proceso fue aplicado para SAGA y SAGB. A continuación, con los resultados de las dosis óptimas del PC se graficó las curvas de dosificación del floculante en el programa Microsoft Excel para los tres caudales. Estas gráficas contienen en la ordenada las turbiedades iniciales (agua cruda) y en el eje de las abscisas las dosis del PC para los diferentes coagulantes. Las gráficas anteriores permitieron determinar si existe similitud o diferencia de la dosificación del PC en los dos coagulantes experimentados.

3.3.7 Análisis estadístico para el coagulante y floculante.

El análisis estadístico permitió comparar la relación que tienen las medias de las pruebas solo con coagulante y las pruebas del floculante en conjunto con el coagulante, para demostrar que los datos trabajados en el laboratorio proceden todos de la misma población. Es decir, por medio de este análisis se determinó si los datos de las dosis son similares o existe diferencia significativa (no se asemejan entre sí). El análisis, se realizó a los escenarios que compara las dosis del SAGA con SAGB. Además, se comparó las dosis del PC+SAGA con PC+SAGB obtenidas en el laboratorio, no se utilizó los datos de SAGB en la PTAP debido a que usa una sola dosis de PC para todos los caudales. Antes se determinó si existe normalidad en los datos analizados (dosis óptima), por medio de la prueba de Shapiro-Wilk, debido a que se analizó muestras compuestas que



contienen menos de 50 datos (Mangin & Mallou, 2006). Además, para el contraste de normalidad se trabajó con otro método, por medio de un gráfico de probabilidad llamado Q-Q plots, que se basa en distribuciones de probabilidad. Para aceptar la normalidad de los gráficos Q-Q plots, la distribución de las observaciones tuvo que estar en la línea diagonal de la distribución ideal (Di Rienzo et al., 2005).

Posteriormente se realizó la prueba de Fligner-Killeen que nos permite probar la homogeneidad de varianzas, y se utilizó esta prueba debido a que su sensibilidad es menor a las desviaciones que suponen la normalidad de datos agrupados (Correa et al., 2006).

En las pruebas Shapiro-Wilk y Fligner-Killeen se analizó con un nivel de significancia del 5% (0.05) de acuerdo a las siguientes hipótesis estadísticas:

- H_0 : Hipótesis nula, es decir la variable presenta una distribución normal y homogeneidad de varianzas. Valor de significancia (p-value) > 0.05
- H_1 : Hipótesis alternativa, es decir la variable presenta una distribución no normal y no homogeneidad de varianzas. Valor de significancia (p-value) < 0.05

Después de establecer la normalidad y homocedasticidad de las pruebas con los dos coagulantes, se efectuó el contraste para la prueba t-Student. (Díaz, 2009). Esta prueba estadística coteja las medias entre dos poblaciones relativamente independientes con menos de 30 datos, para encontrar si las medias son significativamente distintas o similares (Turcios, 2015). A continuación, se utilizó el nivel de significancia del 5% con las hipótesis contrastadas siguientes:

- H_0 : Hipótesis nula= No existe evidencia concreta para sustentar que las medias difieren entre grupos, es decir las medias de los grupos son iguales. Valor de significancia (p-value) > 0.05. Valores críticos de t (t-value) < 1.6860 para grados de libertad de 38 y t (t-value) < 1.7341 para grados de libertad de 18 (Turcios, 2015).
- H_1 : Hipótesis alternativa= Existe al menos una media que es significativamente distinta a la otra media poblacional, es decir las medias de los dos grupos no son iguales. Valor de significancia (p-value) < 0.05. Valores críticos de t (t-value) > 1.6860 para grados de libertad de 38 y t (t-value) > 1.7341 para grados de libertad de 18 (Turcios, 2015).

Cabe recalcar, que todas las pruebas estadísticas fueron realizadas en el programa R-Studio, debido a que es un programa diseñado para el análisis estadístico de forma gratuita y con un código abierto.

3.3.8 Eficiencia del coagulante y floculante

a. Eficiencia del coagulante

Para determinar la eficiencia del SAGA y SAGB en el laboratorio, se analizó los datos de los ensayos realizados con los parámetros iniciales y finales de: TURB, CA y pH. Se efectuó una gráfica de líneas tendenciales, que contiene en el eje de las abscisas TURB inicial de agua cruda, en la ordenada derecha el porcentaje de remoción de CA; y en la ordenada izquierda el porcentaje de remoción de TURB y variación de pH. Mediante el gráfico anterior se pudo analizar el comportamiento de los coagulantes respecto a los tres parámetros antes mencionados.

Para calcular los porcentajes de remoción en el agua cruda de TURB, CA y variación de pH, se utilizó la Ecuación 3.3-2 en los tres caudales analizados (Gologan & Popescu 2016).

$$EFRm = \frac{T_m(cruda) - T_m(sedimentada)}{T_m(cruda)} \quad \text{Ecuación 3.3-3: Porcentaje de remoción.}$$

Dónde:

EFRm: Eficiencia promedio general en la reducción de la turbidez

T_m(cruda): Turbidez promedio de agua cruda (NTU)

T_m(sedimentada): Turbidez promedio de agua sedimentada (NTU)

b. Eficiencia del polímero catiónico

Para determinar la eficiencia del PC en el laboratorio, se analizaron los datos de los ensayos realizados con los parámetros iniciales y finales de TURB. El parámetro de CA no se incluyó debido a que en la PTAP después de la floculación no es medido, también no se incluye el pH porque no existe una variación significativa. Con el fin de obtener la eficiencia del floculante se desarrolló una gráfica de líneas tendenciales, que contiene en el eje de las abscisas TURB inicial de agua cruda, en la ordenada derecha dosis del PC y en la ordenada izquierda el porcentaje de remoción de TURB. Mediante estos gráficos se pudo analizar el comportamiento del floculante respecto a los tres parámetros antes mencionados.



Para obtener los porcentajes de remoción de TURB se utilizó la Ecuación 3.3-2 con los tres caudales analizados (Gologan & Popescu 2016). Al final se buscó puntualizar si el polímero es más eficiente al flocular en conjunto con el SAGA o con el SAGB.

3.3.9 Análisis de costos para el coagulante y el floculante

Se realizó este análisis de acuerdo a los costos del coagulante y floculante de las últimas compras públicas de los insumos químicos mencionados (ETAPA EP, 2017b). Para lo cual: 1. se calculó la dosis promedio del coagulante y floculante, luego se multiplicó para cada caudal respectivo; 2. el resultado del primer paso se transformó en Kg/año y se multiplicó por el costo del kilogramo del químico; 3. se obtuvo el costo anual del SA y PC utilizado. Finalmente, se graficó en Microsoft Excel los valores de los caudales en el eje de las abscisas, en la ordenada derecha el costo anual del PC y en la ordenada izquierda el costo anual de los dos coagulantes utilizados en el laboratorio (Suárez, 2005). Con esta gráfica se analizó los valores de los costos anuales para determinar si es viable mantener o sustituir los insumos químicos con el fin de mejorar la eficiencia de los proceso de coagulación y floculación (ETAPA EP, 2017a).

CAPÍTULO IV : RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 EVALUACIÓN DE CONDICIONES HIDRÁULICAS

4.1.1 Caudales de agua cruda

En la Tabla 4.1-1 se presentan las ecuaciones obtenidas de la curva de calibración de sólidos disueltos totales (SDT) con mínimos cuadrados, que permitió convertir los datos de conductividad a SDT para obtener los diferentes caudales con los que se trabajó. Además, el rango de las temperaturas que se analizó se encuentran entre 12 y 15 °C.

Las ecuaciones de la Tabla 4.1-1 fueron utilizadas para transformar los datos obtenidos de la conductividad en datos de concentración de SDT, que fueron usados para obtener los diferentes caudales mediante la prueba de trazadores.

Tabla 4.1-1: *Resultados de la curva de calibración de SDT*

Caudales (l/s)	Ecuación	Temperatura (°C)
1000	$C = 0,49K + 0,0008$	12
950	$C = 0,44K - 0,0004$	15
800	$C = 0,47K - 0,0024$	13

Fuente: Criollo & Lara (2020).

En la Figura 4.1-1 se presenta un análisis de los caudales de ingreso registrados en la PTAP y los caudales de ingreso obtenidos por los métodos de trazadores y molinete. Se obtuvieron valores de caudales de 1000, 950 y 800 l/s.

En la Figura 4.1-1 se puede observar que los caudales totales registrados en la PTAP (barras azules) se mantienen por debajo de los caudales que se realizaron por medio de pruebas con trazadores y molinete. En las pruebas realizadas con trazadores los caudales de los dos canales tuvieron los valores más cercanos al registrado en la PTAP. Además, existe una diferencia entre los valores de los caudales entre los registrados en la PTAP y los caudales en las pruebas de máximo 6 % para las pruebas con trazadores, y máximo 7 % para las pruebas con el molinete. La diferencia se debe a las fluctuaciones del caudal debido a que no es un caudal constante en los canales, también se debe a la turbulencia en la sección de medición de los caudalímetros ultrasónicos que pudo variar el registro de los caudales. Los datos de los caudales registrados en la planta en comparación con los caudales registrados por las pruebas son cercanos, existiendo una diferencia aproximada del 5 % de la variación del caudal, es decir estos datos concuerdan y son

válidos. Los datos de esta Figura se pueden apreciar mejor en la Tabla 7.7-1 (Anexo VII - G).

Según el estudio de González et al. (2015) realizado en la microcuenca del Río San Lorencito, Costa Rica al realizar el aforamiento del río con el método de trazadores y molinete se obtuvo un error del 11 % aproximadamente. Comparando los caudales obtenidos por el método de molinete y los registrados por el método de trazadores en la PTAP existe una diferencia máxima del 3 %. Cabe mencionar que otro factor influyente de la diferencia de caudales se pudo deber a las fluctuaciones de los caudales debido a que los dos métodos fueron realizados en diferentes horas.

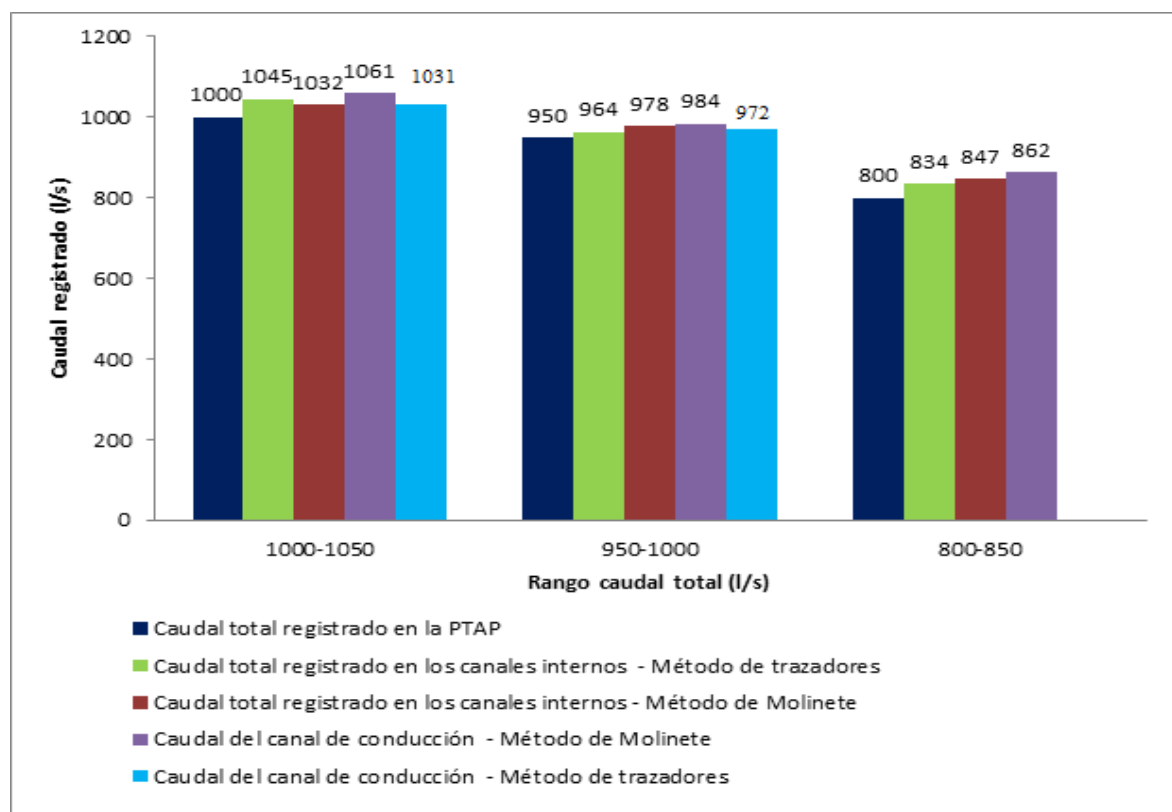


Figura 4.1-1: Análisis del caudal total de ingreso a la PTAP

Fuente: Criollo & Lara (2020).

4.2 EVALUACIÓN DE MEZCLADORES – COAGULACIÓN

El mezclador rápido de la PTAP “El Cebollar” es un canal rectangular con cambio de pendiente, como se puede observar en la Figura 4.2-1 y las dimensiones del canal se presentan en la Tabla 4.2-1

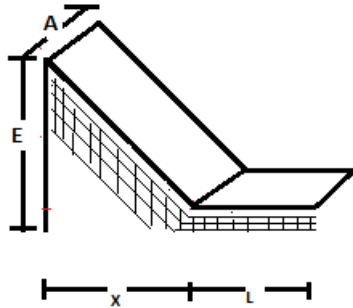


Figura 4.2-1: Canal rectangular con cambio de pendiente
Fuente: Criollo, Lara (2020).

En la Tabla 4.2-1 se presentan las dimensiones de la unidad de mezcla rápida: largo, ancho y profundidad del canal.

Tabla 4.2-1: Dimensiones del canal rectangular con cambio de pendiente.

	Dimensión
Largo de la rampa (X)	2.49 m
Largo del canal (L)	2.20 m
Ancho de la rampa (A)	2.10 m
Profundidad del canal (E)	1.90 m

Fuente: Criollo & Lara (2020).

4.2.1 Tiempo de retención teórico y real

a) Tiempo de retención teórico

$$V: 3100 \text{ (l)}$$

$$Q: 1000 \left(\frac{\text{l}}{\text{s}} \right)$$

$$t = \frac{3100 \text{ (l)}}{1000 \left(\frac{\text{l}}{\text{s}} \right)} = 3.1 \text{ s}$$

b) Tiempo de retención real

Con las dimensiones de la mezcla rápida se obtuvo los siguientes resultados para el peso del trazador:

$$k = 1,65$$

$$V = 4 \text{ m}^3$$

$$C_o = 30 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

$$l = 0.985$$

$$P = \frac{4 \text{ m}^3 * 1.65 * 30 \frac{\text{mg}}{\text{l}}}{0.985 * 10^3} = 0.2010 \text{ Kg}$$

Se obtuvo un peso de 0.201 kg de NaCl con una concentración de 30 (mg/l) y se diluyó en un recipiente con un volumen de 43 litros para realizar la incorporación en la mezcla rápida.

Después de realizar la prueba de trazadores en la mezcla rápida, se alcanzó una concentración máxima de NaCl (sal común) que fue a los 3 segundos con una

conductividad eléctrica (K) de 333 (uS/cm). El tiempo de retención se puede ver en la Figura 7.11-1 (Anexo VII-K).

Además, se realizó otra prueba de trazadores en la mezcla rápida, donde se midió directamente la conductividad. El resultado fue un promedio de 4 pruebas realizadas, cuyo tiempo fue 2.14 segundos, es decir un valor similar a las pruebas con recolección de muestras (3 s) y al tiempo teórico (3.1 s). Estos dos valores son cercanos a la literatura descrita para la coagulación por barrido en el rango de 1 a 7 segundos. Este proceso de mezcla rápida está bajo los parámetros bibliográficos, y donde se puede producir fácilmente la desestabilización de la carga electrostática para promover la formación del hidróxido.

4.1.2 Intensidad de la mezcla rápida

En la Figura 4.2-2 se presentan los elementos necesarios a considerar para calcular la pérdida de carga de un canal rectangular con cambio de pendiente

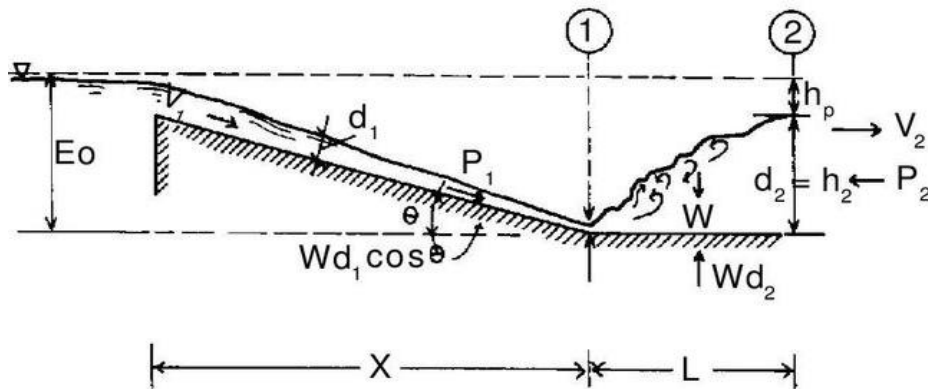


Figura 4.2-2: Simbología para las dimensiones del canal rectangular con cambio de pendiente. Fuente: Vargas (2005a).

Para calcular la pérdida de carga se utilizó las siguientes ecuaciones:

- Cálculo del caudal por unidad de ancho del canal:

$$Q = 1000 \frac{l}{s} = 1 \frac{m^3}{s}$$

$$q = \frac{Q}{B}$$

Q : Caudal de operación (m^3/s)

B : Ancho del canal rectangular con cambio de pendiente (m^2/s)

$$q = \frac{1 \frac{m^3}{s}}{2.10m} = 0,48 \frac{m^2}{s}$$

- Cálculo de altura 1 (h_1):

Profundidad del canal $E_o = 1.90m$

$$\cos \theta = -\frac{g q}{\left(\frac{2 g E_o}{3}\right)^{1.5}}$$

$$\cos \theta = -\frac{9.8 \frac{m}{s^2} * 0.48 \frac{m^2}{s}}{\left(\frac{2 * 9.8 \frac{m}{s^2} * 1.90m}{3}\right)^{1.5}}$$

$$\theta = 96.17$$

$$E_1 = E_o = \frac{q}{V_1} + \frac{V_1^2}{2g}$$

$$V_1 = 2 \sqrt{\frac{2 * g * E_o}{3} \cos \frac{\theta}{3}}$$

$$V_1 = 2 \sqrt{\frac{2 * 9.8 \frac{m}{s^2} * 1.90m}{3} * \cos \frac{96.17}{3}} = 5.96 \frac{m}{s}$$

$$V_1 = \frac{q}{h_1}$$

- Despejando h_1 :

$$h_1 = \frac{0.48 \frac{m^2}{s}}{5.96 \frac{m}{s}} = 0.08 m$$

- Cálculo del número de Froude:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g h_1}}$$

$$F_1 = \frac{5.58 \frac{m}{s}}{\sqrt{9.8 \frac{m}{s^2} * 0.08 m}} = 6.3$$

- Cálculo h_2 :

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)$$

$$h_2 = \frac{0.08m}{2} \left(\sqrt{1 + (8 * 6.3^2)} - 1 \right) = 0.66m$$

- Pérdida de carga:

$$H = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1h_2}$$

$$H = \frac{(0.66m - 0.08)^3}{4(0.08)(0.66)} = 0.92m$$

La temperatura del agua es aproximadamente 13 °C, en base a este valor se determinó la relación de la temperatura ($\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$). Por interpolación se obtuvo:

$$y_x = 2737 + \frac{13 - 10}{15 - 10} (2920 - 2737)$$

$$y_x = 2846,8$$

$$\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} = 2846,8$$

- Calculada la pérdida de carga, el gradiente de velocidad se calculó según la Ecuación 3.2-12.

Entonces:

$$H = 0.92m$$

$$T_R = 3 s$$

$$G = 2846,8 * \sqrt{\frac{0.92m}{3 s}} = 1576.48 s^{-1}$$

El resultado del gradiente fue $1576.48 s^{-1}$ y el número de Froude de 6.3, según Vargas (2004d) este tipo de mezcladores puede llegar a un máximo $1300 s^{-1}$ y entre 4.5 a 9 el número de Froude. Hay que recalcar que se trabajó con los datos de operación del caudal total máximo (1000 l/s) de la PTAP, y como consecuencia se incrementa el gradiente al límite, debido a que a mayor caudal mayor es el gradiente de velocidad. Sin embargo, el resultado del gradiente rodea el valor máximo que debería presentar este tipo de mezclador y el resultado del número de Froude se encuentra dentro del rango.

Para encontrar las rpm, según el gradiente de velocidad y aplicar las pruebas de jarras, se utilizó la Figura 7.8-1 (Anexo VII - H). En las pruebas de jarras se necesitó valores de rpm que correspondan a un gradiente de velocidad de $1576.48 s^{-1}$ en 3 s, pero en la Figura 7.8-1 no presenta este valor, por lo que se eligió el valor máximo de 300 rpm durante 30 s.

En el estudio de Al-Husseini et al. (2019) se evaluó el resalto hidráulico para determinar la eficiencia de la coagulación dependiendo del tiempo y del gradiente de velocidad. Los resultados de Al-Husseini et al. (2019) sugieren que cuando el gradiente se encuentra en un rango de $800 a 1500 s^{-1}$ y el tiempo es de 2 segundos, la remoción de TURB es

máxima. Comparando con los resultados de la PTAP “El Cebollar”, el tiempo de retención es de 3 s y el gradiente de velocidad es de 1576 s^{-1} , estos valores están dentro del rango establecido por Al-Husseini et al. (2019) para que la remoción de la TURB tenga una eficiencia mayor. Se dedujo que el resalto hidráulico tiene un proceso óptimo con respecto al gradiente de velocidad y tiempo de retención de la mezcla rápida.

4.3 EVALUACIÓN DE LOS FLOCULADORES

4.3.1 Geometría de la unidad

a. Dimensiones de los floculadores

En la Tabla 4.3-1 se describe las dimensiones de las unidades de floculación 1 y 2.

Tabla 4.3-1: Dimensiones de los floculadores 1 y 2

Numero de floculador	Dimensiones: ancho- profundidad (m)	Largo- Volumen total del floculador (m^3)
1	20.16 - 14.27 - 1.50	431.52
2	20.16 - 15.69 - 1.50	474.46

Fuente: Criollo & Lara (2020).

En la Figura 4.3-1 se muestra las dimensiones del Floculador 1 y del Floculador 2 en una vista de planta. Además, podemos observar que el flujo es horizontal, tipo hidráulico en los dos Floculadores.

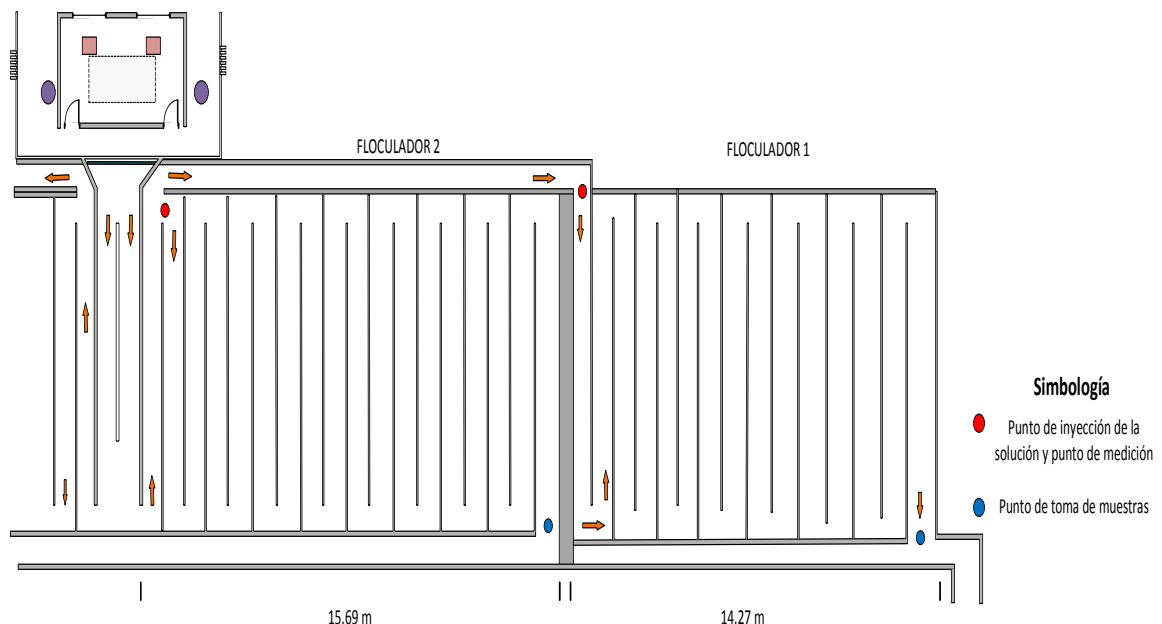


Figura 4.3-1: Vista de planta del Floculador 1 (derecha) y Floculador 2 (izquierda).

Fuente: Criollo & Lara (2020).

b. Inspección del número de pantallas y compartimentos

En la Tabla 4.3-2 se presenta un resumen del número de pantallas y compartimentos de los floculadores.

Tabla 4.3-2: *Resumen del número de pantallas y compartimentos*

	Floculador 1	Floculador 2
Número de pantallas	14	16
Numero de compartimentos	15	17

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Cálculo del número de pantallas y compartimentos

Floculador 1:

$$\begin{aligned}
 I &= 309.15 \text{ m} \\
 B &= 20.16 \text{ m} \\
 N &= 15 \\
 Np &= N - 1
 \end{aligned}
 \qquad
 \begin{aligned}
 N &= \frac{I}{B} \\
 Np &= 15 - 1
 \end{aligned}
 \qquad
 \begin{aligned}
 N &= \frac{309.15 \text{ m}}{20.16 \text{ m}} = 15.33 \\
 Np &= 14
 \end{aligned}$$

Floculador 2:

Tabla 4.3-3: *Resultados del cálculo del número de compartimentos y pantallas*

N	17.37
Np	16

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Resultados:

Mediante la Ecuación 3.2-13, se obtuvo que el número de compartimentos fue de 15 (floculador 1) y 17 (floculador 2), al ser comparados estos resultados con el número de compartimentos de la PTAP coinciden. Así mismo, el número de pantallas de concreto en la PTAP concuerdan con el número de pantallas calculadas. Se comprobó que el diseño de los compartimentos y pantallas de las unidades de floculación están dimensionadas correctamente. Además, se determinó que las estructuras físicas de las pantallas no se encuentran fisuradas, permitiendo que el agua fluya constantemente sin desbordamiento entre compartimentos.

4.3.2 Caudales de operación en los floculadores

Método de dilución con trazadores y método área velocidad (molinete)



En la Tabla 4.3-4, se muestra los resultados obtenidos con el método de trazadores como con el método de área velocidad en cada uno de los floculadores. Además, se presentan los caudales registrados en la PTAP con el fin de comparar la distribución en dichas unidades.

Se pudo determinar mediante las pruebas con trazadores y molinete, que los dos primeros floculadores trabajan con aproximadamente entre el 41 y 56 % del caudal total que ingresa a la PTAP. También, se pudo determinar que el floculador 3 es la unidad en la que menos caudal ingresa, entre un 14% y 18 % del caudal total de operación. Además, se constató que existe una diferencia máxima de 3 % entre los caudales registrados en la PTAP con los caudales obtenido en las pruebas con trazadores y molinete. Este comportamiento fue similar a los caudales de ingreso en el canal de conducción y canales internos, es decir, existe un rango de fluctuaciones de caudales en la PTAP. Son varios factores que podrían alterar los valores de las pruebas en los caudales: reacción del trazador con los lodos acumulados en los floculadores, retención del trazador en los espacios muertos o cortocircuitos, turbulencia del agua en el punto de muestreo del molinete y pérdidas de agua en el trayecto desde los caudalímetros hasta los floculadores.

Según el estudio de González et al. (2015) al comparar los métodos de dilución de trazadores con área velocidad se obtuvo una diferencia del 11 % y con los resultados obtenidos en la PTAP “El Cebollar” con los mismos métodos se observa que hay una diferencia máxima del 5 % en los tres caudales analizados. Sin embargo, la diferencia entre los caudales que registran los caudalímetros de la PTAP y las pruebas ejecutadas, es menor con el método de disolución con trazadores, por este motivo para la realización de los tiempos de retención teórico en los floculadores se utilizarán los valores de este método.



Tabla 4.3-4: Resultados de los métodos utilizados para determinar el caudal en cada floculador

Método de trazadores					Método de molinete				
Caudal total registrado en la PTAP (l/s)	Caudal registrado en la prueba (l/s)	Número del Floculador	Caudal del floculador (l/s)	Porcentaje del caudal en cada floculador (%)	Caudal total registrado en la PTAP (l/s)	Caudal registrado en la prueba (l/s)	Número del Floculador	Caudal del floculador (l/s)	Porcentaje del caudal en cada floculador (%)
1050 - 1000	996	1	209	21	1050 - 1000	1055	1	220	25
		2	195	20			2	198	23
		3	175	18			3	145	17
		4	197	20			4	160	18
		5	220	22			5	151	17
1000 - 950	960	1	214	22	1000 - 950	1010	1	244	24
		2	205	21			2	237	23
		3	161	17			3	160	16
		4	180	19			4	185	18
		5	200	21			5	184	18
850 - 800	841	1	243	29	850 - 800	874	1	255	24
		2	225	27			2	245	23
		3	118	14			3	170	16
		4	124	15			4	195	18
		5	131	16			5	190	18

Fuente: Criollo & Lara (2020).

4.3.3 Tiempo de retención

a. Tiempo de retención real

El peso del trazador en el floculador 1 fue de 13 kg para un volumen de 258.91 m^3 y se realizaron 6 pruebas para determinar el tiempo para cada caudal. El resultado obtenido fue un promedio de los tiempos de retención en todas las pruebas. Los resultados fueron usados para las pruebas de jarras dentro del laboratorio. Además, existe un canal de conducción que lleva el agua de la mezcla rápida hacia el floculador 1 con un tiempo de retención de 1,38 minutos que también se tomó en cuenta a escala del laboratorio.

El peso del trazador para el floculador 2 fue de 14 kg. Además, existe un recorrido del agua desde la mezcla rápida hasta el floculador 2 por medio de un canal, donde se obtuvo un tiempo de retención de 55 segundos. En la Tabla 4.3-5, se presenta un resumen de las pruebas de trazadores realizados en el floculador 1 y en el floculador 2, también incluyen datos de caudal, conductividad, temperatura y tiempo de retención.

Tabla 4.3-5: *Resumen pruebas de trazadores floculadores 1 y floculador 2*

	Floculador 1			Floculador 2		
Caudal total registrado en la PTAP (l/s)	1000	950	800	1000	950	800
Conductividad agua del floculador (uS/cm)	100	116.5	106	106.3	106	112.2
Conductividad Solución (NaCl+H ₂ O) (mS/cm)	251	251	251	250	250	253
Temperatura (°C)	17.4	14.9	14.6	13.5	14.6	14.9
Tiempo de retención (min)	20	18.3	16.3	22.3	21.3	19

Fuente: Criollo & Lara (2020).

b. Tiempo de retención teórico

Floculador 1

Para determinar el tiempo teórico para los tres caudales estudiados se utilizó la Ecuación 3.2-9.

$$v_f = 256.74 \text{ m}^3$$

$$v_p = 0.15 * 0.90 * 14 = 1.89 \text{ m}^3$$

$$v_t = 256.74 - 1.89 = 254.85 \text{ m}^3$$

$$Q = 0.243 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$T_0 = \frac{254.85 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.243 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} = 1048.76 \text{ s} \rightarrow 17.47 \text{ minutos}$$

El tiempo de retención teórico anterior corresponde al caudal de 800l/s del floculador 1. Se procedió a realizar los mismos cálculos para los tres caudales de operación, en la Tabla 4.3-6 se presentan un resumen de los resultados para caudales de 1000, 950 y 800 l/s

Tabla 4.3-6: *Resultados de tiempo de retención teórico para los caudales trabajados*

Floculadores	Caudales totales de operación de la PTAP (l/s)	Volumen total de la unidad (m^3)	Volumen de las pantallas de concreto (m^3)	Volumen útil de la unidad (m^3)	Caudal de operación del floculador (m^3/s)	Tiempo de retención (min)
1	1000	241.75	1.89	239.86	0.209	19.12
	950	245.51	1.89	243.62	0.214	18.97
	800	256.74	1.89	254.85	0.243	17.47
2	1000	250.78	1.89	248.89	0.195	21.27
	950	255.42	1.89	253.53	0.205	20.61
	800	270.40	1.89	268.51	0.225	19.88

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Los tiempos de retención reales y teóricos son cercanos con una variación aproximada de 1 minuto. También, se deduce que cuando los tiempos de retención se incrementan disminuye el caudal, como ocurrió en los floculadores con caudales de 209 l/s el tiempo fue de 19 minutos y al incrementar el caudal a 243 l/s el tiempo de retención disminuyó a 17 minutos. En el estudio realizado por Najul & Blanco S, (2014) se compararon varias PTAP convencionales con caudales máximos 4500 l/s y 2200 l/s, los tiempos de retención son 26 y 29 minutos respectivamente. Estos resultados coinciden con las tendencias de los tiempos de retención en los floculadores en la PTAP “El Cebollar”, cuando se reduce el caudal en el floculador aumenta el tiempo de retención y viceversa, además estos resultados coinciden con la literatura descrita anteriormente. Sin embargo, cuando se reduce el caudal de operación total que ingresa a la PTAP el tiempo de retención debería incrementarse, pero no ocurre esto, debido al manejo de las compuertas en los floculadores que son usados para mantener el caudal total de ingreso en un 50 % en los floculadores 1 y 2 y el otro 50 % en los floculadores 3,4 y 5. Los datos de los caudales que se obtuvieron con el uso de trazadores fueron utilizados en las pruebas de jarras, porque representan los tiempos de los procesos de floculación en la PTAP “El Cebollar”.

4.3.4 Intensidad de la floculación

En la Figura 4.3-2 se visualiza el corte longitudinal del floculador 1, donde se puede apreciar la pantalla de agua (línea celeste) que se forma por la pérdida de carga del agua.

De igual manera en la Figura 7.3-1 (Anexo VII - C) se visualiza el corte longitudinal del floculador 2.

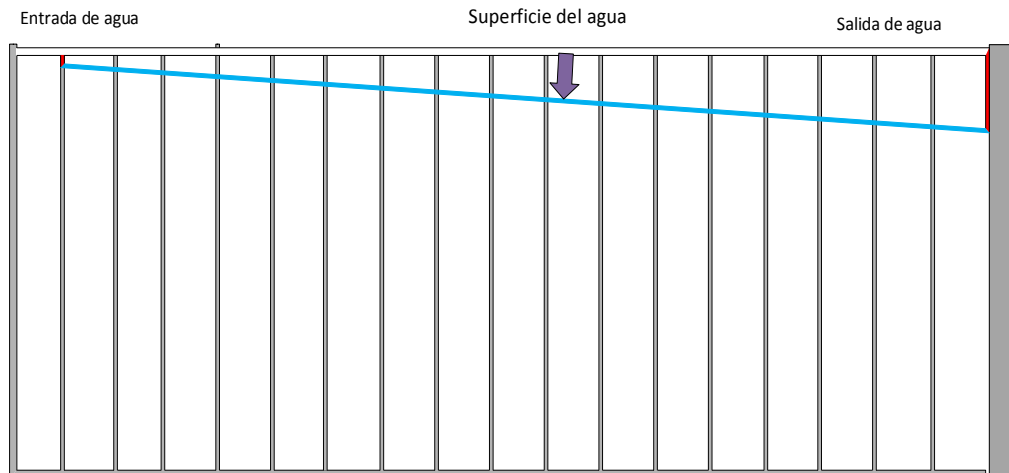


Figura 4.3-2: Pérdida de carga del floculador 1 (corte longitudinal)

Fuente: Criollo & Lara (2020).

En la Tabla 4.3-7 se presentan los resultados de la pérdida de carga, gradiente de velocidad y las revoluciones por minuto para los tres caudales trabajados en la PTAP.

Tabla 4.3-7: Pérdida de carga y gradiente de velocidad con los caudales de 1000, 950 y 800 l/s

Flocu- ladores	Caudal de operación	Nivel del agua H1 (cm)	Nivel del agua H2 (cm)	Pérdida de carga (m)	Relación de temperatura $\sqrt{\frac{\gamma}{\mu'}}$	Gradiente de velocidad en planta (s^{-1})	Revoluciones por minuto (jar test) (rpm)
1	1000 $\frac{l}{s}$	60.5	42	0,185	2920	36,3	63
	950 $\frac{l}{s}$	60.8	41	0.198	2920	39	65
	800 $\frac{l}{s}$	83	62	0.21	2883.4	39.9	66
2	1000 $\frac{l}{s}$	53	74	0,22	2920	37,3	64
	950 $\frac{l}{s}$	53	76.6	0.235	2920	39,4	66
	800 $\frac{l}{s}$	86	61	0.25	2883.4	40.3	67

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Según la literatura descrita establece que, al reducir el caudal, el gradiente de velocidad se reduce, al compararlo con los resultados obtenidos en este estudio se observó una tendencia similar. En los floculadores 1 y 2, al reducir el caudal entre 243 a 195 l/s se observó una disminución del gradiente de velocidad de 40.3 a 36.3 s^{-1} . Según Romero (2006b) los parámetros para obtener una mayor eficiencia en la floculación deben tener un gradiente de velocidad superior a 20 s^{-1} y un tiempo de retención de 15 a 60 min, en las pruebas realizadas se obtuvieron resultados dentro de estos parámetros. Demostrando

que la floculación en esta PTAP mantiene un proceso que concuerda con la literatura descrita, de esta manera fue posible trabajar en las pruebas de jarras con las rpm, así como con los tiempos obtenidos en los dos floculadores.

4.3.5 Características hidráulicas (evaluación de la eficiencia hidráulica y tipo de flujo en el floculador)

a. Análisis por el método de la curva de tendencia

En la Figura 4.3-3 se presenta la curva de distribución de los tiempos de retención hidráulica del floculador 1 para un caudal de 1000 l/s, donde se observa la variación de la conductividad respecto al tiempo; en esta figura se puede observar el tiempo de retención real y el tiempo cuando la conductividad retorna a sus condiciones iniciales.

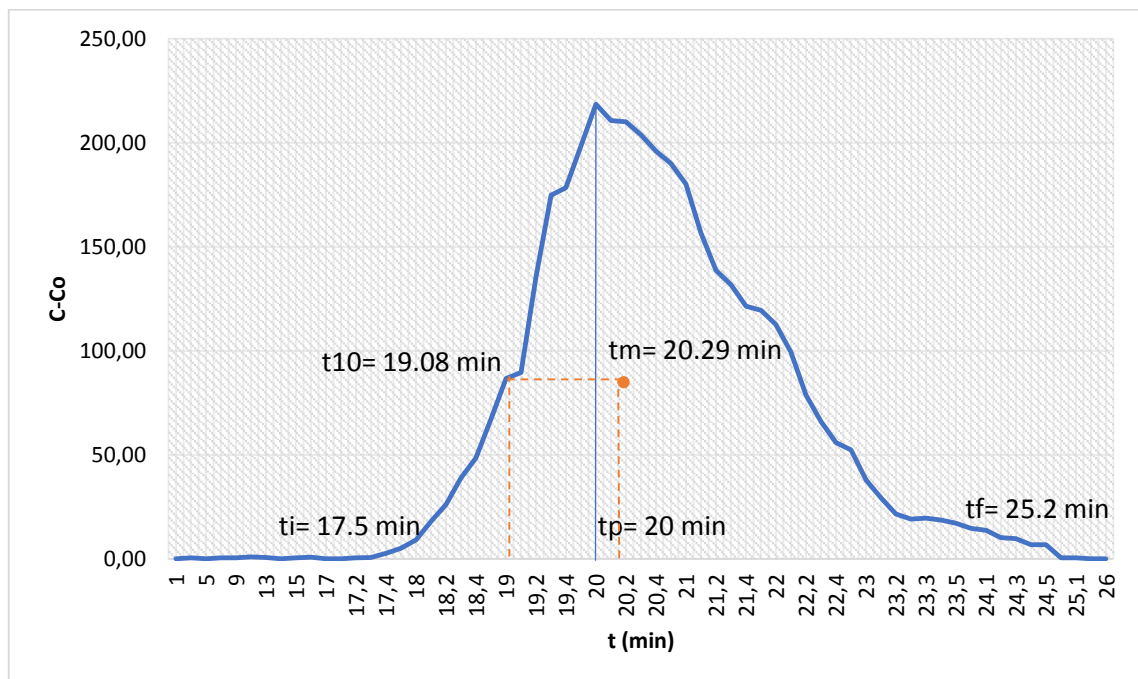


Figura 4.3-3: Curva de tendencia para un caudal de 1000 l/s en el floculador 1.
Fuente: Criollo & Lara (2020).

En la Figura 4.3-3 se puede observar que la curva es más alargada después de t_p (tiempo modal), y según Pérez & Torres, (2008) cuando la curva tiene un desplazamiento hacia la izquierda o derecha existe presencia de zonas con turbulencia y recirculaciones dentro del sistema. Estas zonas podrían deberse a la presencia de gran cantidad de lodos o grietas en las pantallas que retienen el trazador, y a lo largo del tiempo el trazador se va incorporando nuevamente al flujo del agua. Este comportamiento fue similar a las curvas

de tendencias de 950 y 800 l/s (floculador 1) y también al caudal de 800 l/s (floculador 2).

Para los dos caudales de 1000 y 950 l/s (floculador 2) se pudo determinar que el comportamiento fue semejante entre ellos, es decir, la rama descendente después de t_p fue similar a la rama ascendente antes de t_p . Esto se puede validar gracias a la ubicación del centroide (t_m), que, aunque tiene una tendencia hacia la izquierda, su valor no es muy diferente del t_p donde se registra la conductividad más alta.

En las Figuras de los caudales de 1000, 950 y 800 l/s se pudo observar que las curvas tenían picos y según el estudio de Rojas & García, (2010b), se debe a zonas muertas como ya se mencionó anteriormente. En resumen, se pudo comprobar que la unidad de floculación 2 trabaja en mejores condiciones que la unidad de floculación 1, debido a que los tiempos modales se encuentran más alejados de los tiempos medianos en el floculador 1 en comparación con el floculador 2. En las Figuras 7.11-2, 7.11-3, 7.11-4, 7.11-5 y 7.11-6 (Anexo VII-K) se pueden observar las curvas de tendencia de los demás caudales trabajados en la PTAP “El Cebollar”.

En la Tabla 4.3-8 se muestran los resultados de cada uno de los parámetros analizados dentro de curva de tendencia.

Tabla 4.3-8: *Resultados de los parámetros para la curva de distribución de los tiempos de retención hidráulica*

Flocu- ladores	Caudales (l/s)	t_i (min)	t_{10} (min)	t_p (min)	t_m (min)	t_o (min)	t_{90} (min)	t_f (min)	C_o (mg/l)	C_p (mg/l)
1	1000	17.5	19.08	20	20.29	22.15	22.22	25.2	49	267.54
	950	16	17.51	18.3	18.52	18.84	19.97	23.2	51.26	192.60
	800	10	15.34	16.3	16.35	15.24	18.13	22.3	51.32	251.45
2	1000	12	20.41	22.3	22.15	20.11	24.34	30	49.82	242.05
	950	13	20.06	21.3	21.18	21.63	22.70	29	50.88	355.68
	800	17	17.75	19	19.05	21.83	20.24	25	50.60	262.66

Fuente: Criollo & Lara (2020).

En la tabla 4.3-8 se presenta los resultados de los parámetros analizados en la curva de tendencia, donde se puede visualizar que los valores de t_{10} son cercanos, alrededor de 17 y 20 minutos. Estos tiempos son característicos en los floculadores hidráulicos debido que trabajan con flujos pistón y mezclado, con excepción del caudal de 800 l/s (floculador 1) que tuvo un valor de t_{10} de 15.34 minutos, que influyó en el tiempo final t_p . Además,

se pudo observar una pequeña variabilidad entre el tiempo teórico (t_o) y el tiempo de retención real (t_p), es decir hay zonas muertas mínimas en los floculadores. Esta variabilidad entre (t_o) y (t_p) se debe a factores ya antes mencionados como: turbulencia y precisión con la inyección instantánea del trazador.

Tabla 4.3-9: Resultados de los criterios para analizar la curva de tendencia para un caudal de 1000 l/s.

Floculadores	Criterios para analizar la curva de tendencia	1000 l/s	950 l/s	800 l/s
1	$\frac{t_i}{t_o}$	0.79	0.84	0.65
	$\frac{t_m}{t_o}$	0.91	0.98	1.07
	$\frac{t_p}{t_o}$	0.90	0.97	1.06
	$e = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_i)}{t_o}$	0.121	0.138	0.018
	$\frac{t_i}{t_o}$	0.59	0.60	0.77
	$\frac{t_m}{t_o}$	1.10	0.97	0.87
2	$\frac{t_p}{t_o}$	1.10	0.98	0.87
	$e = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_i)}{t_o}$	-0.22	-0.02	0.18

Fuente: Criollo & Lara (2020).

- $\frac{t_i}{t_o}$: En los dos floculadores se constató que tienden a flujo pistón y no existe paso directo del trazador entre la entrada y salida.
- $\frac{t_m}{t_o}$: En el floculador 1 (1000 y 950 l/s) y floculador 2 (950 y 800 l/s) existe presencia de una pequeña fracción de cortocircuitos hidráulicos debido a que los valores están cercanos a 1. Para el caudal de 800 l/s (floculador 1) existen zonas donde el trazador permanece un tiempo en la unidad y paulatinamente va saliendo. Por lo tanto, t_m (tiempo mediano) se incrementa y se desplaza el centroide del área bajo la curva, además la línea descendente de la curva se alarga. Para el caudal de 1000 l/s (floculador 2) existen zonas de espacios muertos.
- $\frac{t_p}{t_o}$: Tanto para el floculador 1 como para el floculador 2 se concluye que existe predominio de flujo pistón porque tiende a 1 esta relación.

- $e = \frac{(t_f - t_p) - (t_p - t_i)}{t_o}$: Indica la presencia predominante de flujo pistón en las unidades de floculación.

b. Modelo simplificado de Wolf-Resnick

A continuación, en la Figura 4.3-4 se presenta el análisis del modelo simplificado de Wolf-Resnick para el floculador 1 con un caudal de 1000 l/s. Las gráficas de los caudales de 1000, 950 y 800 l/s se pueden ver en las Figuras 7.10-1, 7.10-2, 7.10-3, 7.10-4 y 7.10-5 (Anexo VII - J).

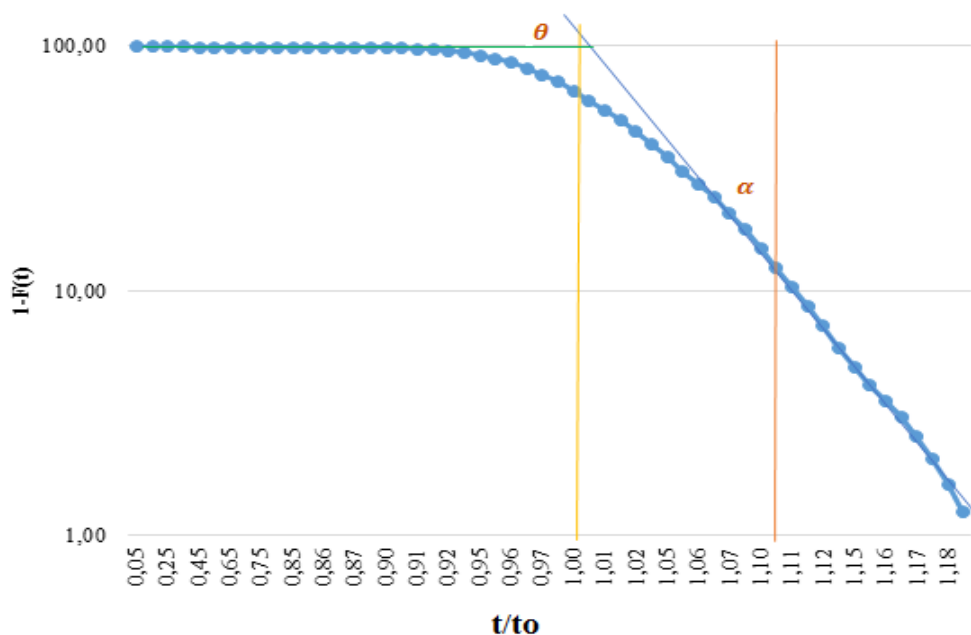


Figura 4.3-4: Método de Wolf - Resnick para un caudal de 1000 l/s en el floculador 1
Fuente: Criollo & Lara (2020).

A continuación, se presentan los resultados del flujo pistón, flujo mezclado y espacios muertos para el caudal de 1000 l/s en el floculador 1.

La Figura del método de Wolf-Resnick muestra los siguientes datos:

$$\theta = \frac{t_1}{t_0} = 1$$

$$\alpha = \frac{t_2}{t_0} = 1.105$$

Con la Ecuación 3.2-24 se obtuvo tan α :

$$\tan \alpha = \frac{1}{1.105 - 1} = 9.5238$$

Cálculo del flujo pistón del floculador 1 con la Ecuación 3.2-20:

$$P = \frac{1 * 9.5238}{0.43429 + 1 * 9.5238} = 0.9563 \rightarrow 95.63\%$$

Cálculo del flujo mezclado del floculador 1 con la Ecuación 3.2-21:

$$M = 1 - 0.9563 = 0.0437 \rightarrow 4.37\%$$

Cálculo de los espacios muertos del floculador 1 con la Ecuación 3.2-22:

$$m = 1 - \frac{1}{0.9563} = -0.04569 \approx 0\%$$

En la Tabla 4.3-10 se presentan los resultados del método de Wolf – Resnick aplicado a los caudales de 1000, 950 y 800 l/s.

Tabla 4.3-10: *Resultados del método de Wolf -Resnick*

Floculadores	Caudal del floculador (l/s)	θ	$\frac{t_2}{t_0}$	$\tan \alpha$	P Flujo pistón	M Flujo mezclado	M Espacios muertos
1	209	1	1.105	9.5238	0.956 →95.63 %	0.043 →4.37 %	- 0.04569≈ 0%
	214	1.02	1.11	11.11	0.9630 → 96.30 %	0.037 → 3.7 %	-0.0591 ≈ 0%
	243	0.94	1.02	12.5	0.9643 → 96.43%	0.0357 → 3.57%	0.0251 ≈ 0%
2	195	1.17	1.37	5	0.9308 → 93.92 %	0.0692 → 6.92%	-0.2569 ≈ 0%
	205	1.16	1.24	12.5	0.9709 → 97.09 %	0.0290 → 2.90%	-0.1947 ≈ 0%
	225	1.03	1.07	25	0.9834 → 98.34%	0.0165 →1.6585%	-0.0473 ≈ 0%

Fuente: Criollo & Lara (2020).

En todos los caudales de los dos floculadores se determinó que el flujo pistón predomina con valores superiores al 93 % y el flujo mezclado es menor al 7 %, según los estudios de Rojas & García, (2010), la presencia del flujo pistón quiere decir que la solución pasa en la misma secuencia que fue introducida, mientras que el flujo mezclado se da cuando la solución se dispersa en el floculador. Como se observa en la PTAP “El Cebollar” hay

un porcentaje tanto de flujo pistón como de flujo mezclado, pero con predominio a flujo pistón. Además, se verificó que a medida que se incrementa el caudal en los floculadores también lo hace el flujo pistón.

En el estudio realizado por Rojas & García, (2010) se menciona que con menor porcentaje de zonas muertas la eficiencia se incrementa, en la PTAP “El Cebollar” la presencia de volumen de espacios muertos tiende a cero lo que significa que existe zonas muertas mínimas y tiempos de retención óptimos.

c. Índice de Morrill

A continuación, se presentan la Figura 4.3-5 el índice de Morrill para un caudal de 1000 l/s del floculador 1. Los índices para los demás caudales se pueden observar en las gráficas 7.12-1, 7.12-2, 7.12-3, 7.12-4 y 7.12-5 (Anexo VII – L).

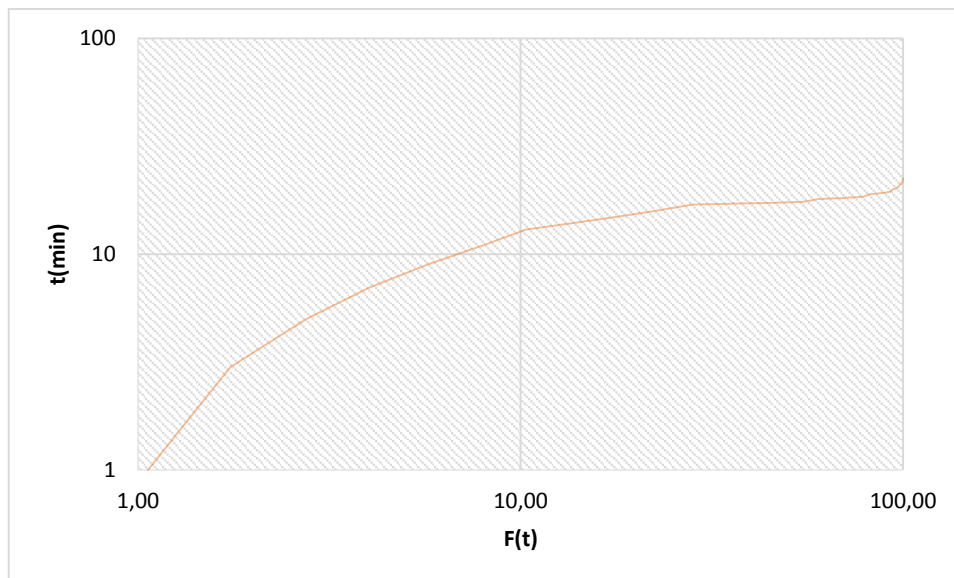


Figura 4.3-5: Índice de Morrill para un caudal de 1000 l/s en el floculador 1.
Fuente: Criollo & Lara (2020).

La curva de la Figura 4.3-5 adquiere una tendencia horizontal, es decir mantienen una presencia predominante de flujo pistón. Sin embargo, no es un sistema idealizado como flujo pistón con un valor del Índice de Morrill de 1 y una curva totalmente horizontal, porque tuvo presencia de cortos circuitos hidráulicos.

En la Tabla 4.3-11 se presentan los valores del Índice de Morrill para los caudales trabajados en las dos unidades de floculación para contrastar la información de la Figura 4.3-5.

Tabla 4.3-11: *Resultados del índice de Morrill*

Floculadores	Caudal total de operación (l/s)	Índice de Morrill
1	1000	1.16
	950	1.140
	800	1.18
2	1000	1.192
	950	1.131
	800	1.140

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Como se pudo apreciar en la Tabla 4.3-11 todos los valores son cercanos a la unidad de tal manera que los floculadores tienen flujo pistón, pero no ideal, es decir t_p no es igual a t_0 . Además, se verificó que el tiempo real de retención y el tiempo de retención teórico son relativamente cercanos, constatando que el proceso de floculación funciona de manera eficiente. Tal como se puede observar los resultados coinciden con la curva de tendencia y con el método Wolf – Resnick.

4.4 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA

4.4.1 Condiciones de operación de las pruebas de jarras

En la Tabla 4.4-1, se presentan las condiciones de operación del equipo de jarras: los tiempos utilizados en la mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentación para cada caudal trabajado. Los tiempos de retención y velocidades en rpm se obtuvieron mediante un promedio de los resultados de los dos floculadores.

Tabla 4.4-1: *Condiciones de calibración del equipo*

Equipo de jarras	Caudales totales de operación (l/s)					
	1000		950		800	
	Tiempo de retención (min)	Velocidad en rpm	Tiempo de retención (min)	Velocidad en rpm	Tiempo de retención (min)	Velocidad en rpm
Mezcla rápida	0.5	300	0.5	300	0.5	300
Mezcla lenta	21	64	19	66	18	67
Sedimentación	20	-	20	-	20	-

Fuente: Criollo & Lara (2020).



Para la obtención del tiempo de retención de 20 minutos en la sedimentación, se realizó varias pruebas con trazadores en el sedimentador 1. En las pruebas de trazadores que fueron realizadas se obtuvo que los tiempos desde el ingreso del sedimentador hasta el inicio de las unidades de filtración fueron de 20, 20, 21 y 26 minutos. Se eligió el valor promedio de 20 minutos, porque las tres primeras pruebas tuvieron valores similares y cercanos, la prueba número 4 fue descartada porque se encuentra fuera del rango del tiempo que según Romero, (2006c) para decantadores de alta tasa (15 a 25 minutos).

4.4.2 Ensayo de jarras para coagulante y floculante

a. Ensayo de jarras con diferentes dosis de SAGA y SAGB

A continuación, se presentan los datos obtenidos en las pruebas de jarras para el tratamiento de SAGB y SAGA. Las pruebas fueron replicadas para comprobar si los valores obtenidos son similares.

Con un caudal de 1000 (l/s) se realizaron 23 pruebas de jarras para el SAGB y 20 pruebas de jarras para el SAGA, en diferentes fechas. En las Tablas 7.14-1 y 7.14-2 (Anexo VII - N) se pueden apreciar los resultados.

En la Figura 4.4-1 representa la curva de dosificación exponencial para los dos tipos de coagulantes con turbiedades en un rango de 2 a 500 NTU con una proyección de la curva hasta los 800 NTU. Las dosificaciones varían entre 10 a 50 mg/l en todas las pruebas, de tal manera que los valores están dentro de los parámetros de dosificación normales según la literatura descrita. Sin embargo, la curva realizada con los datos de la PTAP “El Cebollar” (color verde) con las mismas turbiedades la dosificación es mayor entre 2 y 6 mg/l promedio, existen varios factores influyentes para esta diferencia: las condiciones hidráulicas para cada caudal no consideradas en las pruebas de jarras efectuadas en la PTAP y la eficiencia de los dosificadores de coagulante. Además, la dosificación del SAGA es menor debido al porcentaje de alúmina, este coagulante tiene un mayor porcentaje (17% m/m mínimo) y tiene menor cantidad de materiales insolubles en agua de 0.5 % m/m máximo respecto al SAGB (ETAPA EP, 2017a).

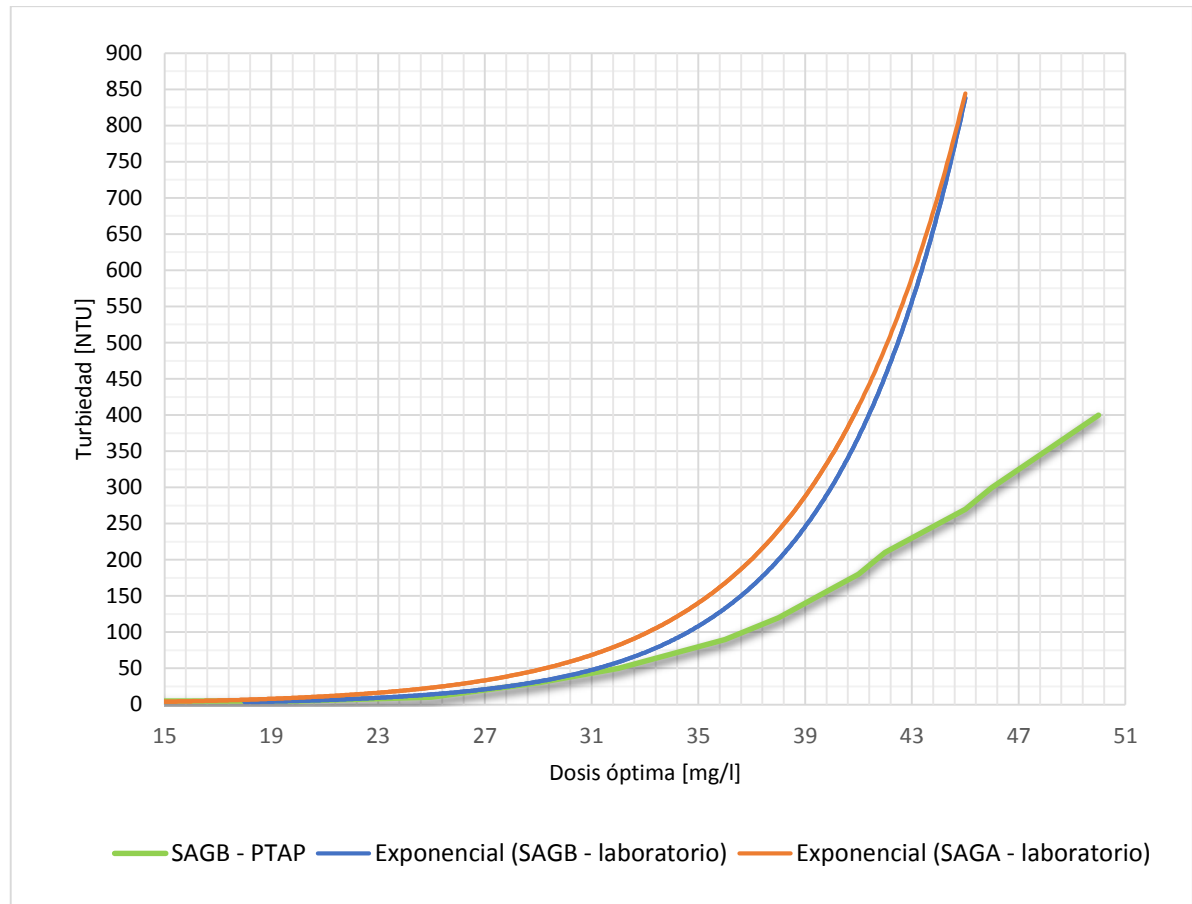


Figura 4.4-1: Curva de dosis óptima de coagulante para un caudal de 1000 l/s.
Fuente: Criollo & Lara (2020).

Las tendencias de las curvas son horizontales y se comportan de forma similar en los dos coagulantes (laboratorio) hasta aproximadamente los 27 NTU, con turbiedades mayores se observa una mayor tendencia exponencial. Para el caso de los datos de la PTAP “EL Cebollar” en turbiedades bajas el comportamiento de la curva es similar a las otras pruebas (laboratorio), por otro lado, en turbiedades superiores a 27 NTU la tendencia es exponencial y ligeramente horizontal. Además, con datos de la TURB del agua cruda para un caudal de 1000 (l/s), se puede obtener la dosis óptima del coagulante, aplicando las Ecuaciones 4.4-1, 4.4-2 y 4.4-3.

$$y = 0,2633e^{0,1794x}$$

Ecuación 4.4-1: Dosis de SAGA en función de la TURB con datos del laboratorio

$$y = 0,0843e^{0,2045x}$$

Ecuación 4.4-2: Dosis de SAGB en función de la TURB con datos del laboratorio

$$y = 0,6916e^{0,1318x}$$

Ecuación IV-3: Dosis de SAGB en función de la TURB con datos de la PTAP “El Cebollar”.

X: Valor de TURB del agua cruda (NTU)

Y: Valor de la dosis óptima de SA (mg/l)

En las Figuras 7.15-1 y 7.15-3 (Anexo VII-O) se muestran las curvas de dosificación de los caudales de 950 y 800 l/s, también se observó en estos caudales una tendencia de las curvas similar al caudal de 1000 l/s, así como una dosificación menor con el SAGA.

En la Figura 4.4-2 se presenta una gráfica semilogarítmica de la TURB versus la dosis óptima de SAGA y SAGB. En las Figuras 7.15-2 y 7-15-4 (Anexo VII-O) se puede observar las curvas de los caudales de 950 y 800 l/s al igual que sus respectivas ecuaciones.

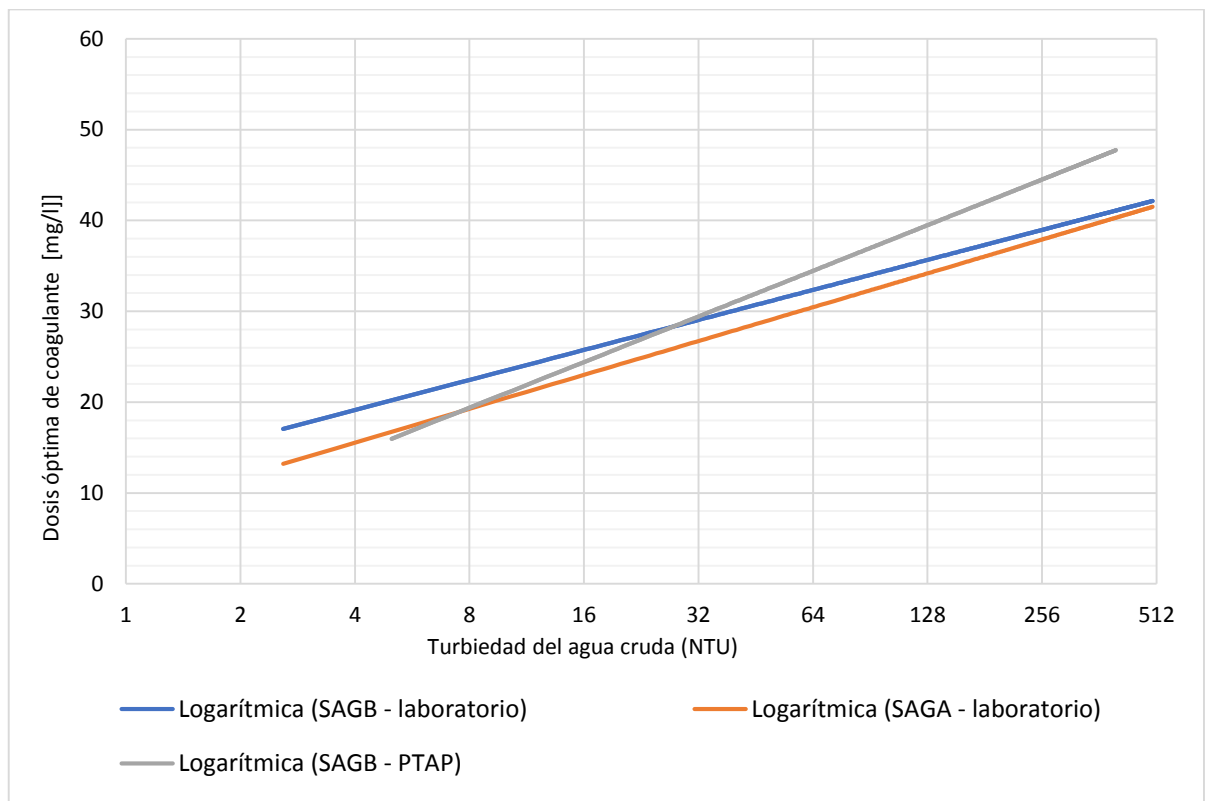


Figura 4.4-2: Gráfica semilogarítmica de la TURB inicial vs dosis óptima para un caudal de 1000 l/s
Fuente: Criollo & Lara (2019).

Se ajustó la curva de la Figura 4.4-1, resultando la Figura 4.4-2, esta nueva gráfica nos permitió visualizar dos variables: la primera, la dosis óptima en el eje de las ordenadas y la segunda, el logaritmo de la TURB en el eje de las abscisas. Se obtuvo la Ecuación de la línea de tendencia semilogarítmica de los gráficos, que puede ser utilizada por los operadores de la PTAP para la dosificación de los coagulantes. Al igual que en la Figura 4.4-1, la dosificación del SAGA es menor que el SAGB en el laboratorio, para los datos de la PTAP “El Cebollar” la diferencia es mayor entre 1-10 mg/l. Con datos de la TURB del agua cruda en un caudal de 1000 (l/s) se puede obtener la dosis óptima del coagulante, aplicando las Ecuaciones 4.4-3, 4.4-4 y 4.4-5.

$$y = 4,7659\ln(x) + 12,792$$

Ecuación 4.4-3: Dosis de SAGA en función de la TURB con datos del laboratorio

$$y = 5,0391\ln(x) + 12,369$$

Ecuación 4.4-4: Dosis de SAGB en función de la TURB con datos del laboratorio

$$y = 7.2471\ln(x) + 4.3144$$

Ecuación 4.4-5: Dosis de SAGB en función de la TURB con datos de la PTAP del Cebollar.

X: Valor de TURB del agua cruda (NTU)

Y: Valor de la dosis óptima de SA (mg/l)

En resumen, los datos de las curvas exponenciales resultaron cercanos a las líneas de tendencias en los tres caudales. Al contrario de las curvas con tendencia semilogarítmica, los datos graficados estuvieron más dispersos de la línea de tendencia. El coeficiente de determinación (R^2) es cercano a 1 en las curvas exponenciales mientras que en las curvas semilogarítmicas los valores de (R^2) se acercan a 0. Resultando que es más viable utilizar las curvas con tendencia exponenciales en la PTAP, porque el modelo para estas curvas estuvo más ajustado y por lo tanto es más confiable. Sin embargo, también se puede utilizar las ecuaciones de las curvas semilogarítmicas y exponenciales para corroborar la suministración del coagulante.

b. Ensayo de jarras con diferentes dosis de polímero para el SAGA y SAGB

Para los ensayos de jarras, se utilizó el PC que se utiliza en PTAP “El Cebollar”, con la intención de replicar las mismas condiciones de la PTAP a nivel de laboratorio. Este PC se usó en conjunto con las dosis óptimas de SAGA y SAGB obtenidas en los ensayos anteriores, con la finalidad de establecer que coagulante trabaja mejor con este PC.

En la Figura 4.4-3 se puede visualizar las dosis óptimas registradas en las pruebas del laboratorio para el PC con el SAGA y SAGB en las diferentes turbiedades de agua cruda presentada desde marzo – agosto del 2019. Además, para contrastar los datos de las pruebas realizadas se comparará con los datos de dosificación del PC de la PTAP del año 2019.

Las curvas de dosificación del PC con los cuagulantes que se trabajó en el laboratorio, tuvieron comportamientos lineales similares. Las líneas tendeciales toman este comportamiento debido al incremento de la TURB, el floculante aglutina más flóculos y por ello necesita una mayor dosificación según el estudio efectuado por Wills et al. (2010).

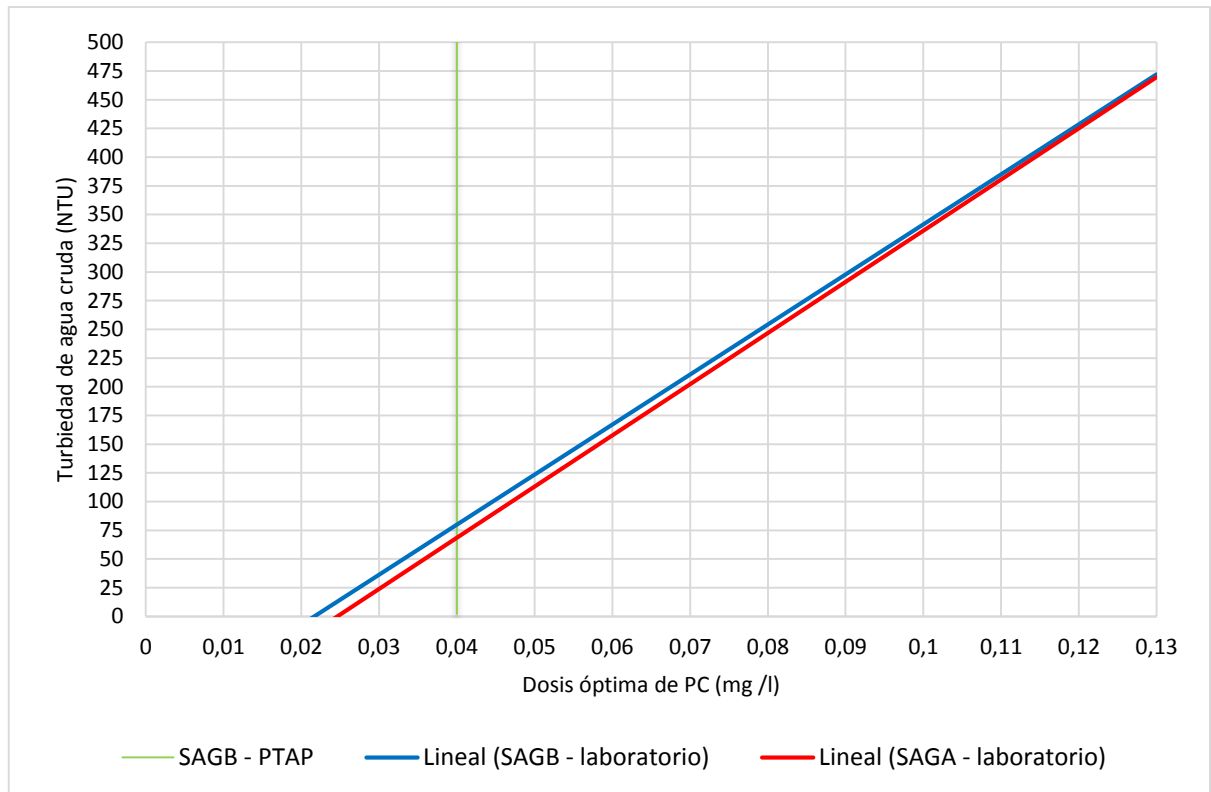


Figura 4.4-3: Curvas de dosificaciones del PC con SAGA y SAGB para un caudal de 1000 l/s.
Fuente: Criollo & Lara (2020).

En el estudio realizado por Jiménez et al. (2012) se analizó la remoción de turbiedad, CA y pH del agua del río Humo en Costa Rica que se utiliza para la potabilización, utilizando SA como coagulante y PC como floculante. El río Humo tiene turbiedades bajas (9 – 64 NTU) y valores altos de CA (85-475 UC), estas condiciones se asemejan a las encontradas en la PTAP “El Cebollar”. En Costa Rica con una TURB de 40 NTU se encontró una dosis óptima de coagulante de 30 mg/l y de PC de 1 mg/l; en la PTAP “El Cebollar” con una TURB de 37.7 NTU la dosis óptima fue de 29 mg/l de SA y 0.07 mg/l de PC. Las pruebas de las dosificaciones del SA y PC para la PTAP “El Cebollar” son semejantes a los realizados en el río Humo, inclusive en la PTAP “El Cebollar” la dosis de PC es menor.

Los valores de dosificación del PC en la PTAP “El Cebollar” en los dos coagulantes se encuentran en el rango de las dosis recomendadas entre 0.01 – 2 mg/l según Lorenzo (2006) y según la literatura descrita en un rango de 0.01 a 1 mg/l esto se debe a los tiempos de retención (desde mezcla rápida hasta dosificadores del PC) y gradiente de velocidad del floculador son óptimos. Además, como se mencionó anteriormente, los puntos de dosificación del PC se deben localizar a 1/3 del tiempo de retención del floculador y con

un gradiente de velocidad superior a 20 s^{-1} , se comprobó que estos dos parámetros cumplen con las condiciones antes mencionadas. En los datos de la PTAP “El Cebollar” (línea verde) toma una dirección vertical debido a que la PTAP “El Cebollar” trabaja con una sola dosis para diferentes turbiedades, esto provoca una eficiencia menor al momento de remover la turbiedad y CA del agua cruda. La Figura 4.4-3 puede ser utilizada en la PTAP para el caudal de $1000 \text{ l/s} \pm 5\%$ hasta turbiedades de 500 NTU; y para los caudales de 950 y $800 \text{ l/s} \pm 5\%$ se pueden apreciar las Figuras 7.17-1 y 7.17-2 (Anexo VII-Q).

4.4.3 Análisis estadístico para el coagulante y floculante

Después que se obtuvo los resultados de la dosis óptima del floculante y coagulante, se realizó el análisis estadístico que permitió evaluar si existe relación entre las dosificaciones de cada químico utilizado. Inicialmente, se obtuvo las normalidades y homogeneidad de las dosis entre los coagulantes, así como de las dosis entre el PC+SAGA y PC + SAGB, para posteriormente realizar la prueba T-Student.

En la Tablas 4.4-5 y 4.4-6 se muestran los resultados obtenidos de la normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk en los tres escenarios con los caudales de 1000, 950 y 800 l/s para el coagulante y floculante.

Tabla 4.4-2: Resultados de la prueba Shapiro-Wilk

Caudal es l/s	Coagulante				Coagulante + Floculante					
	SAGA en el laboratorio		SAGB en el laboratorio		PC+SAGA en el laboratorio		PC+SAGB en el laboratorio		PC+SAGB en la PTAP del Cebollar.	
	p-value	w	p-value	w	p-value	w	p-value	w	p-value	w
1000										
950	0.456	0.955	0.378	0.950	0.104	0.921	0.8761	0.078	2.69*e-9	0.2358
	0.900	0.971			0.550	0.939				
			0.765	0.958			0.5733	0.941	2.69*e-9	0.2358
800										
	0.0973	0.869	0.173	0.890	0.346	0.918	0.2525	0.905	2.69*e-9	0.2358

Fuente: Criollo & Lara (2020).

En la Tabla 4.4-2 se aceptó la hipótesis nula al suministrar solo el coagulante, así como al suministra el coagulante + el floculante en las pruebas del laboratorio, es decir que los datos adquieren una distribución normal, debido a que su p-value es mayor que el nivel de significancia 0.05. Además, el estadístico de prueba (w) tiende a la unidad, en concreto no existió desviación de la normalidad en las dosis de los dos químicos. Para el caso de los datos obtenidos de la PTAP “El Cebollar” se acepta la hipótesis nula, es decir que no existe distribución normal, esto se debe a que en todos los caudales se utilizó una dosis de PC (0.04mg/l).

La Figura 4.4-4 se puede visualizar el método gráfico Q-Q plots para el caudal de 1000 l/s del PC y SA trabajados en el laboratorio. Para los caudales de 950 y 800 l/s se puede visualizar las Figuras 7.16-1 y 7.16-2 (Anexo VII-P) respectivamente.

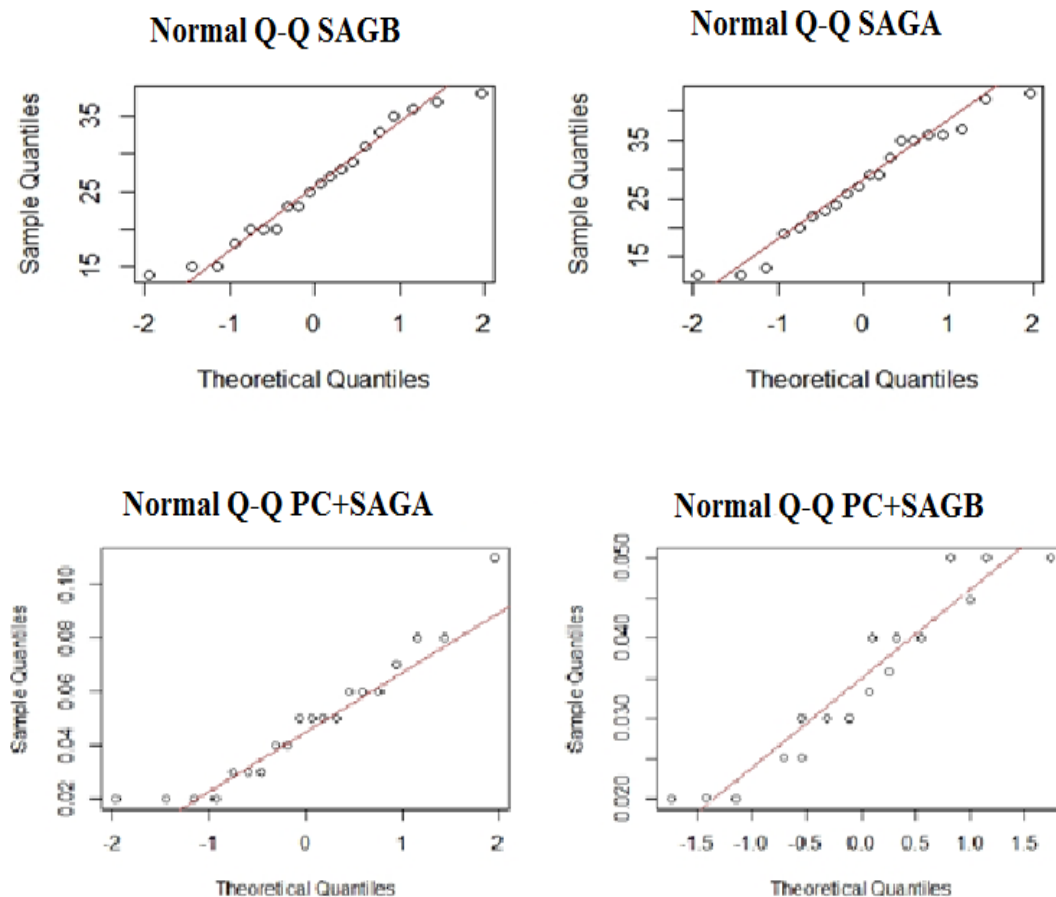


Figura 4.4-4: Gráficas de Q-Q plots. En el parte superior se encuentra la normalidad del coagulante y en la parte inferior del floculante con el coagulante para un caudal de 1000 l/s
Fuente: Criollo & Lara (2020).

En los gráficos estadísticos anteriores se determinó que existe normalidad en los cuatro conjuntos de datos y que tienen colas livianas hacia la izquierda, en la mayoría de observaciones se encontraron cerca de la distribución ideal (línea diagonal). Sin embargo, la normalidad es muy baja para PC+SAGA y PC+SAGB debido a que los datos de la dosis se repiten constantemente en las diferentes turbiedades, por ello los puntos se alejan de la recta sobre todo en la parte superior e inferior. Para los otros caudales de 950 y 800 l/s, las gráficas de Q-Q plots se comportaron de igual manera, como una distribución normal al dosificar solo coagulante y también al dosificar coagulante con el ayudante de coagulación (PC).

En la Tabla 4.4-3 se encuentra un resumen de los valores obtenidos en la prueba de Fligner-Killeen para la homogeneidad de SA y PC en el laboratorio de los caudales de 1000, 950 y 800 l/s. No se realizó pruebas de homogeneidad para los datos PC obtenidos de la PTAP “El Cebollar”, porque las dosis no varían con los diferentes caudales, tampoco de SA debido a que la PTAP “El Cebollar” siempre utiliza el coagulante en conjunto con el floculante.

Tabla 4.4-3: Resultados de la prueba de Fligner – Killeen

Homogeneidad entre SAGA y SAGB			
Caudales l/s	p-value	df	Chi squared
1000	0.213	38	9
950	0.252	18	9
800	0.342	18	19
Homogeneidad entre PC+SAGA y PC +SAGB			
Caudales l/s	p-value	df	Chi squared
1000	0,129	38	8,522
950	0,432	18	5,922
800	0,151	18	6,712

Fuente: Criollo & Lara (2020).

En la prueba de homocedasticidad se comprobó que la hipótesis nula es aceptada en los dos químicos, debido a que todos los valores de p-value son mayores que 0.05. Se comprobó que existe homogeneidad de varianzas en los dos grupos de coagulantes al utilizar el mismo PC, como ayudante de coagulación. También se encontró homogeneidad de los datos al dosificar solo el coagulante.

Después de haber comprobado la normalidad y la homogeneidad se procedió a realizar la prueba t-Student. En la Tabla 4.4-4 se encuentran los datos de dicha prueba para el PC en los dos coagulantes trabajados en el laboratorio, y los datos solo al utilizar coagulante.

Tabla 4.4-4: *Resultados de la prueba de t-student*

t-Student entre SAGA y SAGB			
Caudal (l/s)	t-value	df	p-value
1000	0.60223	38	0.7609
950	0.20571	18	0.4197
800	0.71641	18	0.2773
t-Student entre PC+SAGA y PC +SAGB			
Caudal (l/s)	t-value	df	p-value
1000	0.53616	38	0.2975
950	0.22056	18	0.414
800	0.44485	18	0.3309

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Para contrastar la prueba del t-Student, se puede visualizar que todos los estadísticos p-value tienen valores de significancia mayores al 5% (0.05) y los valores críticos de t (t-value) son menores. En concreto, se determinó que se acepta la hipótesis nula en todos los escenarios, se deduce que las medias de los grupos son iguales en todos los escenarios. Mediante el análisis del t-Student se puede determinar que no existe diferencias observables, es decir el PC al trabajar con el SAGA o SAGB no presenta diferencias significativas en la dosificación en todos los caudales, del mismo modo no se encontró diferencias significativas al dosificar solo SAGA o SAGB para los caudales de 1000, 950 y 800 l/s. A continuación, se realizó un análisis del porcentaje de remoción de TURB y CA, que permitirá establecer el coagulante óptimo, y además determinar el incremento de eficiencia al utilizar PC en el SAGA y en el SAGB.

4.4.4 Eficiencia del Coagulante y floculante

a. Eficiencia del coagulante

El análisis de la eficiencia del coagulante se realizó mediante el porcentaje de remoción de TURB, porcentaje de remoción de CA y variación de pH, debido a que estos parámetros son los más controlados en la potabilización del agua. Se visualizó que en las pruebas realizadas existió una remoción de TURB entre 55% a 90 %; y el porcentaje de

remoción de CA fue entre un rango de 80% a 90 % esto sucede en turbiedades menores a 13 NTU para los dos coagulantes. Para turbiedades mayores a 13 NTU, los porcentajes de remoción (CA y TURB) del SAGA se incrementan entre el 1 al 10 % más que el SAGB en la mayoría de pruebas. Esta diferencia en las remociones entre coagulantes se debe a: el porcentaje de alúmina (mayor en el tipo A que el tipo B), mayores porcentajes de materias insolubles contenidas en el SAGB y mayor facilidad de disolución del SAGA en el agua (ETAPA EP, 2017a). También, se demostró que a mayor TURB mayor es la dosis y mayor será la remoción, es una relación directa, pero no es lineal como se puede apreciar en la Figura 4.4-1 Se observó, que en la PTAP “El Cebollar” con turbiedades menores a 27 NTU se incrementa la dosificación de forma más rápida que con turbiedades mayores a 27 NTU. Además, en las turbiedades menores a 27 NTU dentro de PTAP “El Cebollar” fueron los porcentajes de remociones más bajos que se obtuvieron.

Los resultados obtenidos en este estudio en el caso de la TURB son similares con el estudio realizado por Solis Silvan et al. (2012) , donde utilizando el SA comercial obtuvo una remoción de TURB de 98.7 % para una agua cruda superficial de 70 NTU con una dosis óptima de 30 mg/l. Con la misma TURB en las muestras de la PTAP “El Cebollar” utilizando el SAGA y SAGB, se logró una remoción del 98. 79 % con una dosis entre 29 mg/l hasta 31 mg/l. En otro estudio realizado por Saritha et al. (2017) en Visakhapatnam – India, se analizó tres tipos de coagulantes (dos naturales y de alumbre) donde se presentó una remoción de CA hasta un 90 % a un pH de 7. Este resultado es comparable con los resultados de la PTAP “El Cebollar” que para la misma TURB y pH se obtuvo una remoción del 99 %.

En el estudio realizado por Valeriano & Matos, (2019) se utilizó SAGA como coagulante con una concentración del 1 % en turbiedades de 30 a 400 NTU. Para una TURB de 30 NTU con una dosis óptima de 25 mg/l hubo una remoción de TURB final de 0.58 NTU; en los resultados de la PTAP “El Cebollar” con una TURB de 26 NTU, se encontró una dosis óptima de 27 mg/l, obteniendo una turbiedad final de 1 NTU, mientras que para una TURB de 37.7 NTU la dosis óptima fue 29 mg/l y se obtuvo una TURB de hasta 1,10 NTU. Como podemos observar los resultados son parecidos al estudio de Manami & Camacho, aplicando el SAGA existen en los dos casos de estudio remociones de TURB hasta el 90 %.

Para el análisis de la variación del pH, según la literatura se recomienda que los valores óptimos estén en un rango de 6.5 a 8, los ensayos que se realizaron están en este rango.



Se observa que en algunos casos el pH se reduce, esto se debe al proceso químico de hidrólisis, pero no superaran los valores establecidos y recomendados en la bibliografía ver la Tabla 7.9-3 (Anexo VII – I). Sin embargo, en pocas pruebas el pH está fuera del rango, esto podría suceder debido a la sobre dosificación del SA o consecuencia de un pH bajo en el agua cruda. Se encontró que a mayor dosis de coagulante, menor será el pH final y la variación será mayor, según como dice el estudio de Malik, (2018), donde la eficiencia del alumbre es mayor con valores cercanos a la neutralidad.

Como se aprecia en la Figura 4.4-5, existe una eficiencia mayor con el coagulante tipo A que con el coagulante tipo B, según la literatura descrita un coagulante óptimo debería variar lo menos posible del pH inicial, sin embargo, esta variación se encuentra dentro del rango aceptable para la potabilización del agua en los dos casos.

De forma general se concretó que el SAGA en el caudal de 1000 l/s es más eficiente que el SAGB, por tener un mayor porcentaje de remoción de CA y TURB. El comportamiento del caudal de 1000 l/s es similar a los demás caudales demostrando nuevamente que el coagulante tipo A es más eficiente indistintamente del caudal que se opere. En las Figuras 7.18-1 y 7.18-2 (Anexo VII-R) se observan los comportamientos de la eficiencia de 950 y 800 l/s.

b. Eficiencia del polímero

En la Figura 4.4-6 se visualiza el comportamiento del porcentaje de remoción y la dosis del PC en relación con la TURB del agua cruda para un caudal de 1000 l/s, para determinar la eficiencia del PC con los dos tipos de coagulantes experimentados en el laboratorio. En todos los escenarios se observó que existe una tendencia ascendente del porcentaje de remoción y dosis del PC respecto a la TURB; de tal manera que al incrementarse la TURB, la dosis se incrementa y el porcentaje de remoción de igual manera aumenta. Lo anterior se debería a que, al dosificar mayor cantidad de PC, los flóculos serán de gran tamaño, que posteriormente por acción de la gravedad en los sedimentadores, los flóculos serán sedimentados más fácilmente.

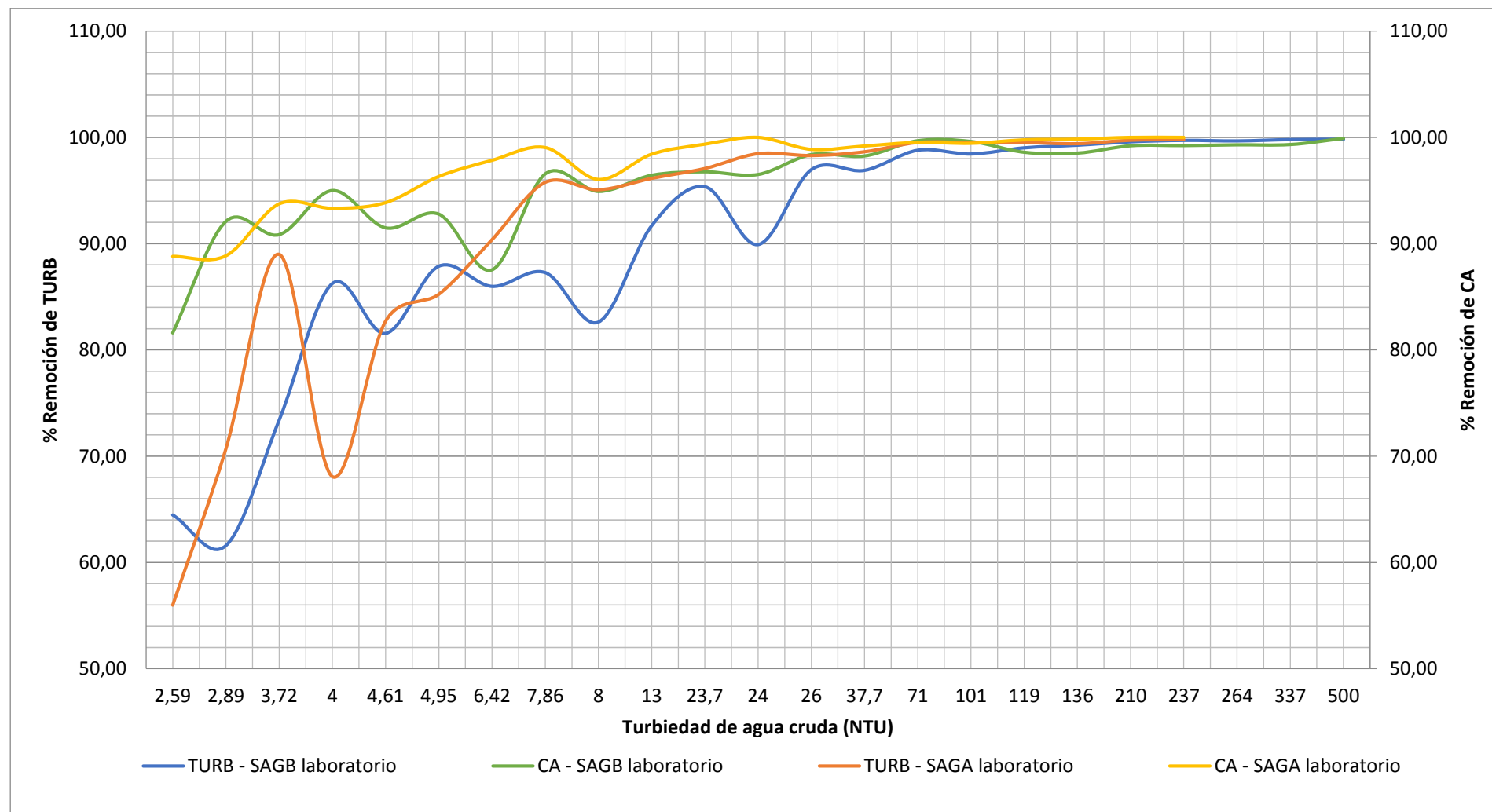


Figura 4.4-5: Comparación de la eficiencia de remoción de TURB y CA para un caudal de 1000 l/s SA
Fuente: Criollo & Lara (2020).



Las condiciones hidráulicas y tiempos de retención adecuados en la PTAP “El Cebollar” muestran que en conjunto con la variabilidad de la dosificación de PC en diferentes turbiedades mejora la remoción de TURB y CA. Por otro lado, al dosificar una sola dosis fija de PC para las diferentes turbiedades, los porcentajes de remoción de turbiedad son menores con turbiedades altas, alrededor de un 25 % menos que al usar dosis de PC proporcionales al incremento de la TURB. Un factor que influye en el porcentaje de remoción, tanto de CA como de TURB, es el volumen de lodos en los floculadores, debido a que los flóculos no deben permanecer por muchas semanas en las unidades de floculación, porque podrían incorporarse nuevamente al flujo de agua a causa de movimientos turbulentos.

Se constató que este PC se comporta de manera muy similar con los dos coagulantes, como se dijo en la prueba t-Student. Sin embargo, al utilizar el coagulante y floculante se incrementó la eficiencia en un promedio del 5% mas que al dosificar solo coagulante. En el estudio realizado por Lee & Westerhoff, (2006) se analiza la eficiencia del PC en aguas superficiales para la remoción de NOM, compuestos orgánicos de nitrógeno y carbono orgánico disuelto; los resultados del estudio sugieren que al trabajar con un floculante aumenta la eficiencia del proceso de coagulación en un 15 a 20 %. Además, es necesario encontrar las dosis óptimas del floculante para evitar problemas causados por PC residuales.

Se determinó que la eficiencia del PC es inferior al 95% en remociones de TURB con valores menores a 10 NTU y posteriormente la eficiencia superó el 95% con turbiedades mayores a 10 NTU. La variación de pH al usar PC no es significativa, se encontró que al dosificar SAGA + PC la variabilidad de pH es menor que al usar SAGB + PC.

Según la Normativa 1108 (2011) para agua potable, los límites permisibles de los parámetros de TURB y CA son 5 NTU, 15 UPC respectivamente y para el pH esta entre 6.5 y 8.5. Comparando estos parámetros (TURB, CA y pH) con los obtenidos después de realizar las pruebas con coagulante y floculante, se encuentran dentro del límite establecido por la normativa ecuatoriana.

El pH que tiene el agua cruda afecta de gran manera al proceso de coagulación y por lo general hay un rango óptimo que varía de 6.5 y 8.5 según Trujillo et al. (2014). Los valores de pH obtenidos en la PTAP “El Cebollar” están dentro del rango que se encuentra en la literatura y en este caso no es necesario la aplicación de cal o hidróxido de sodio para regular el pH.



Se podría considerar, que el PC actúa de forma similar con el SAGB como el SAGA, es decir la determinante final para mejorar la eficiencia de remoción recae sobre el coagulante. Las eficiencias de los porcentajes de remoción de TURB Y CA del PC en los caudales de 950 y 800 l/s se pueden apreciar en las Figuras 7.18-3 y 7.18-4 (Anexo VII-R). No se analizaron estos caudales porque los comportamientos de las curvas son semejantes al caudal de 1000 l/s.

4.4.5 Análisis de costos para el coagulante y el floculante

Se realizó una evaluación económica de la cantidad de coagulante y floculante utilizado anualmente en la PTAP “El Cebollar”. La evaluación se centró en los costos económicos, con el fin de establecer si la estrategia de sustitución de coagulante mejoraría la práctica de potabilización desde un punto de vista técnico y económico.

En la Figura 4.4-7 se presentan los costos anuales del coagulante como del floculante con respecto a cada caudal trabajado en la PTAP “El Cebollar”. Se consideró que el PC se comporta de manera similar con los dos coagulantes utilizados. En la Figura 4.4-7 se puede apreciar un comportamiento de los costos anuales del PC con una variación máxima de 3000 dólares. La variación del costo no es significativa durante un año de operación. Además, esta diferencia está correlacionada con la dosis óptima promedio del PC que influyó en el costo anual final. Para el PC, la dosis, porcentaje de remoción de TURB y costo anual, tiene valores similares en los dos coagulantes. Por otro lado, para el caso de los costos anuales del SAGB en el laboratorio y SAGB en la PTAP “El Cebollar”, existe una diferencia de costos máxima de 50 000 dólares.

Para el caso del SAGA en el laboratorio y SAGB en la PTAP “El Cebollar”, con las mismas turbiedades existe una diferencia de costos máxima de 55 000 dólares. En los dos casos, los ahorros de los coagulantes son cercanos, se determinó que al sustituir el insumo químico o al optimizar la dosificación (coagulante) los costos de producción disminuyen notablemente durante un año de operación. Según Walsh et al. (2009) la dosis de coagulante es la variable más importante que afecta al tratamiento y a los costos operativos, porque al reducir las dosis de coagulante a escala de laboratorio a nivel industrial se podría ahorrar un gran consumo del químico, además de reducir los residuos de desechos de aluminio y al mismo tiempo reducir los costos de operación.

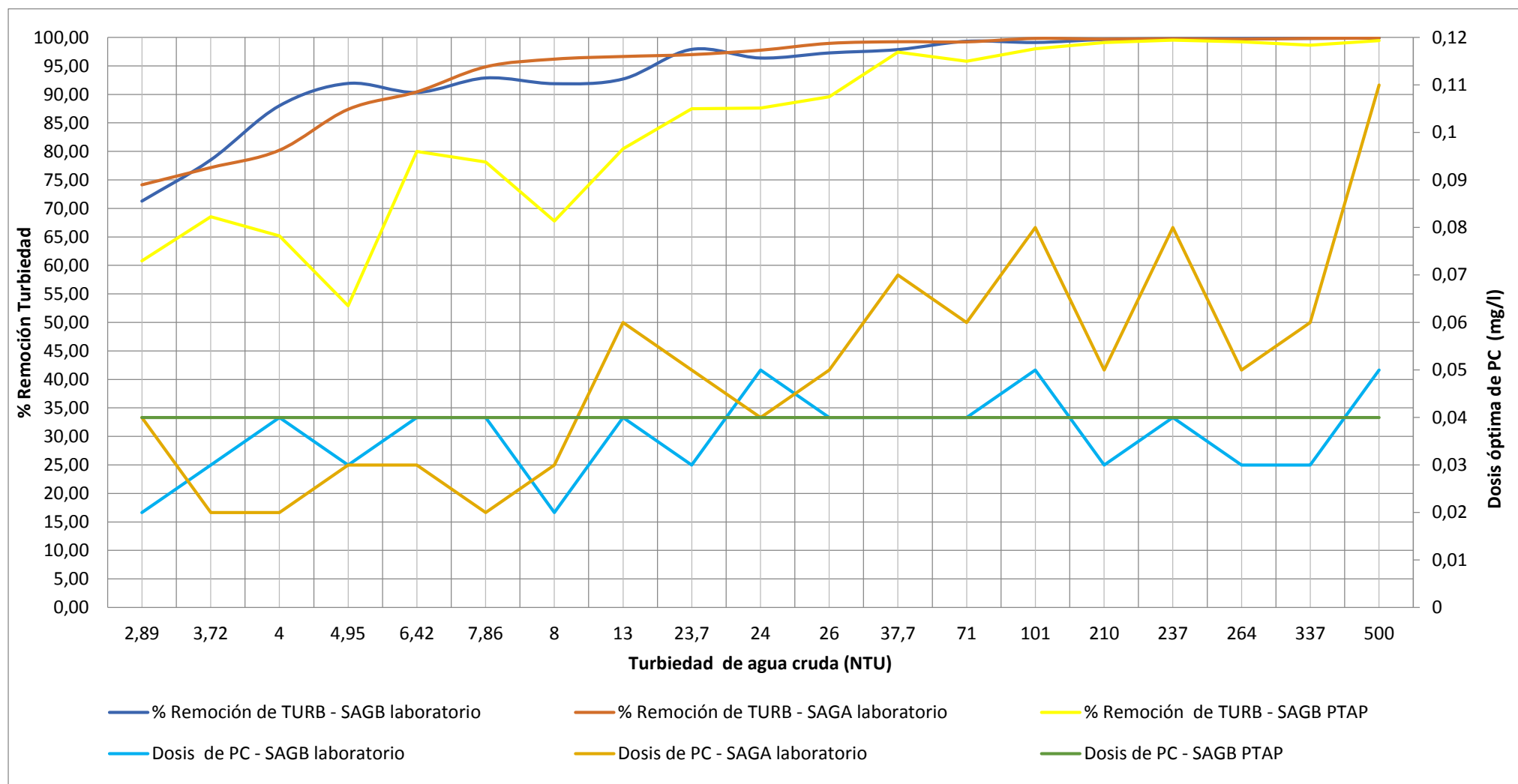


Figura 4.4-6: Eficiencia del PC para un caudal de 1000 l/s
Fuente: Criollo & Lara (2020).



Al sustituir el SAGB por el SAGA existe ventajas adicionales como: menores concentraciones de los químicos en los lodos, dosis óptimas bajas, mayor porcentaje de remoción de CA y TURB. Si se decide no sustituir el SAGB, pero se utiliza las nuevas curvas de dosificación del coagulante como se observa en la Figura 4.4-5, mejorará el porcentaje de remoción de TURB y CA. Además, de tener beneficios ambientales en los residuos (lodos), también se beneficiará con la disminución de los costos de operación anual. En el caso de los caudales de 950 l/s al utilizar SAGB en la PTAP sigue siendo más costoso, aunque el rango de la diferencia con los costos anuales de SAGA es menor alrededor de 5000. Para los caudales de 800 l/s el costo anual es mayor cuando se utiliza el SAGA, alrededor de 9 000 dólares más que al dosificar SAGB en la PTAP, esta diferencia de costo no es tan significativa comparado con el costo anual total que bordea valores superiores a 350000 dólares. Las diferencias anteriores fueron causadas por el menor número de muestras de aguas para los caudales de 950 y 800 l/s comparado con el número de muestras para 1000 l/s; esto se debe a que, al tener un mayor número de muestras, el promedio de las dosis para obtener el costo anual total será más representativo y con menores márgenes de error comparado con el promedio de las dosis con un menor número de muestras.

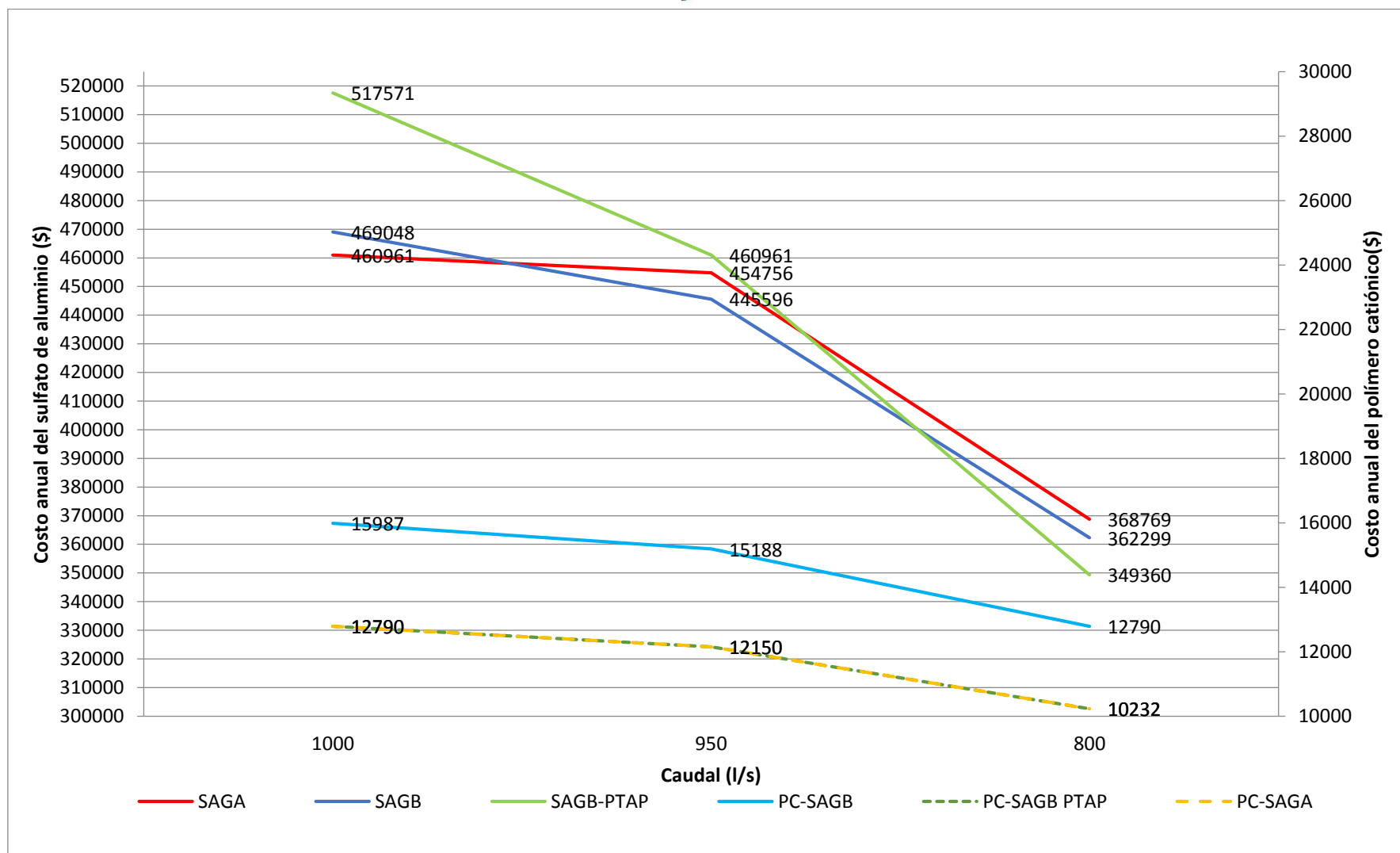


Figura 4.4-7: Comportamiento de los costos anuales del coagulante y floculante para los caudales trabajados.

Fuente: Criollo & Lara (2020)



CAPÍTULO V : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Los procesos de coagulación – floculación son indispensables para remover la turbiedad, color verdadero y aparente del agua. También, permite eliminar bacterias, algas, plantón, sustancias que producen sabor y olor. Para mejorar la eficiencia de estos procesos y optimizar la dosis de Sulfato de Aluminio, así como del polielectrolito de la PTAP “El Cebollar”, se evaluó los procesos de coagulación y floculación.

De acuerdo al primer objetivo planteado en este estudio que corresponde a la evaluación de las características hidráulicas se presentan las siguientes conclusiones:

- En el proceso de coagulación, en la geometría de la unidad de la mezcla rápida se obtuvo que los tiempos de retención (3 segundos) al igual que el gradiente de velocidad (1576.48 s^{-1}) corresponden al tipo de canal que utiliza la PTAP (canal rectangular con cambio de pendiente), permitiendo la correcta dispersión del coagulante. Además, el proceso en esta unidad funciona de manera adecuada para una coagulación por barrido (época seca) y para una coagulación por neutralización de cargas (época lluviosa). En las unidades de floculación, el número de pantallas y compartimentos fueron trazados correctamente según la capacidad máxima de caudal, recorrido del agua y dimensiones del floculador. No se encontraron grietas y deformaciones significativas en la estructura física en las unidades de coagulación y de floculación. Se concluye que las unidades de floculación y coagulación están diseñadas de forma adecuada al igual que su funcionamiento.
- Al determinar el caudal de operación de la PTAP con el método de disolución de trazadores y con el método de área velocidad, se dedujo que ambos métodos son aceptables para la medición de caudales en canales cerrados y abiertos. La diferencia entre los caudales registrados en la PTAP y los otros métodos (trazador y molinete) tuvieron una diferencia menor al 5 %, es decir no existe diferencia significativa entre los caudales analizados.
- Con respecto al caudal de ingreso a cada floculador se determinó que a pesar de tener las dimensiones similares en las primeras 4 unidades, el caudal que ingresa a cada unidad varía dependiendo del caudal de operación total que ingresa a la



PTAP. El floculador 1 conjuntamente con el floculador 2 operan con un caudal alrededor del 41% - 56% del caudal total que ingresa en las unidades, y el resto se distribuye para los tres floculadores restantes. El floculador 3 es la unidad en la que menos caudal ingresa entre un 14 y 18 % para los tres caudales totales analizados. En resumen, al operar en la PTAP entre 1000-1050 l/s los caudales que ingresan a los floculadores se distribuyen de forma más uniforme entre un 18% y 22% para cada floculador, por otro lado, al operar entre caudales de 800 y 950 l/s la distribución no es uniforme, existiendo una variación en un rango de 14% y 29 %. Por ello, es necesario que al reducir los caudales de operación totales de la PTAP se utilicen las compuertas de los floculadores para que el ingreso del agua sea equitativo en cada unidad de floculación, permitiendo que se optimice la sedimentación.

- Los tiempos de retención reales de los floculadores varían entre 17- 21 minutos, estos valores son semejantes a los tiempos de retención teóricos de estas unidades. Además, los gradientes que se obtuvieron fueron entre 36 y 40 s^{-1} , según varios autores citados anteriormente, el gradiente como el tiempo de retención de los floculadores se encuentran dentro de los rangos óptimos.
- Las características hidráulicas de las unidades de floculación fueron estimadas por el modelo de Wolf – Resnick, curva de tendencia e índice de Morrill, estos tres métodos permiten determinar el tipo de flujo y zonas muertas. Con el método de Wolf – Resnick se obtuvo que en ambos floculadores predomina el flujo pistón (68%-98%) y las zonas muertas (0%) son despreciables en comparación con el volumen de cada floculador. El análisis de la curva de tendencia confirma la similitud entre los tiempos de retención teóricos y reales, así como una mayor tendencia de flujo pistón con presencia de pequeños cortocircuitos hidráulicos. En la evaluación con el Índice de Morrill, para los caudales de 800, 950 y 1000 l/s en los dos floculadores indica la presencia predominante de flujo pistón, pero no ideal, es decir el valor del índice es mayor a la unidad. Los resultados de las tres pruebas concuerdan entre sí en el predominio del flujo pistón y mantienen un flujo no ideal que es característico en este tipo de unidades, dando a entender que el agua circula de manera continua y eficiente en estas unidades.

Respecto al segundo y tercer objetivo planteados que corresponden a la determinación de dosis óptima y curvas de dosificación se presentan las siguientes conclusiones:



- Es importante para un estudio de evaluación de procesos de coagulación – floculación abarcar las dos estaciones del año (2019) que atraviesa el clima de la ciudad de Cuenca, debido a que sus diferentes precipitaciones influyen en las turbiedades. En el caso de la estación invernal se registraron turbiedades altas de hasta 500 NTU, mientras que en la estación de verano las turbiedades llegaron a valores mínimos de 1 NTU. Esta variabilidad de la TURB permitió realizar varias pruebas de jarras para determinar la dosis óptima de coagulante y floculante. Este estudio permitió determinar las dosis óptimas de coagulante y floculante que fueron indispensables para actualización de las curvas de dosificación, debido a que las actuales curvas de dosificaciones del SAGB fueron determinadas hace 16 años. Se obtuvo la curva de dosificación del SAGB para los caudales de 800, 950 y 1000 l/s y se demostró que esta nueva curva es más eficiente que la realizada hace años en relación al porcentaje de remoción de TURB y CA. Lo que significa que es necesario utilizar las curvas de dosificación obtenidas en este proyecto para mejorar la eficiencia de la coagulación-floculación.
- En el caso del PC (floculante) se obtuvo una curva de dosificación óptima para las diferentes turbiedades, resultando un incremento de los porcentajes de remoción de TURB y CA. En la PTAP se utiliza una dosis fija para las diferentes turbiedades lo que provoca porcentajes de remociones bajos comparados con tener una variabilidad de dosificación de acuerdo a la TURB de agua cruda. Se concluye que es imprescindible utilizar una dosis variable de acuerdo a la TURB presente en el agua cruda para incrementar la eficiencia.

De acuerdo al cuarto objetivo que corresponde a la eficiencia entre el sulfato de aluminio tipo A y tipo B se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- De forma complementaria se realizó las pruebas de jarras con las características hidráulicas de la PTAP para el SAGA y SAGB. Se concluyó que es más eficiente aplicar SAGA, debido a que el porcentaje de remoción de TURB y CA es mayor y la variación de pH se encuentra dentro del rango bibliográfico. Las dosis de los dos coagulantes evaluados se encuentran en el rango de dosificación normales según la literatura descrita. Sin embargo, el cambio de insumo químico para la coagulación por el SAGA tendrá impactos positivos para el ambiente, debido a que los floculadores tendrán menores cantidades de lodos (hierro y materias insolubles en agua).



- Se evaluó el floculante utilizado en la PTAP con los dos tipos de coagulantes, y mediante la prueba T-student se concluyó que no existe diferencias significativas al trabajar en conjunto con los coagulantes Tipo A o Tipo B. Sin embargo, se pudo apreciar que al analizar la eficiencia existe una ligera ventaja con respecto al porcentaje de remoción de CA y TURB al usar SAGA.
- Respecto a los costos anuales por floculante y coagulante, no existe una diferencia notable en el PC al trabajar con el SAGA o SAGB. En cuanto al coagulante se pudo apreciar que se puede reducir los costos al utilizar la nueva curva de dosificación que se realizó en este proyecto. Además, si se opta por sustituir el coagulante SAGA por el SAGB, también existe ventajas económicas, ambientales y productivas.

RECOMENDACIONES

- Es necesario continuar con la investigación con turbiedades mayores a 500 NTU y caudales menores a 800, esto permitirá que las curvas de dosificación del coagulante, así como del floculante puedan ser utilizadas en los periodos que se presenten condiciones extremas de caudales y turbiedades.
- Es indispensable que los equipos que se utilizan para medir los parámetros de CA y TURB estén calibrados siempre para obtener datos válidos. Además, se recomienda realizar una evaluación de los equipos dosificadores de químicos para determinar su eficiencia debido a que es fundamental para la optimización de los procesos de floculación y coagulación.
- Se recomienda utilizar las nuevas curvas de dosificación de SAGB y realizar una evaluación posterior para determinar si mejoró la eficiencia en los procesos analizados. También, se podría utilizar el SAGA en la PTAP durante unos meses para comprobar lo realizado en este proyecto y determinar la variación del porcentaje de eficiencia a nivel industrial.
- La utilización de las compuertas es fundamental para distribuir los caudales que ingresan a los floculadores de manera equitativa para mejorar aún más la eficiencia de los floculadores. También, es recomendable la adquisición de regletas para medir caudales e incorporar junto a los caudalímetros en los canales internos y en los floculadores para utilizar en situaciones de emergencia.



- Se recomienda realizar una caracterización de lodos que producen en los diferentes procesos y posteriormente analizar alguna estrategia para su correcta disposición final o utilizar para algunos usos productivos como fabricación de ladrillos cerámicos.
- Se recomienda trabajar con un menor número de floculadores en época de estiaje cuando el caudal de ingreso disminuye, debido a que al trabajar con menos floculadores los procesos se mantienen eficientes y el mantenimiento se reduce.
- Finalmente se recomienda realizar un estudio de la potabilización del agua con insumos orgánicos (Ejemplo: *Moringa oleífera*) que replacen o complementen a los coagulantes y floculantes sintéticos, para reducir los costos e impacto ambiental por la generación de lodos con alto contenido de químicos o metales.



CAPÍTULO VI : REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, M., Sáezn, J., Lloréns, M., Soler, A., & Ortuño, J. F. (2002). Desestabilización de coloides. Teorías sobre la coagulación. In Tratamiento físico - químico de aguas residuales. Coagulación Floculación (Primera, pp. 35–42). F.G.GRAF S.L.
- Aguirre, M., & Venegas, Z. (2005). Consideraciones hidráulicas para el diseño de estructuras de medición de caudal en canales abiertos. 104.
- Al-Husseini, T. R., Ghawi, A. H., & Ali, A. H. (2019). Performance of hydraulic jump rapid mixing for enhancement of turbidity removal from synthetic wastewater: A comparative study. *Journal of Water Process Engineering*, 30(March), 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.03.005>
- American Water Works Association. (2002). Coagulación y floculación. In Calidad y tratamiento del agua. Manual de suministros de agua comunitaria (Quinta, pp. 297–357). McGraw-Hill.
- Américo, S. V. (2013). Gobernanza multidimensional del agua: la Directiva Marco del Agua europea. Dificultades de su aplicación. *Economía Informa*, 381, 74–90. [https://doi.org/10.1016/s0185-0849\(13\)71329-x](https://doi.org/10.1016/s0185-0849(13)71329-x)
- Arboleda, J. (1973). Conceptos modernos sobre el diseño mezcladores y floculadores. In Teoría, Diseño y Control de los procesos de clarificación del agua (p. 558).
- Ávila, R. (2013). Sistemas De Agua Potable Y Aguas Residuales. *Galileo*, 1–11.
- Barajas, C., & León, A. (2015). Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) en el proceso de coagulación - floculación para el tratamiento de agua potable por medio del uso de una red neuronal artificial. 2, 102.
- Castrillón, N. M. D., & Pascual, L. J. (2003). Determinación de las Dosis óptima del coagulante sulfato de aluminio en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana. *Papeles Del Psicólogo*, 24(85), 11–18.
- Chulluncuy, N. C. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería Industrial*, 0(029), 1–18. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2011.n029.232>
- Company, H. (2013). Manual 2100q portable turbidimeter. October.
- Company, H. (2017). HQd Portable Meter. 36.
- Company Hach. (2013). Procedures manual Colorimeter. 616.
- Correa, J. C., Iral, R., & Rojas, L. (2006). Estudio de potencia de pruebas de homogeneidad de varianza. *Revista Colombiana de Estadística*, 29(1), 57–76.



- Dar Lin, S. (2007). Public Water Supply. In Water and Wastewater. Calculations Manual (Segunda, pp. 307–525). McGraw-Hill.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Gonzalez, L. A., Tablada, E. M., Robledo, C. W., & Balzarini, M. G. (2005). Modelos estadísticos: Distribución normal y otras distribuciones. In Brujas (Ed.), Estadística para las ciencias agropecuarias (Séptima, pp. 63–95). <https://books.google.com.ec/books?id=huIRHgNpqqkC&pg=PA73&lpg=PA73&dq=prueba+de+normalidad+con+q+q+plots+paper&source=bl&ots=hyqmhAEkGX&sig=GbHi8bXhDyMP2m1NDUSiYmznAJdJzX36DD&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwje0LRVj8NqmcnHFztp53C1pSdpVjsf9ANBCtpYHQ#v=onepage&q&f=false>
- Díaz, V. P. (2009). Cartas Al Editor Errores Estadísticos Frecuentes Al Comparar Dos Poblaciones Independientes Frequent Statistical Errors While Comparing Two Independent Populations. Rev Chil Nutr, 36, 1136–1138. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182009000400011>
- Dosal, M. A., & Villanueva, M. (2008). Curvas de calibración en los métodos analíticos. 9.
- Ebeling, J. M., Sibrell, P. L., Ogden, S. R., & Summerfelt, S. T. (2003). Evaluation of chemical coagulation-flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorus from intensive recirculating aquaculture effluent discharge. Aquacultural Engineering, 29(1–2), 23–42. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(03\)00029-3](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(03)00029-3)
- ELICROM. (2020). Destilador de agua 3.5L AC-L4 4903007. <http://elicrom.com/destilador-de-agua-3-5l-ac-l4-4903007/>
- ETAPA EP. (2017a). Condiciones particulares del contrato para la adquisición de polímero floculante de amplio espectro PRAESTOL 650 TR para las plantas de tratamiento de agua potable. (p. 20).
- ETAPA EP. (2017b). Suministro de sulfato de aluminio granular tipo B grado 2 para plantas de agua potable en el cantón Cuenca (p. 2).
- Fair, G. M. (2002). Purificación de agua y tratamiento y remoción de agua residuales. (S. A. LIMUSA - WILEY (ed.); Primera).
- Gologan, D., & Popescu, E. (2016). The optimization of coagulation-flocculation process in a conventional treatment water plant The optimization of coagulation-flocculation process in a conventional treatment water plant. October. <https://doi.org/10.9790/2402-1009033339>



- Gómez Anaya, J. A., Novelo Gutiérrez, R., & Astudillo Aldana, M. R. (2017). Efecto de las descargas domésticas y de beneficio de café sobre la calidad del agua y la diversidad de larvas de Odonata (Insecta) en un arroyo de bosque mesófilo de montaña en Veracruz, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 372–380. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.004>
- González, G. A., Jara, V., Jiménez, K., Valencia, L. A., & Varela, A. (2015). Análisis y comparación de metodologías de aforo de caudal en la microcuenca del Río San Lorencito , Costa Rica. October.
- Hanna instruments. (1992). HI 8014 - HI 8314 HI 8424 - HI 8915 HI 9214 - HI 931000 HI 9622 Portable pH Meters. 20.
- Howard, G. (2003). Domestic Water Quantity, Service Level and Health. 39.
- Humberto, F., Morales, F., & Duarte, J. E. (2012). Desarrollo de un caudalímetro digital para la medición de caudal en ríos. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 3(1), 44–51.
- INEN. (2011). Agua Potable. Requisitos. Nte Inen 1108. Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1108(5), 1–10. <https://bibliotecapromocion.msp.gob.ec/greenstone/collect/promocin/index/assoc/HASH01a4.dir/doc.pdf%0Ahttp://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/1108-5.pdf>
- Irfan, M., Butt, T., Imtiaz, N., Abbas, N., Khan, R. A., & Shafique, A. (2017). The removal of COD, TSS and colour of black liquor by coagulation–flocculation process at optimized pH, settling and dosing rate. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S2307–S2318. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.08.007>
- Jiang, J. Q. (2015). The role of coagulation in water treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 8, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2015.01.008>
- Jiménez, J., Vargas, M., & Quirós, N. (2012). Estimación de la tuna (Opuntia Cuchinilliera) para la remoción del color en agua potable. *Tecnología En Marcha*, 42(4), 55–62. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i4.619>
- Kumaresan, T., Nere, N. K., & Joshi, J. B. (2006). Reply to the comments by I. Fort on “effect of internals on the flow pattern and mixing in stirred tanks.” *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 45(13), 4850. <https://doi.org/10.1021/ie0604730>
- Larriva, J., & González, O. (2017). Modelación hidráulica de humedales artificiales de flujo sub-superficial horizontal. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 38(1), 3–16.
- Lee, W., & Westerhoff, P. (2006). Dissolved organic nitrogen removal during water treatment by aluminum sulfate and cationic polymer coagulation. *Water Research*, 40(1), 1–10.



- 40(20), 3767–3774. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.08.008>
- Lorenzo, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. Estado Del Arte Del Tratamiento de Aguas Por Coagulación-Floculación ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúca, XL(2), 10–17.
- Malik, Q. H. (2018). Performance of alum and assorted coagulants in turbidity removal of muddy water. *Applied Water Science*, 8(1), 1–4. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0662-5>
- Mangin, J. P., & Mallou, V. J. (2006). Normalidad y otros supuestos en análisis de covarianzas. In S. . Netbiblo (Ed.), *Modelización con estructuras de covarianzas en ciencias sociales. Temas esenciales, avanzados y aportaciones especiales* (pp. 31–57). [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=WEfC1TGVJBgC&oi=fnd&pg=PA31&dq=Prueba+de+shapiro+wilk++pruebas+de+normalidad&ots=fqI5TWcOVq&sig=X3U2HxGjaEbwRSJGXsoKu-dxRDU#v=onepage&q=Prueba de shapiro wilk pruebas de normalidad&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=WEfC1TGVJBgC&oi=fnd&pg=PA31&dq=Prueba+de+shapiro+wilk++pruebas+de+normalidad&ots=fqI5TWcOVq&sig=X3U2HxGjaEbwRSJGXsoKu-dxRDU#v=onepage&q=Prueba+de+shapiro+wilk+pruebas+de+normalidad&f=false)
- Najul, M. V., & Blanco S, H. A. (2014). Estrategias de mejora continua en plantas potabilizadoras Venezolanas TT - Continuous improvement strategies in Venezuelan treatment plants. *Revista de La Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 29(1), 37–50. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652014000100006&lang=es%0Ahttp://www.scielo.org.ve/pdf/rfiucv/v29n1/art06.pdf
- Nalco, C. C., Kemmer, F. N., & McCallion, J. (1982). Operaciones unitarias en el tratamiento del agua. In *Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones - Tomo I* (Primera, pp. 8-1-23–1). McGraw-Hill.
- NTE INEN 2176. (2013). Agua. Calidad del agua. Muestreo. Técnicas de muestreo. First Edit, 7–12.
- Pérez, A., & Torres, P. (2008). Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo. *Revista Facultad de Ingeniería*, 45, 27–40.
- Pérez, M. B., Santamaría, J. S., & Piña, M. (2006). Los conflictos por agua en México. Diagnóstico y análisis. *Gestión y Política Pública*, XV(1), 111–143.
- Punmia, B. C., Kumar, A., & Kumar, A. (2016). Sedimentation. In *Water Supply Engineering* (pp. 238–272). Laxmi Publications.



- Quimpac Ecuador S.A. (2017). Sulfato de aluminio tipo A grueso. 1.
- Quimpac Ecuador S.A. (2016). Sulfato de aluminio tipo B grueso. 1–5.
- Rojas, A., & García, A. (2010a). Análisis de la curva de distribución del tiempo de residencia en un sistema de lixiviación. *Tecnología Química*, 9.
- Rojas, A., & García, A. (2010b). Modelación de la curva de distribución del tiempo de residencia en un sistema de lixiviación industrial. *Tecnología Química*, 1, 61–68. <https://doi.org/10.1590/2224-6185.2010.1>.
- Romero, J. A. (2005a). Análisis físico del agua. In *Calidad del agua* (Segunda, pp. 105–114). Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero, J. A. (2005b). Análisis químico del agua. In *Calidad del agua* (Segunda, pp. 117–202). Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero, J. A. (2005c). Coagulación química del agua. In *Calidad del agua* (Segunda, pp. 231–266). Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero, J. A. (2006a). Floculación. In *Purificación del agua* (Segunda, pp. 81–139). Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero, J. A. (2006b). Mezcla rápida. In *Purificación del agua* (Segunda, pp. 51–71). Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero, J. A. (2006c). Sedimentación. In *Potabilización del Agua* (Issue, pp. 117–145).
- Saritha, V., Srinivas, N., & Srikanth Vuppala, N. V. (2017). Analysis and optimization of coagulation and flocculation process. *Applied Water Science*, 7(1), 451–460. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0262-y>
- Sartorius. (n.d.). Instrucciones de manejo - Balanza analítica. 1–8.
- Satterfield, Z. (2005). Tech Brief. Jar Testing, 5(1), 1.
- Sawyer, C. N., McCarty, P. L., & Parkin, G. F. (2001). Análisis del agua y del agua residual. In *Química para Ingeniería Ambiental* (Cuarta, pp. 395–680). McGraw-Hill.
- Solenis. (2015). Praestol™ 650 TR FLOCCULANT. 1–7.
- Solis Silvan, R., Laines Canepa, J. ., & Hernandez Brajas, J. . (2012). Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(1), 133–139.
- Suárez, C. J. (2005). Fianzas. In S. . de C. V. Limusa (Ed.), *Costo y tiempo de edificación* (3ra ed., pp. 48–50). <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=f8G8UFFjd9sC&oi=fnd&pg=PA3&dq=analisis+de+costos+durante+un+año+&ots=gombGXfm7N&sig=vJbrBiXG8uJ>



- 5hdPYQOmg3uq5aWo#v=onpage&q=analisis de costos durante un año&f=false
Tintometer Group. (2016). Floc-Tester. 48.
- Trujillo, D., Duque, L. F., Arcila, J. S., Rincón, A., Pacheco, S., & Herrera, O. F. (2014). Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación / floculación usando almidón de plátano Turbidity removal in a water sample from a natural source via coagulation / flocculation using plantain starch Remoção de turbidez em água de. Revista ION, 27(1), 17–34.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-100X2014000100003&script=sci_arttext&tlng=pt
- Turcios, R. A. S. (2015). T-Student. Usos y abusos. Revista Mexicana de Cardiología, 26(1), 59–61.
- Valeriano, J. J., & Matos, R. A. (2019). Influence of Tara (Caesalpinia spinosa) Gum as an Aid in the Coagulation-Flocculation Process to Remove the Turbidity of an Artificial Suspension of Bentonite. Informacion Tecnologica, 30(5), 299–308.
<https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000500299>
- Vargas, L. (2004a). Análisis de flujos y factores que determinan los procesos de retención. In Tratamiento de agua para consumo humano - Plantas de filtración rápida (p. 284).
- Vargas, L. (2004b). Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. In Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual 1: teoría, 1 (pp. 1–54).
- Vargas, L. (2004c). Coagulación. In Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual 1:teoría,1. (pp. 151–220).
- Vargas, L. (2004d). Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de la unidades. In Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual 1:teoría,1. (pp. 215–265).
- Vargas, L. (2004e). Floculación. In Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual 1:teoría,1. (pp. 263–304).
- Vargas, L. (2004f). Mezcladores. In Tratamiento de agua para consumo humano - Plantas de filtración rápida - Manual II diseño de plantas con tecnología apropiada. (Vol. 0, pp. 45–87).
- Vargas, L. (2005a). Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención. In Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual III (pp. 35–91).
- Vargas, L. (2005b). Evaluación de plantas convencionales y tecnología apropiada. In



- Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida Manual III :
Evaluación de plantas de tecnología apropiada (pp. 93–217).
- Walsh, M. E., Zhao, N., Gora, S. L., & Gagnon, G. A. (2009). Effect of coagulation and flocculation conditions on water quality in an immersed ultrafiltration process. *Environmental Technology*, 30(9), 927–938.
<https://doi.org/10.1080/09593330902971287>
- Water Global Company. (2009). FP111-FP211-FP311 Global Water Flow Probe User ' s Manual. 38330112, 1–19.
- ZODIECSA. (2019). Medidor Digital Tds Para Calidad De Agua.
<http://www.zonedigitalecuador.net/index.php/varios-1/agricola/tds-detail>

CAPÍTULO VII : ANEXOS

7.1 Anexo VII-A: Fichas técnicas del equipo

Specifications

Specifications are subject to change without notice.

Specification	Details
Dimensions	19.7 x 9.5 cm (7.75 x 3.75 in.)
Weight	335 g (0.75 lb) without batteries; 430 g (0.95 lb) with four AA alkaline batteries
Meter enclosure	IP67, waterproof to 1 meter for 30 minutes
Battery enclosure	Water resistant to 0.6 m (2 ft) for 15 seconds
Power requirements (internal)	AA Alkaline or rechargeable Nickel Metal Hydride (NiMH) batteries (4); battery life: up to 200 hours
Power requirements (external)	Class II, external power adapter: 100–240 VAC, 50/60 Hz input; 4.5 to 7.5 VDC (7 VA) output
Meter protection class	Class I
Storage temperature	–20 to +60 °C (–4 to +140 °F)
Operating temperature	0 to +60 °C (32 to 140 °F)
Operating humidity	90% (non-condensing)
5-pin input connector	M12 connector for IntelliCAL™ probes
8-pin input connector	The 8-pin connector enables USB and external AC power connectivity
USB/DC adapter	Peripheral and host
Data memory (internal)	500 results
Data storage	Automatic in Press to Read mode and Interval Mode. Manual in Continuous Read Mode.
Data export	USB connection to PC or USB storage device (limited to the storage device capacity). Transfer entire data log or as readings are taken.

Specification	Details
Connections	Integrated USB type A (for USB flash memory device, printer, keyboard) and Integrated USB type B (for PC)
Temperature correction	Off, automatic and manual (parameter dependent)
Measurement display lock	Continuous measurement, Interval or Press to Read mode. Averaging function for LDO probes.
Keyboard	External PC keyboard connector via USB/DC adapter

General information

In no event will the manufacturer be liable for direct, indirect, special, incidental or consequential damages resulting from any defect or omission in this manual. The manufacturer reserves the right to make changes in this manual and the products it describes at any time, without notice or obligation. Revised editions are found on the manufacturer's website.

Safety information

NOTICE
The manufacturer is not responsible for any damages due to misapplication or misuse of this product including, without limitation, direct, incidental and consequential damages, and disclaims such damages to the full extent permitted under applicable law. The user is solely responsible to identify critical application risks and install appropriate mechanisms to protect processes during a possible equipment malfunction.

Please read this entire manual before unpacking, setting up or operating this equipment. Pay attention to all danger and caution statements. Failure to do so could result in serious injury to the operator or damage to the equipment.

Make sure that the protection provided by this equipment is not impaired. Do not use or install this equipment in any manner other than that specified in this manual.

Figura 7.1-1: Especificaciones del HQ40D Kit multímetro digital, electrodo pH gel y Conduct Std.

Fuente: (Company, 2017).

Especificaciones:

Fácil de leer pantalla digital.

Amplia Gama: 0-9990 ppm (mg / L).

Desconexión automática.

Datos botón de bloqueo.

Batería de larga duración.

Precisión: $\pm 2\%$

De prueba para materiales inorgánicos y sustancias que se encuentran comúnmente en el agua potable.

Batería: 2 baterías

Peso neto: 36g

Tamaño: 140 x 25 x 15 mm.

Figura 7.1-2: Especificaciones del Medidor digital TDS (sólidos disueltos totales) para calidad de agua.

Fuente: (ZODIECSA, 2019).



Global Water
800-876-1172 • globalw.com

VII. Specifications

Range:	0.3-19.9 FT/S (0.1-6.1 M/S)
Accuracy:	0.1 FT/S (0.1 M/S)
Averaging:	True digital running average Updated once per second
Display:	LCD, Glare and UV Protected
Sensor Type:	Turbo-Prop propeller with magnetic pickup
Length and Weight:	FP111: 3' to 6', 2 Lbs. FP211: 5' to 15', 3 Lbs. FP311: 2.5' to 5.5', 2 Lbs.
Shipping Weight (US):	FP111: 10 lbs. FP211: 13 lbs FP311: 5 Lbs.
Materials:	Probe: PVC and anodized aluminum with stainless steel water bearing Computer: ABS/Polycarbonate housing with polyester overlay
Power:	Internal Lithium, Approx 5 year life Non-Replaceable
Operating Temperature:	-20° to 70° C (-4° to 158° F) Non-Freezing
Storage Temperature:	-30° to 80° C (-22° to 176° F)

Figura 7.1-3: Especificaciones del Molinete Global Water modelo FP211

Fuente: (Water Global Company, 2009).

FR Caractéristiques techniques

Généralités

Alimentation électrique	V	DC 12 ± 0,5
Consommation totale	W	6
Dimensions ET 740	mm (bxhxp)	655x404x296
Dimensions ET 750	mm (bxhxp)	935x404x296
Poids ET 740	Kg	12,5
Poids ET 750	Kg	17
Intervalle de vitesse	t/min	de 10 a 300
Incrément de vitesse	t/min	1
Minuterie	min	0 ÷ 999
	heures	0 ÷ 99
Volume d'agitation (Pour chaque poste)	litre	1
Regulation centralisée	Vitesse égale pour chaque poste	
Temp. ambiante range	°C	+5...+40
Stokage temp. range	°C	-10...+60
Max. humidité	%	Max 80
Mode d'opération		Continuous
Degré de pollution CEI EN61010-1		2
Installation category CEI EN61010-1		2

External alimentation d'énergie

Admission	AC 100÷240V; 50-60 Hz; 1.5A
Sortie	DC 19V; 2000 mA

Figura 7.1-4: Especificaciones del equipo de pruebas de jarras (ORBECO HELLIGE modelo ET)

Fuente: (Tintometer Group, 2016).



Beam Height	5 mm
Display	LCD, shows results, parameter, name, and unit
Display Size	38 mm x 64 mm
Display Type	b/w
Operating Temperature Range	0 - 50°C
Optical System	0 / 180 transmittance
Photometric Accuracy	± 0.005 Abs @ 1.0 Abs
Photometric Linearity	± 0.002 Abs (0 - 1 Abs)
Photometric Measuring Range	0 - 20 Abs
Sample Cell Compatibility	1 in and 16 mm round vial (16 mm with adapter)
Wavelength Accuracy	± 1 nm Fixed Wavelength, varies with model.
Wavelength Range	420, 520, 560, 610 nm
Wavelength Selection	Automatic based on test selected

Figura 7.1-5: Especificaciones del colorímetro
Fuente: (Company Hach, 2013).

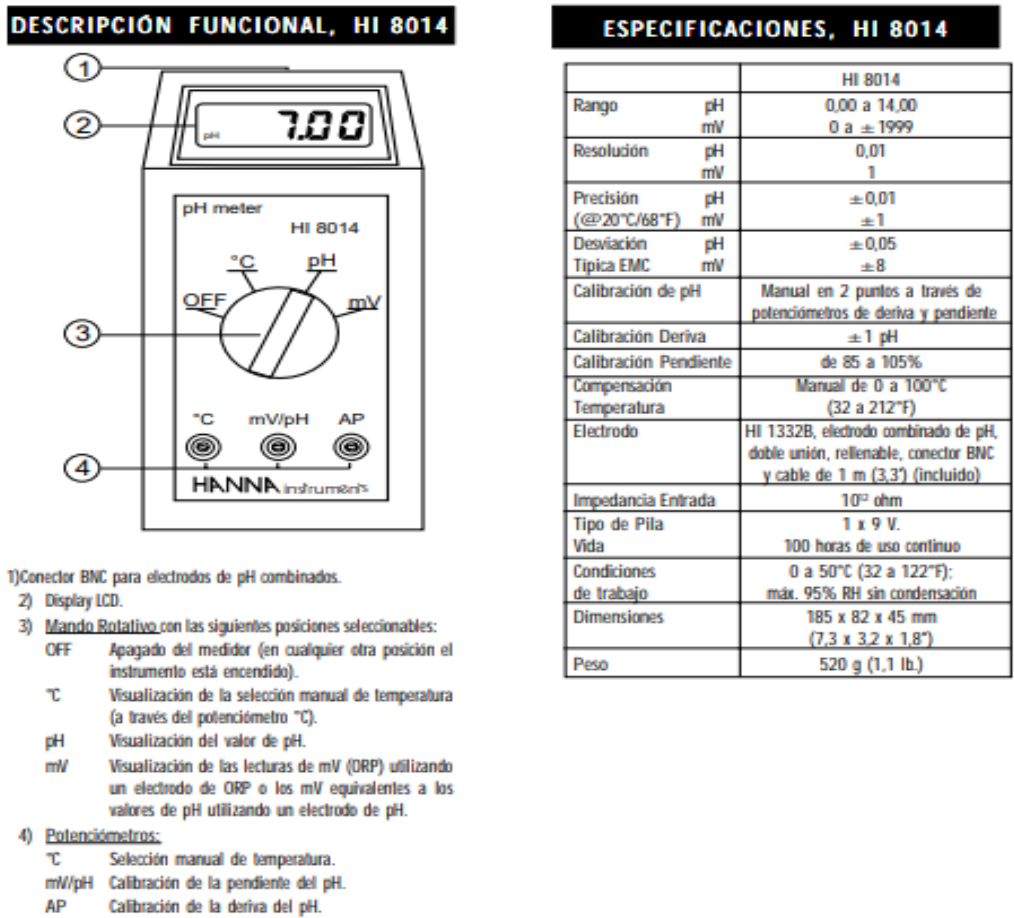


Figura 7.1-6: Especificaciones del medidor de pH
Fuente: (Hanna instruments, 1992).

Adaptador de corriente	
Módulo adaptador de corriente Sartorius	6971790 con adaptadores de corriente intercambiables, específicos para diferentes países
Primario	100–240 V _~ , –10% +10%, 50–60 Hz, 0,2 A
Secundario	15 V DC, ± 5%, 530 mA (máx.) 8 W (máx.): 0 a +40 °C y 15 V CC, ± 5%, 330 mA (máx.) 5 W (máx.): 0 a +50 °C
Otros datos	protección de clase II, según EN/IEC 60950-1 hasta 3.000 m sobre el nivel del mar; IP40 según EN/IEC 60529
Balanza	
Fuente de alimentación	exclusivamente con el módulo adaptador de corriente 6971790 de Sartorius
Tensión de entrada	12,0 ... 18,0 V CC
Consumo	2 W (generalmente)
Condiciones ambientales	
Las especificaciones son aplicables cuando se dan las siguientes condiciones ambientales:	
Entorno	Para uso exclusivo en interiores
Temperatura ambiente	+10 °C a +30 °C
Capacidad operativa	garantizada entre +5 °C y +45 °C
Almacenamiento y transporte	–10 °C a +60 °C
Altitud	hasta 3.000 m sobre el nivel del mar
Humedad relativa	15 % a 80 % para temperaturas de hasta 31 °C; en ausencia de condensación, disminuye linealmente hasta el 50 % de humedad relativa a 40 °C y hasta el 20 % a 50 °C
Seguridad de los equipos eléctricos	según las normas EN 61010-1 IEC 61010-1 Requisitos de seguridad de equipos eléctricos de medición, control y uso en laboratorios. Parte 1: Requisitos generales
Compatibilidad electromagnética	según las normas EN 61326-1 IEC 61326-1 Material eléctrico para medición, control y uso en laboratorio. Requisitos de compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 1: Requisitos generales
Resistencia a interferencias	Apto para el uso en áreas industriales
Emisión de interferencias	Clase B (apto para el uso en áreas residenciales y áreas conectadas a una red de baja tensión que dé suministro también a edificios residenciales). El dispositivo puede, por tanto, utilizarse en ambas áreas.

Figura 7.1-7: Especificaciones de la balanza analítica Sartorius

Fuente: (Sartorius, n.d.).

Descripción de Producto

ACCESORIOS OPCIONALES, MANGUERA DE SILICON

Mueble refrigerante y elementos calefactores en acero inoxidable.
Exterior en acero inoxidable protegido con esmalte epoxi.
Fácilmente desmontable para su limpieza. Sellado con junta de silicona.
Dispositivo de seguridad por sobrecalentamiento o por falta de suministro de agua.
Rácores de alimentación del agua de Ø 10-11 mm.
Rácor de agua destilada de Ø 12 mm.

Solicítenos a: comercioelectronico@elicrom.com

Otros Detalles del Producto

CAPACIDAD: 3.5 LITROS/HORA
CONSUMO AGUA L/H: 30
CONDUCTIVIDAD A 20 °C: 2,5 µs/cm
CONSUMO: 3000 W
ENERGIA: 230 V / 50-60 Hz.

Figura 7.1-8: Especificaciones del destilador – modelo AC-L4.7

Fuente: (ELICROM, 2020).

Specifications

Specifications are subject to change without notice.

Specification	Details
Measurement method	Ratio turbidimetric determination using a primary nephelometric light scatter signal (90°) to the transmitted light scatter signal.
Regulatory	2100Q: Meets EPA Method 180.1 2100Q/s: Meets ISO 7027
Lamp source	2100Q: Tungsten filament lamp 2100Q/s: Light-emitting diode (LED) at 860 nm
Range	0–1000 NTU (FNU)
Accuracy	±2% of reading plus stray light from 0–1000 NTU (FNU)
Repeatability	±1% of reading or 0.01 NTU (FNU), whichever is greater
Resolution	0.01 NTU on lowest range
Stray light	≤ 0.02 NTU (FNU)
Signal averaging	Selectable on or off
Detector	Silicon Photodiode
Reading modes	Normal (Push to Read), Signal Averaging or Rapidly Settling Turbidity™
Calibration options	Single step RapidCal™ for Low-Level Regulatory Reporting from 0–40 NTU (FNU) Full range calibration from 0–1000 NTU (FNU) Calibration to degrees of turbidity
Calibration logger	Records the last 25 successful calibrations
Verification logger	Logs the last 250 successful verifications
Data logger	500 records

Specification	Details
Power requirement	AC 100–240 V, 50/60 Hz (with power or USB/power module) 4 AA alkaline batteries Rechargeable NiMH (for use with USB/power module)
Operating conditions	Temperature: 0 to 50 °C (32 to 122 °F) Relative Humidity: 0–90% at 30 °C, 0–80% at 40 °C, 0–70% at 50 °C, noncondensing
Storage conditions	–40 to 60 °C (–40 to 140 °F), instrument only
Interface	Optional USB
Sample required	15 mL (0.5 oz.)
Sample cells	Round cells 60 x 25 mm (2.36 x 1 in.) borosilicate glass with screw caps
Dimensions	22.9 x 10.7 x 7.7 cm (9.0 x 4.2 x 3.0 in.)
Weight	530 g (1.17 lb) without batteries 620 g (1.37 lb) with four AA alkaline batteries
Meter enclosure rating	IP67 (closed lid, battery and module compartment excluded)
Protection class	Power supply: Class II
Certification	CE certified
Warranty	1 year

General Information

In no event will the manufacturer be liable for direct, indirect, special, incidental or consequential damages resulting from any defect or omission in this manual. The manufacturer reserves the right to make changes in this manual and the products it describes at any time, without notice or obligation. Revised editions are found on the manufacturer's website.

Figura 7.1-9: Especificaciones del Hach 2100Q Portable Turbidity Meter Manual

Fuente: (Company, 2013).

7.2 Anexo VII-B: Datos de las condiciones iniciales del agua cruda

Tabla 7.2-1: Resultados de los Parámetros iniciales en las pruebas de jarras para un caudal de 1000 l/s

Floculador 1			
	Conductividad	Temperatura	Caudal
Agua en el floculador	100 (us/cm)	15 (°C)	993 (l/s)
Solución de cloruro de sodio (NaCl)	251 (ms/cm)	13.5 (°C)	

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.2-2: Resultados de los Parámetros iniciales en las pruebas de jarras para un caudal de 950 l/s

Floculador 1			
	Conductividad	Temperatura	Caudal
Agua en el floculador	116.5 (us/cm)	14.9 (°C)	950 (l/s)
Solución de cloruro de sodio (NaCl)	251 (ms/cm)	14.6 (°C)	

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.2-3: *Resultados de los Parámetros iniciales en las pruebas de jarras para un caudal de 800 l/s*

Floculador 1			
	Conductividad	Temperatura	Caudal
Agua en el floculador	106 (us/cm)	14 (°C)	800 (l/s)
Solución de cloruro de sodio (NaCl)	251 (ms/cm)	14.6 (°C)	

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.2-4 : *Resultados de los Parámetros iniciales en las pruebas de jarras para un caudal de 1000 l/s*

Floculador 2			
	Conductividad	Temperatura	Caudal
Agua en el floculador	106.3 (us/cm)	15 (°C)	993 (l/s)
Solución de cloruro de sodio (NaCl)	250 (ms/cm)	15.4 (°C)	

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.2-5: *Resultados de los Parámetros iniciales en las pruebas de jarras para un caudal de 950 l/s*

Floculador 2			
	Conductividad	Temperatura	Caudal
Agua en el floculador	106 (us/cm)	14.6 (°C)	950 (l/s)
Solución de cloruro de sodio (NaCl)	251 (ms/cm)	14.6 (°C)	

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.2-6 : *Resultados de los Parámetros iniciales en las pruebas de jarras para un caudal de 800 l/s*

Floculador 2			
	Conductividad	Temperatura	Caudal

Agua en el floculador	112.2 (us/cm)	14 (°C)	800 (l/s)
Solución de cloruro de sodio (NaCl)	253 (ms/cm)	15.6 (°C)	

Fuente: Criollo & Lara (2020).

7.3 Anexo VII-C: Resultados de la evaluación de los floculadores

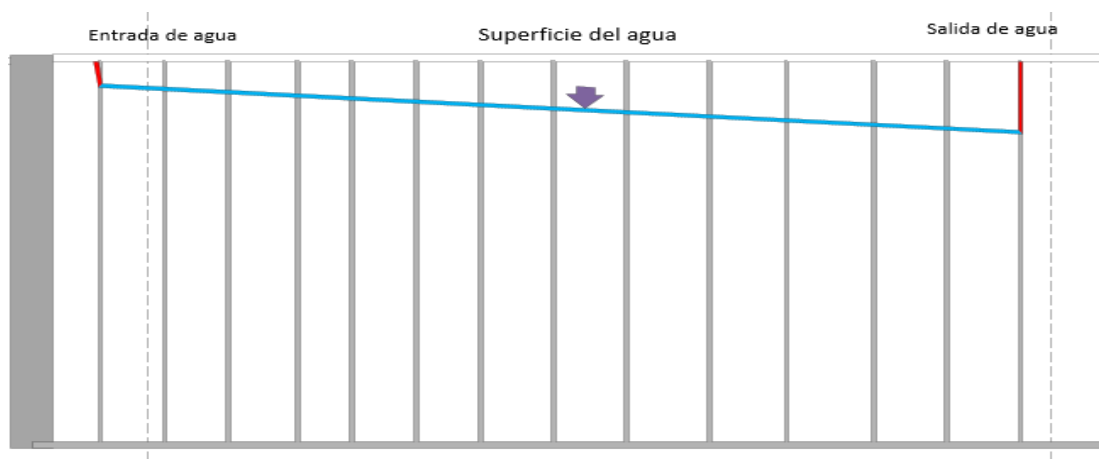


Figura 7.3-1: Pérdida de carga - Floculador 2 (Corte frontal)

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.3-1: Resultados de los cálculos en la intensidad de floculación para un caudal de 1000 l/s

Floculador 1	
Tiempo de retención	20 (min) → 1200 (s)
Temperatura	15 (°C)
$\sqrt{y/u}$	2920
Pérdida de carga al ingreso del floculador	42 (cm)
Pérdida de carga en la salida del floculador	60.5 (cm)
Pérdida de carga	18.5 (cm) → 0.185 (m)
Gradiente de velocidad	36.3 (s ⁻¹)

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.3-2 : Resultados de los cálculos en la intensidad de floculación para un caudal de 950 l/s

Floculador 1	
Tiempo de retención	18.5 (min) → 1110 (s)
Temperatura	14.9 (°C)

$\sqrt{y/u}$	2920
Pérdida de carga al ingreso del floculador	41 (cm)
Pérdida de carga en la salida del floculador	60.8 (cm)
Pérdida de carga	19.8 (cm) $\rightarrow$ 0.198 (m)
Gradiente de velocidad	39 (s ⁻¹)

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.3-3: *Resultados de los cálculos en la intensidad de floculación para un caudal de 800 l/s*

Floculador 1	
Tiempo de retención	18.3 (min) $\rightarrow$ 1098 (s)
Temperatura	14 (°C)
$\sqrt{y/u}$	2920
Pérdida de carga al ingreso del floculador	62 (cm)
Pérdida de carga en la salida del floculador	83 (cm)
Pérdida de carga	21 (cm) $\rightarrow$ 0.21 (m)
Gradiente de velocidad	39.9 (s ⁻¹)

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.3-4: *Resultados de los cálculos en la intensidad de floculación para un caudal de 1000 l/s*

Floculador 2	
Tiempo de retención	22.5 (min) $\rightarrow$ 1350 (s)
Temperatura	15 (°C)
$\sqrt{y/u}$	2920
Pérdida de carga al ingreso del floculador	53 (cm)
Pérdida de carga en la salida del floculador	75 (cm)
Pérdida de carga	22 (cm) $\rightarrow$ 0.22 (m)
Gradiente de velocidad	37.3 (s ⁻¹)

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.3-5: *Resultados de los cálculos en la intensidad de floculación para un caudal de 950 l/s*

Floculador 2	
Tiempo de retención	21.5 (min) → 1290 (s)
Temperatura	14.6 (°C)
$\sqrt{y/u}$	2920
Pérdida de carga al ingreso del floculador	53 (cm)
Pérdida de carga en la salida del floculador	76.5 (cm)
Pérdida de carga	23.5 (cm) → 0.235 (m)
Gradiente de velocidad	39.4 (s ⁻¹)

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.3-6 : *Resultados de los cálculos en la intensidad de floculación para un caudal de 800 l/s*

Floculador 2	
Tiempo de retención	21.3 (min) → 1278 (s)
Temperatura	14 (°C)
$\sqrt{y/u}$	2883.4
Pérdida de carga al ingreso del floculador	61 (cm)
Pérdida de carga en la salida del floculador	86 (cm)
Pérdida de carga	25 (cm) → 0.25 (m)
Gradiente de velocidad	40.3 (s ⁻¹)

Fuente: Criollo & Lara (2020).

7.4 Anexo VII-D: Evidencias fotográficas de los equipos utilizados



Figura 7.4-1: Kit multiparámetro para medir la conductividad
Fuente: Criollo & Lara (2020).



Figura 7.4-2: Equipo utilizado para medir sólidos disueltos totales
Fuente: Criollo & Lara (2020).



Figura 7.4-3: Equipo para medir el pH
Fuente: Criollo & Lara (2020).



Figura 7.4-4: Colorímetro para medir el color
Fuente: Criollo & Lara (2020).



Figura 7.4-5: Equipo utilizado para destilar el agua, ocupada para lavar los equipos
Fuente: Criollo & Lara (2020).

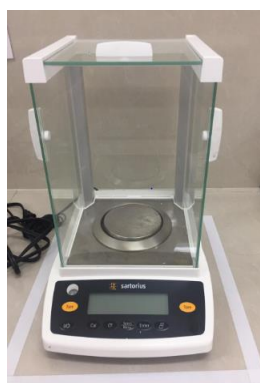


Figura 7.4-6: Equipo utilizado para pesar el SAGA y SAGB
Fuente: Criollo & Lara (2020).



Figura 7.4-7: Equipo utilizado para medir la turbiedad
Fuente: Criollo & Lara (2020).



Figura 7.4-8: Equipo de pruebas de jarras - 4 paletas
Fuente: Criollo & Lara (2020).

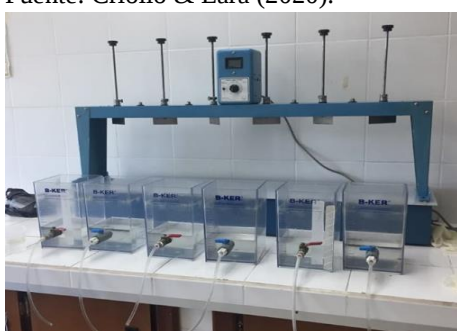


Figura 7.4-9: Equipo de pruebas de jarras - 6 paletas
Fuente: Criollo & Lara (2020).

7.5 Anexo VII-E: Evidencias fotográficas de las pruebas realizadas en la planta



Figura 7.5-1: Mezcla de la Solución de cloruro de sodio en San Miguel de Potushi
Fuente: Criollo & Lara (2020).



Figura 7.5-2: Medición de parámetros fisicoquímicos en San Miguel de Potushi
Fuente: Criollo & Lara (2020).



Figura 7.5-3: Cloruro de sodio
Fuente: Criollo & Lara (2020).



Figura 7.5-4: Colocación de cloruro de sodio para pruebas de trazadores
Fuente: Criollo & Lara (2020).



Figura 7.5-5: Mezcla de la solución cloruro de sodio para pruebas de trazadores
Fuente: Criollo & Lara (2020).



Figura 7.5-6: Solución de cloruro de sodio en la PTAP
Fuente: Criollo & Lara (2020).



Figura 7.5-7: Envases utilizadas para pruebas de trazadores
Fuente: Criollo & Lara (2020).



Figura 7.5-8: Cloruro de sodio pesada para las pruebas de trazadores
Fuente: Criollo & Lara (2020).



Figura 7.5-9: Pesado del cloruro de sodio
Fuente: Criollo & Lara (2020).



Figura 7.5-10: Envases utilizados para el equipo de jarras
Fuente: Criollo & Lara (2020).



Figura 7.5-11: Balones de aforo para realizar las soluciones
Fuente: Criollo & Lara (2020).



Figura 7.5-12: Mortero para triturar el SAGA y SAGB
Fuente: Criollo & Lara (2020).

7.6 Anexo VII-F: Fichas técnicas de los químicos

 QUIMPAC ECUADOR S.A.		Página 1 de 5 Fecha de Revisión:	MSDS No: 41 08-ene-2016
SULFATO DE ALUMINIO TIPO B			
HOJA DE SEGURIDAD DE MATERIALES			
1. IDENTIFICACION DEL MATERIAL Y DE LA COMPAÑIA			
Nombre Comercial: QUIMPAC 1010SG Nombre Químico: Sulfato de Aluminio, Grado 2, tipo B Grueso; – Aluminun Sulfate-Grade 2 thick type B Uso: Tratamiento de Aguas Formula Química: $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$ Nombre de la Comercializadora: QUIMPAC ECUADOR S.A. Dirección de la Comercializadora: Km. 16.5 vía a Daule, Av. Rosavín y Cobre			
TELEFONOS DE EMERGENCIA			
QUIMPAC ECUADOR S.A.: (593-4) 2162680-2162220 Ext. 330 099-9482-937 / 099-9500-081			
2. IDENTIFICACION DE LOS RIESGOS			
ELEMENTO DE PROTECCION PERSONAL			
			
CLASIFICACION SGA DE SUSTANCIA / MEZCLA			
			
Atención Nocivo para los organismos acuáticos		Atención Provoca irritaciones cutáneas y oculares graves	
UN: 9078			

Figura 7.6-1: Hoja de seguridad del sulfato de aluminio, Grado 2, tipo B Grueso
 Fuente: (Quimpac Ecuador S.A, 2016).

	QUIMPAC Ecuador S.A.	
Cont. Especial - Autorización SRI 1103636762 RUC 0990344760001 Calif. CONSEP: 09-0866-I	FICHA TÉCNICA N°40 FECHA DE REVISIÓN: ENERO-2017	

PRODUCTO: SULFATO DE ALUMINIO GRADO 1 TIPO A GRUESO / Aluminum Sulfate Grade 1 Thick Type A

NOMBRE COMERCIAL: QUIMPAC 1000 SG

FÓRMULA : $(\text{SO}_4)_3 \text{Al}_2 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$

DESCRIPCIÓN: Grano color blanco, sabor astringente y ligeramente dulce, olor característico, soluble en agua.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

COMPONENTES	ESPECIFICACIÓN	MÉTODO
Alúmina soluble Total expresada como Al_2O_3	17 % m/m Min	INEN 1907
Basicidad, expresada como Al_2O_3	0.05 % m/m Min	INEN 1906
Hierro soluble total, expresado como Fe_2O_3	0.01 % m/m Max	INEN 1908
Materias insolubles en agua	0.5 % m/m Max	INEN 1905
Dosificación máxima uso (MUL)	250 mg/l	NSF 60-Método K

PRESENTACIÓN

GRUESO Malla 4
100 %

APLICACIONES:

- Tratamiento de agua potable.
- Tratamiento de efluentes municipales e industriales.

EMPAQUE Y EMBARQUE:

Sacos de polipropileno de 25 y 50 Kg

Para mayor información contactar a nuestro Departamento de Ventas.

NOTA: Los datos contenidos en boletín tienen por objeto orientar y dar servicio. Sin embargo y debido a sus múltiples usos la garantía de nuestro producto está sujeta al manejo posterior por parte de los usuarios.

Figura 7.6-2: Hoja de seguridad de sulfato de aluminio Grado 1 tipo A Grueso
Fuente: (Quimpac Ecuador S.A., 2017).

	Page: 1
SAFETY DATA SHEET	Revision Date: 05/23/2015
	Print Date: 6/9/2015
	SDS Number: R0606126
Praestol™ 650 TR FLOCCULANT ™ Trademark, Solenis or its subsidiaries or affiliates, registered in various countries 383120	Version: 1.2

29 CFR 1910.1200 (OSHA HazCom 2012)

SECTION 1. PRODUCT AND COMPANY IDENTIFICATION

Product identifier

Trade name : Praestol™ 650 TR
FLOCCULANT
™ Trademark, Solenis or its subsidiaries or affiliates,
registered in various countries

Recommended use of the chemical and restrictions on use

Use of the Substance/Mixture : Flocculating agent

Details of the supplier of the safety data sheet Solenis LLC 500 Hercules Road Wilmington Delaware 19808 United States of America RegulatoryRequestsNA@solenis.com	Emergency telephone number 1-844-SOLENIS (844-765-3647) / 606-329-5705 Product information 1-844-SOLENIS (844-765-3647)
--	--

SECTION 2. HAZARDS IDENTIFICATION

GHS Classification

Combustible Dust :

Carcinogenicity (Dermal) : Category 2

GHS Label element

Hazard pictograms :



Signal Word : Warning

Hazard Statements : May form combustible dust concentrations in air.
Suspected of causing cancer in contact with skin.

Precautionary Statements : **Prevention:**
Obtain special instructions before use.
Do not handle until all safety precautions have been read and understood.
Wear protective gloves/ protective clothing/ eye protection/ face

Figura 7.6-3: Hoja de seguridad del polímero
Fuente: (Solenis, 2015).

7.7 Anexo VII-G: Resultados de los caudales registrados

Tabla 7.7-1: *Resumen de los caudales registrados en los canales internos y canal de conducción*

Método de dilución con trazadores							
Número de pruebas realizadas	Caudal del canal interno 1(l/s)	% del caudal en el canal 1	Caudal del canal interno 2 (l/s)	% del caudal en el canal 2	Caudal del canal de conducción (l/s)	Caudal total registrado en las pruebas (l/s)	Caudal total registrado en la planta (l/s)
4	510	49 %	535	51 %	1031	1045	1000-1050
4	431	45 %	533	55 %	972	964	950 - 1000
2	389	47 %	445	53 %	-	834	800-850
Método área velocidad (Molinete)							
Número de pruebas realizadas	Caudal del canal interno 1(l/s)	% del caudal en el canal 1	Caudal del canal interno 2 (l/s)	% del caudal en el canal 2	Caudal del canal de conducción (l/s)	Caudal total registrado en las pruebas (l/s)	Caudal total registrado en la planta (l/s)
4	478	46 %	554	54 %	1061	1032	1000-1050
4	453	46 %	525	54 %	984	978	950 – 1000
2	414	49 %	433	51 %	862	847	800 - 850

Fuente: Criollo & Lara (2020).

7.8 Anexo VII-H: Relación entre el gradiente de velocidad y las pruebas de jarras

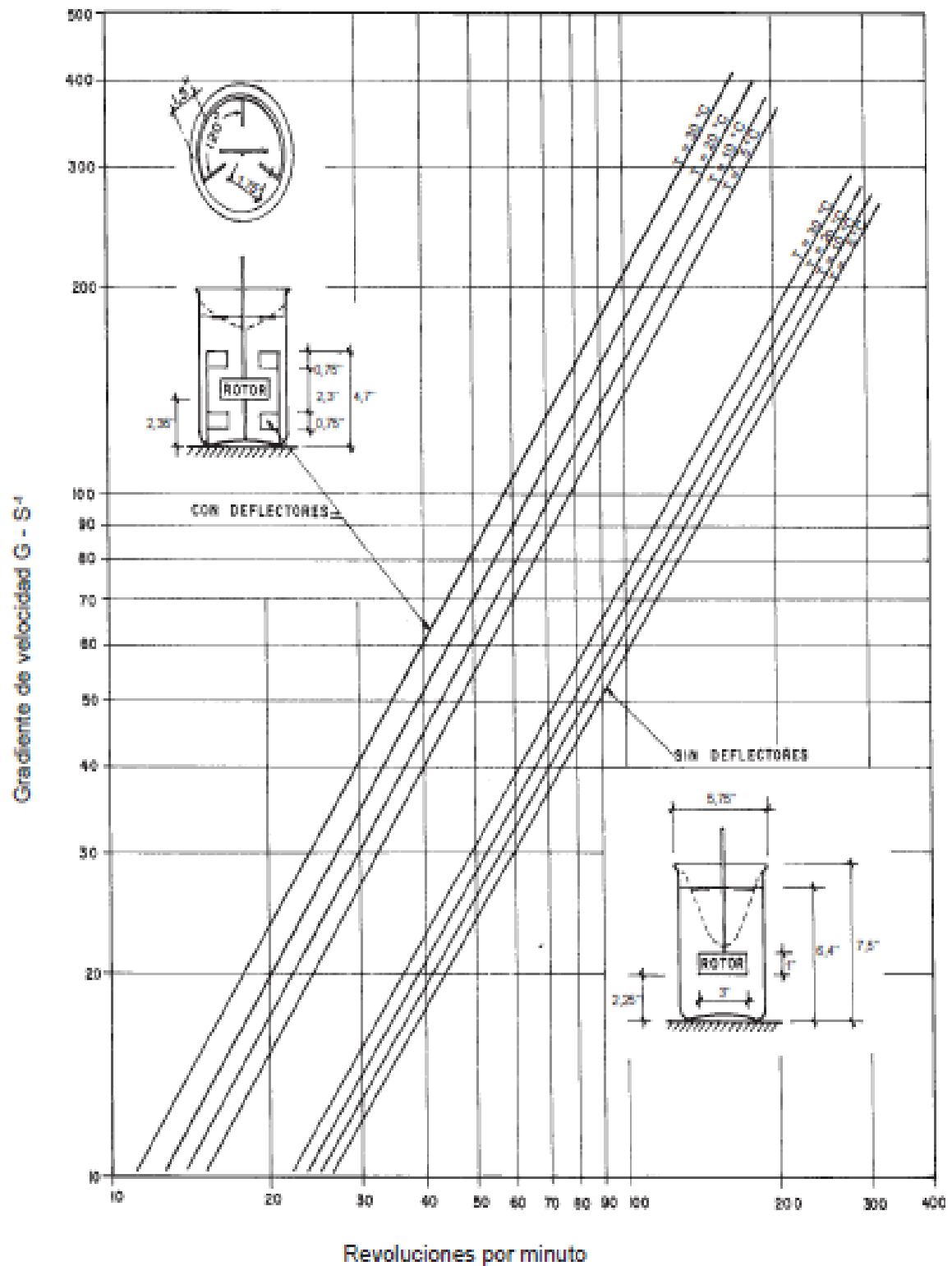


Figura 7.8-1: Relación del gradiente de velocidad con las revoluciones por minuto de un equipo de prueba de jarras con recipiente de 1 litro
Fuente: (Vargas, 2004d).

7.9 Anexo VII-I: Ensayos de laboratorio son SAGB para un caudal de 1000 l/s

Tabla 7.9-1: *Dosis óptima para un caudal de 1000 l/s- SAGB*

Número de ensayo	TURB inicial [NTU]	Dosificación $\frac{mg}{l}$				TURB Residual [NTU]				Dosis óptima $\frac{mg}{l}$
		J1	J2	J3	J4	J1	J2	J3	J4	
1	8	23	30	35	40	1,39	0,64	3,44	0,45	23
2	4,61	15	20	25	30	5,61	0,85	0,66	1,08	20
3	2,89	5	10	15	20	2,66	1,99	1,11	0,87	15
4	3,72	18	20	24	27	3,51	0,99	0,66	1,05	20
5	264	29	39	41	43	10,3	0,88	0,86	0,49	39
6	337	35	42	45	50	1,3	0,7	0,95	0,6	42
7	4,95	18	20	25	27	8,7	0,6	0,76	1,18	20
8	23,7	26	31	32	33	1,1	3,55	0,82	0,97	26
9	210	25	30	37	40	1,13	1	0,88	0,76	37
10	237	30	33	35	38	0,95	0,49	0,77	0,67	38
11	37,7	20	27	29	30	21,6	5,16	1,17	1,49	29
12	7,86	19	22	23	28	1,39	1,36	1	1,72	23
13	13	15	20	25	28	9,22	10,4	1,08	0,47	25
14	6,42	5	10	15	20	4,37	5,82	0,9	0,52	15
15	26	16	18	19	28	11	1,47	1,04	0,79	28
16	4	12	13,8	14	16	4,7	1,01	0,55	1,5	14
17	71	28	31	35	38	1,57	0,86	1,25	1,26	31
18	101	28	33	36	38	1,3	1,58	1,59	1,71	33
19	500	42	44	46	48	1,62	0,91	0,67	0,92	44
20	24	25	27	29	30	12,6	2,42	0,98	0,49	27
21	119	30	32	34	36	30,1	10,4	4,65	1,17	36
22	136	25	30	32	35	17	13,7	10,9	1	35
23	2,59	5	10	18	20	2,62	3,84	0,92	0,61	18

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.9-2: *Calor aparente óptimo para un caudal de 1000 l/s- SAGB*

Número de ensayo	CA inicial [UPC]	Dosificación $\frac{mg}{l}$				CA Residual [UPC]				CA óptimo [UPC]
		J1	J2	J3	J4	J1	J2	J3	J4	
1	85	23	30	35	40	4.32	6.35	5.48	6.78	4.32
2	41	15	20	25	30	55.8	3.49	5.89	6.59	3.49
3	33	5	10	15	20	24.58	6.58	2.61	13.58	2.61
4	39	18	20	24	27	44.59	13.57	5.68	3.89	3.57
5	1407	29	39	41	43	89.6	9.82	20.89	10.59	9.82
6	1622	35	42	45	50	20.8	10.89	11.59	12.35	10.89
7	45	18	20	25	27	79.52	3.25	5.21	6.72	3.25
8	210	26	31	32	33	16.79	38.69	8.56	10.5	6.79
9	1068	25	30	37	40	9.10	10.11	8.19	8.10	8.39
10	1125	30	33	35	38	10.25	10.22	9.10	8.64	8.64
11	385	20	27	29	30	151.5	58.59	6.72	7.88	6.72
12	74	19	22	23	28	5.58	5.26	2.54	2.91	2.54
13	185	15	20	25	28	77.15	87.55	6.59	6.94	6.59
14	45	5	10	15	20	38.5	50.5	5.61	12,5	5.61
15	217	16	18	19	28	28	9	4,25	3,5	3,5
16	40	12	13,8	14	16	30	2	2.58	9	2
17	645	28	31	35	38	9	2.89	2	5.6	2
18	700	28	33	36	38	8.9	2.68	10	10.89	2.68
19	1800	42	44	46	48	15.5	1.59	20.5	11.58	1.59
20	215	25	27	29	30	88.12	7.5	38,5	90.59	7,5
21	716	30	32	34	36	255	134	44	10	10
22	764	25	30	32	35	140	100.5	89.64	11.58	11.28
23	32	5	10	18	20	20.59	30.55	5.89	7.8	5.89

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.9-3 : *pH óptimo para un caudal de 1000 l/s- SAGB*

Número de ensayo	pH inicial	Dosificación $\frac{mg}{l}$				pH Residual				pH óptimo
		J1	J2	J3	J4	J1	J2	J3	J4	
1	7.55	23	30	35	40	7.22	7.15	7.10	7.0	7.22
2	7.23	15	20	25	30	7.20	7.10	7.0	6.89	7.10
3	7.89	5	10	15	20	7.50	7.24	7.10	7.0	7.10
4	7.59	18	20	24	27	7.45	7.28	7.20	7.11	7.28
5	7.29	29	39	41	43	7.20	7.12	7.10	7.14	7.12
6	7.55	35	42	45	50	7.48	7.40	7.31	7.30	7.40
7	7.24	18	20	25	27	7.20	7.10	7.10	6.94	7.10
8	7.57	26	31	32	33	7.41	7.42	7.30	7.22	7.41
9	7.9	25	30	37	40	7.80	7.45	7.25	7.25	7.25
10	7.76	30	33	35	38	7.53	7.45	7.18	7.15	7.15
11	7,36	20	27	29	30	7.20	7.15	7.10	7	7.10
12	7.74	19	22	23	28	7.75	7.68	7.24	7.24	7.24
13	7.68	15	20	25	28	7.50	7.55	7.32	7.22	7.32
14	7,64	5	10	15	20	7,61	7,52	7,38	7,28	7,38
15	7,73	16	18	19	28	7,25	7,26	7,24	7,12	7,24
16	7,8	12	13,8	14	16	7,52	7,5	7,44	7,43	7,5
17	7,5	28	31	35	38	6,96	7	7	6,95	7
18	7,25	28	33	36	38	6,95	6,95	6,87	6,8	6,95
19	7,25	42	44	46	48	6,72	6,73	6,7	6,68	6,73
20	7,67	25	27	29	30	7,08	7	6,96	6,9	7
21	7,4	30	32	34	36	6,65	6,8	6,58	6,57	6,57
22	7,51	25	30	32	35	6,72	6,72	6,7	6,35	6,35
23	7,92	5	10	18	20	7,76	7,66	7,39	7,46	7,39

Fuente: Criollo & Lara (2020).

7.10 Anexo VII-J: Método de Wolf- Resnick

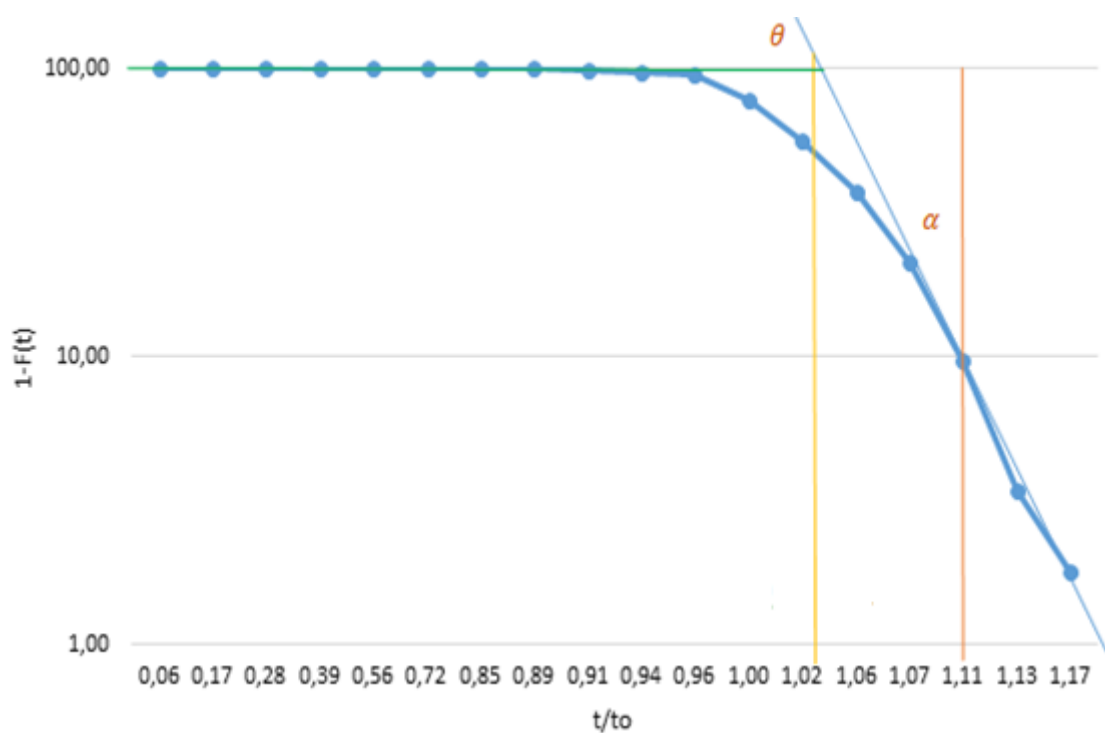


Figura 7.10-1 : Método de Wolf - Resnick para un caudal de 950 l/s en el floculador 1.
Fuente: Criollo & Lara (2020).

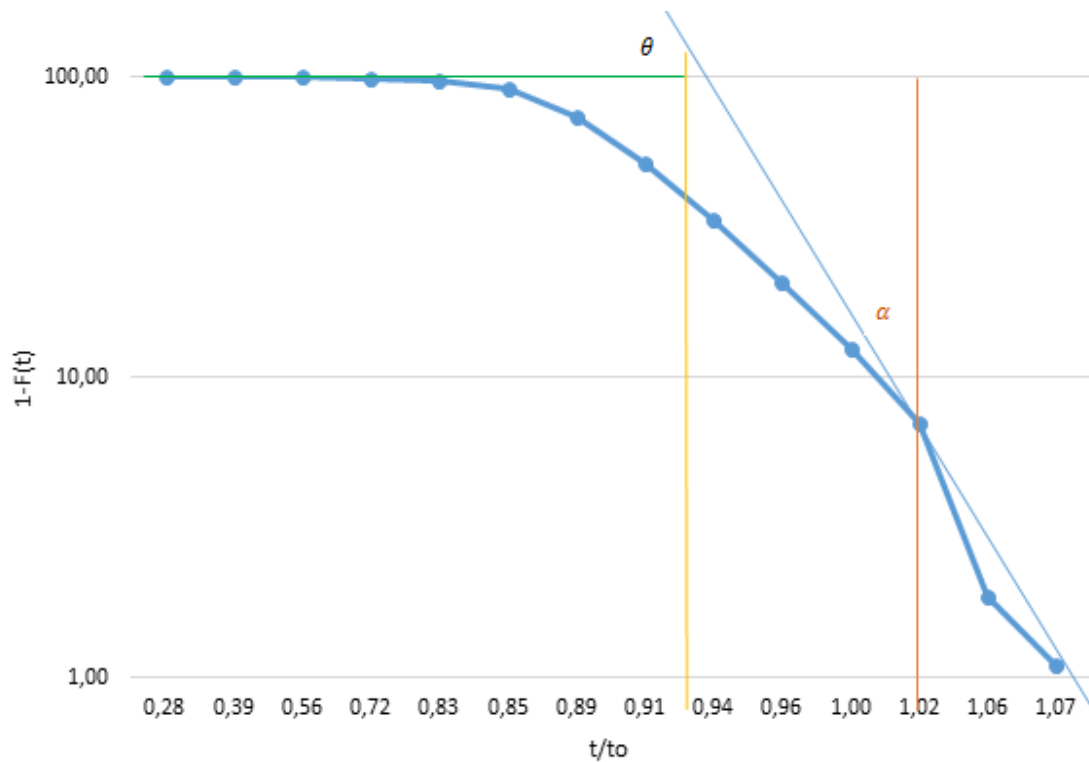


Figura 7.10-2: Método de Wolf - Resnick para un caudal de 800 l/s en el floculador 1.
Fuente: Criollo & Lara (2020).

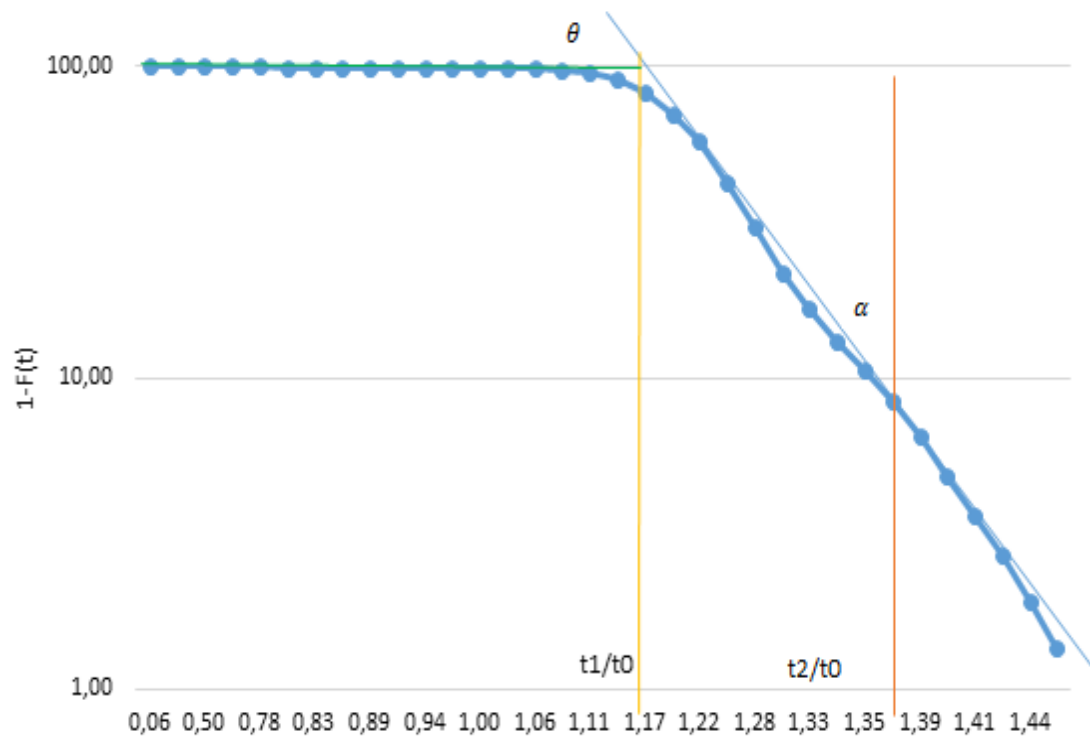


Figura 7.10-3: Método de Wolf - Resnick para un caudal de 1000 l/s en el floculador 2.
Fuente: Criollo & Lara (2020).

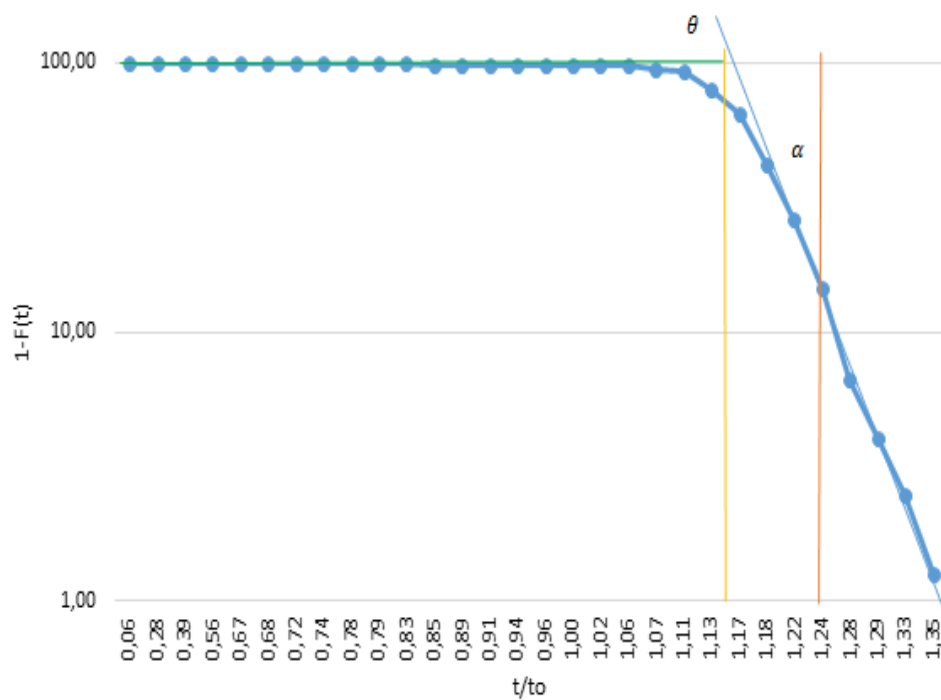


Figura 7.10-4: Método de Wolf - Resnick para un caudal de 950 l/s en el floculador 2.
Fuente: Criollo & Lara (2020).

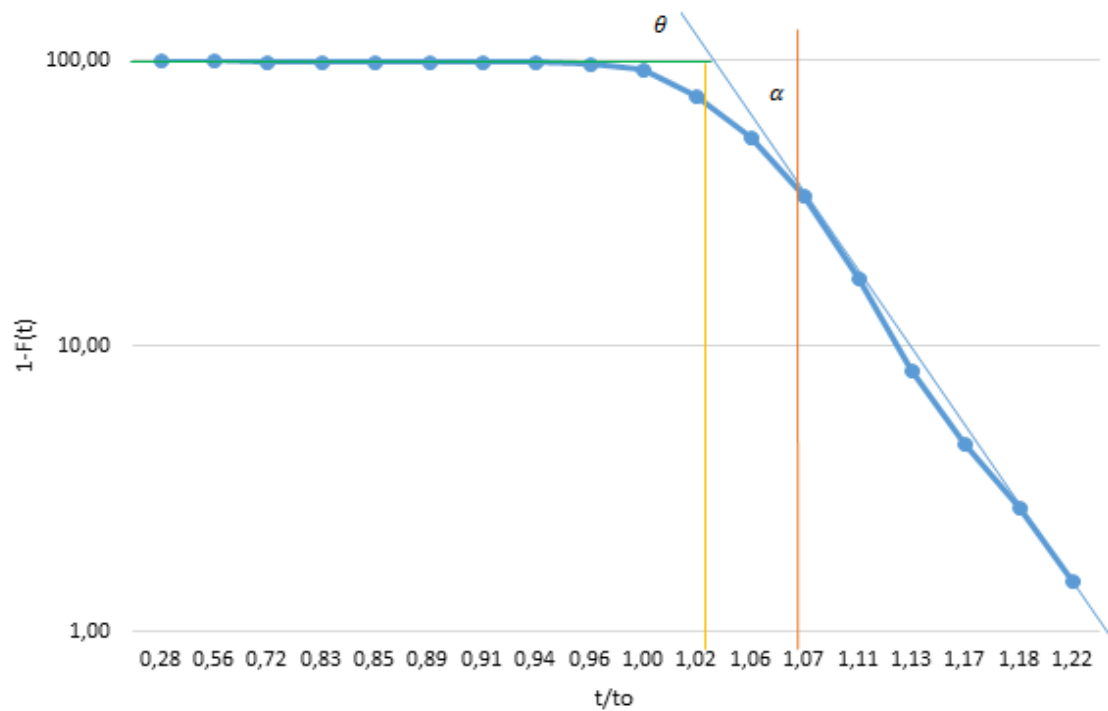


Figura 7.10-5: Método de Wolf - Resnick para un caudal de 800 l/s en el floculador 2.
Fuente: Criollo & Lara (2020).

7.11 Anexo VII-K: Curvas de tendencia

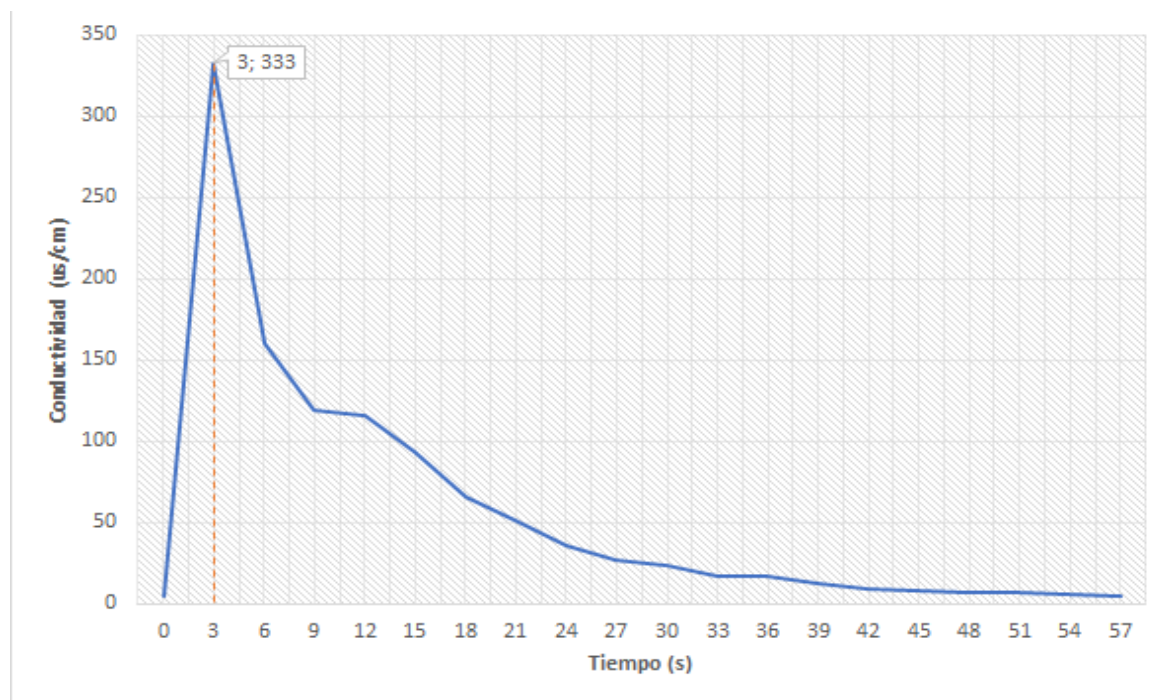


Figura 7.11-1: Tiempo de retención de la mezcla rápida.
Fuente: Criollo & Lara (2020).

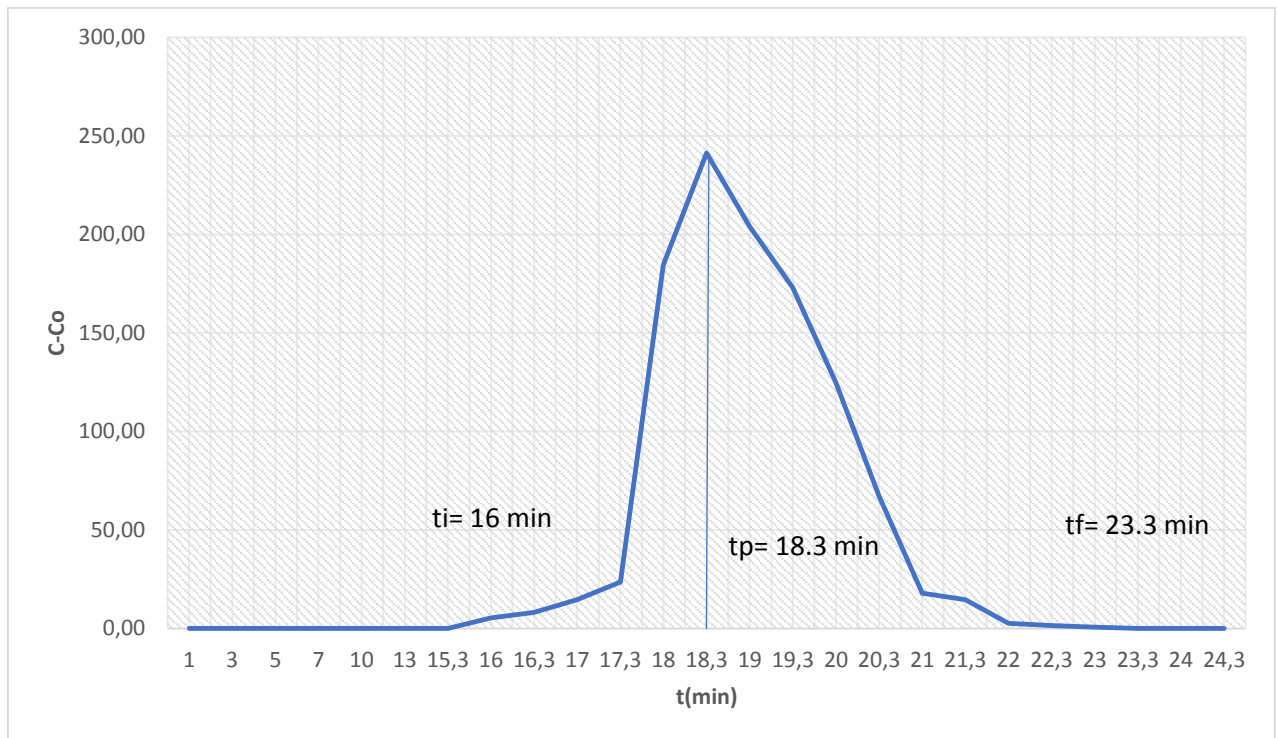


Figura 7.11-2: Curva de tendencia para un caudal de 950 l/s en el floculador 1
Fuente: Criollo & Lara (2020).

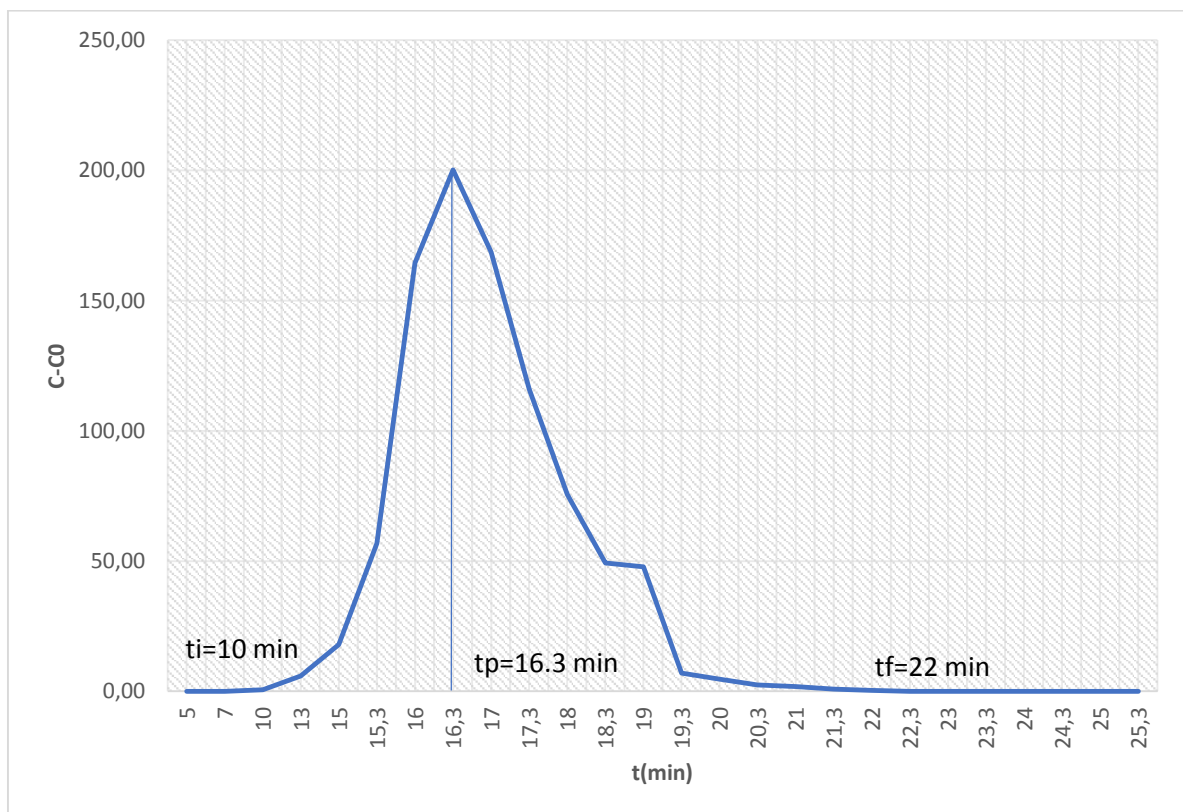


Figura 7.11-3: Curva de tendencia para un caudal de 800 l/s en el floculador 1
Fuente: Criollo & Lara (2020).

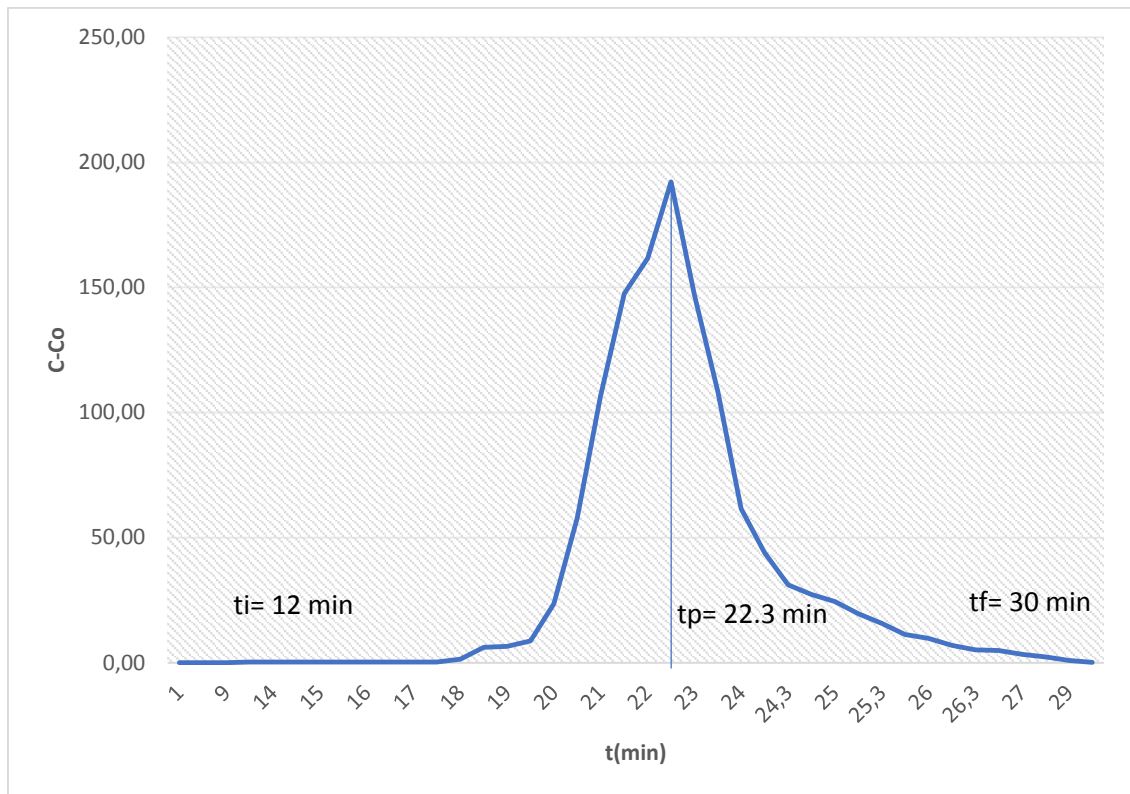


Figura 7.11-4: Curva de tendencia para un caudal de 1000 l/s en el floculador 2
Fuente: Criollo & Lara (2020).

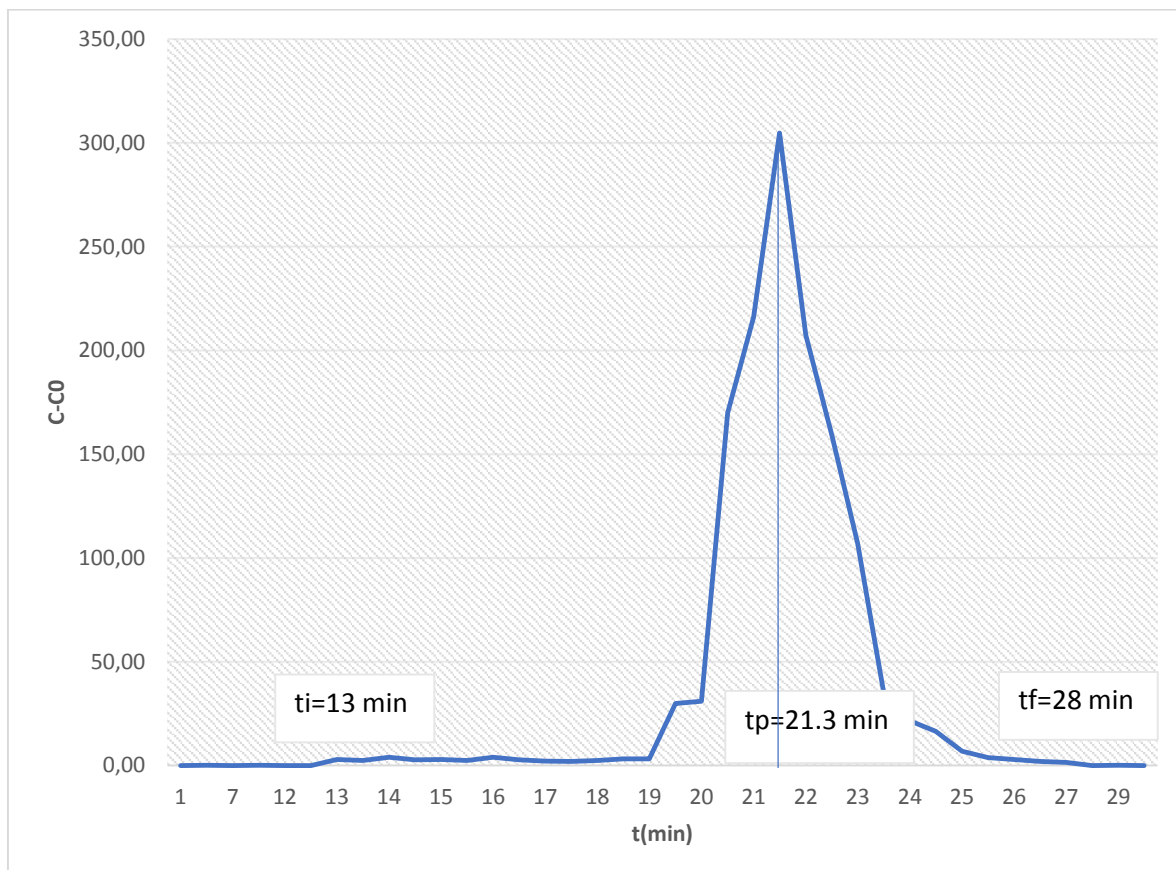


Figura 7.11-5: Curva de tendencia para un caudal de 950 l/s en el floculador 2
Fuente: Criollo & Lara (2020).

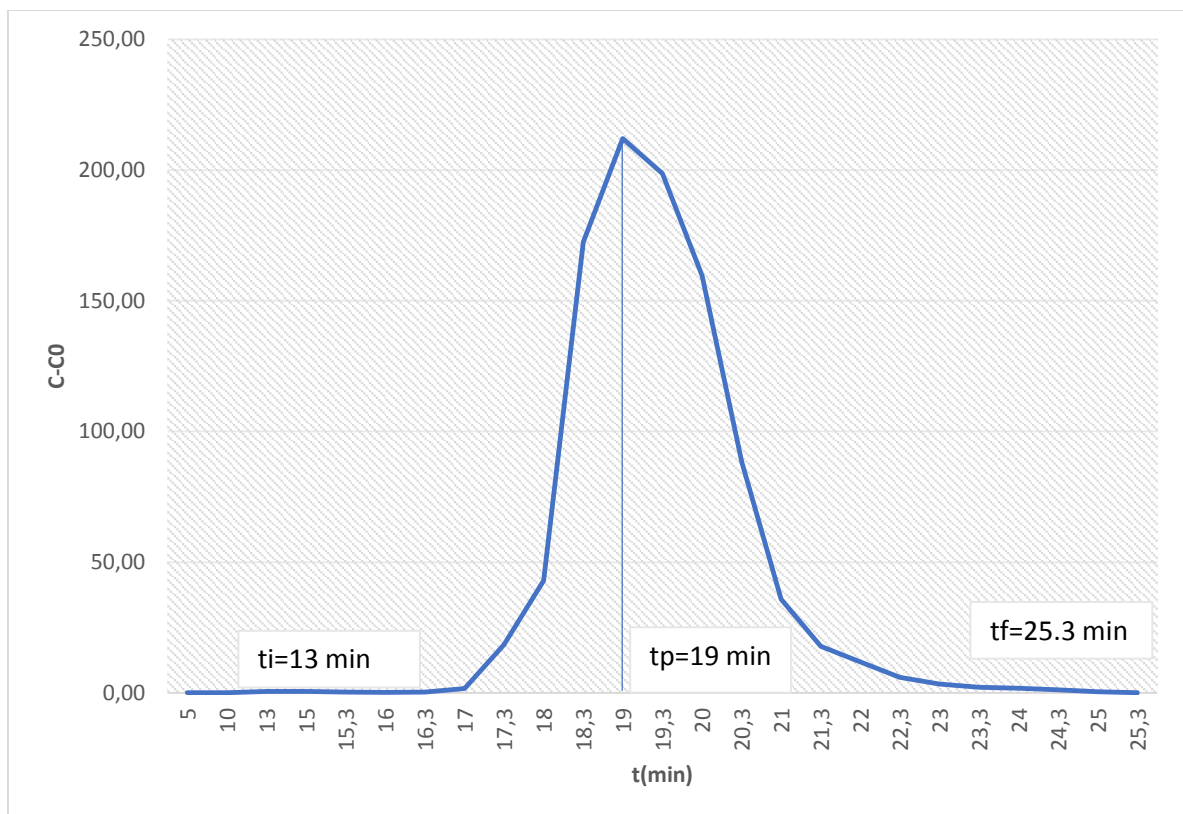


Figura 7.11-6: Curva de tendencia para un caudal de 800 l/s en el floculador 2

Fuente: Criollo & Lara (2020).

7.12 Anexo VII-L: Índice de Morrill

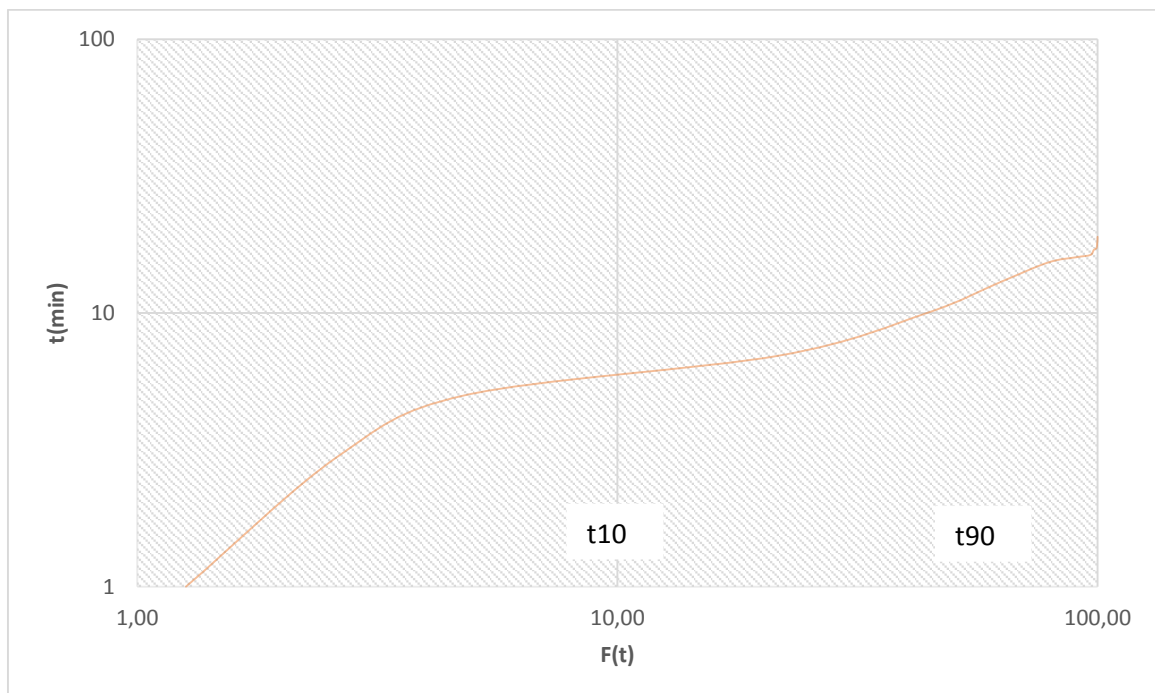


Figura 7.12-1: Índice de Morrill para un caudal de 950 l/s en el floculador 1

Fuente: Criollo & Lara (2020).

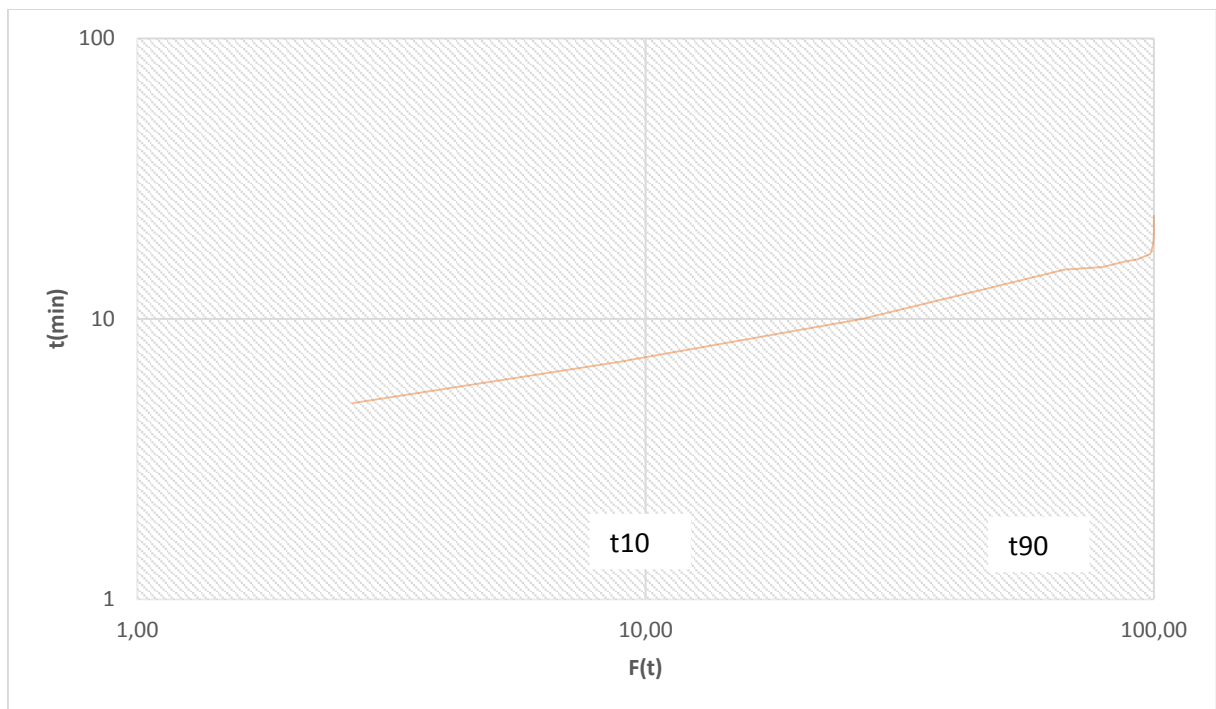


Figura 7.12-2: Índice de Morril para un caudal de 800 l/s en el floculador 1
Fuente: Criollo & Lara (2020).

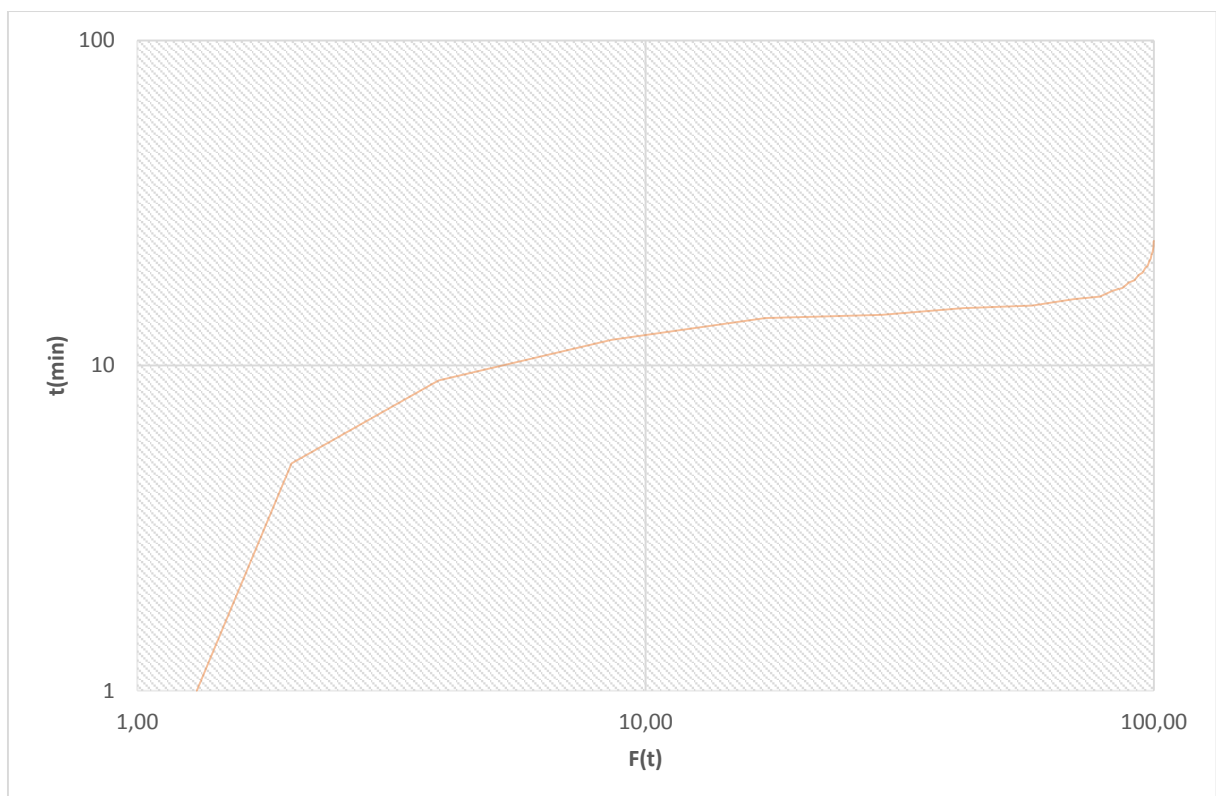


Figura 7.12-3: Índice de Morril para un caudal de 1000 l/s en el floculador 2
Fuente: Criollo & Lara (2020).

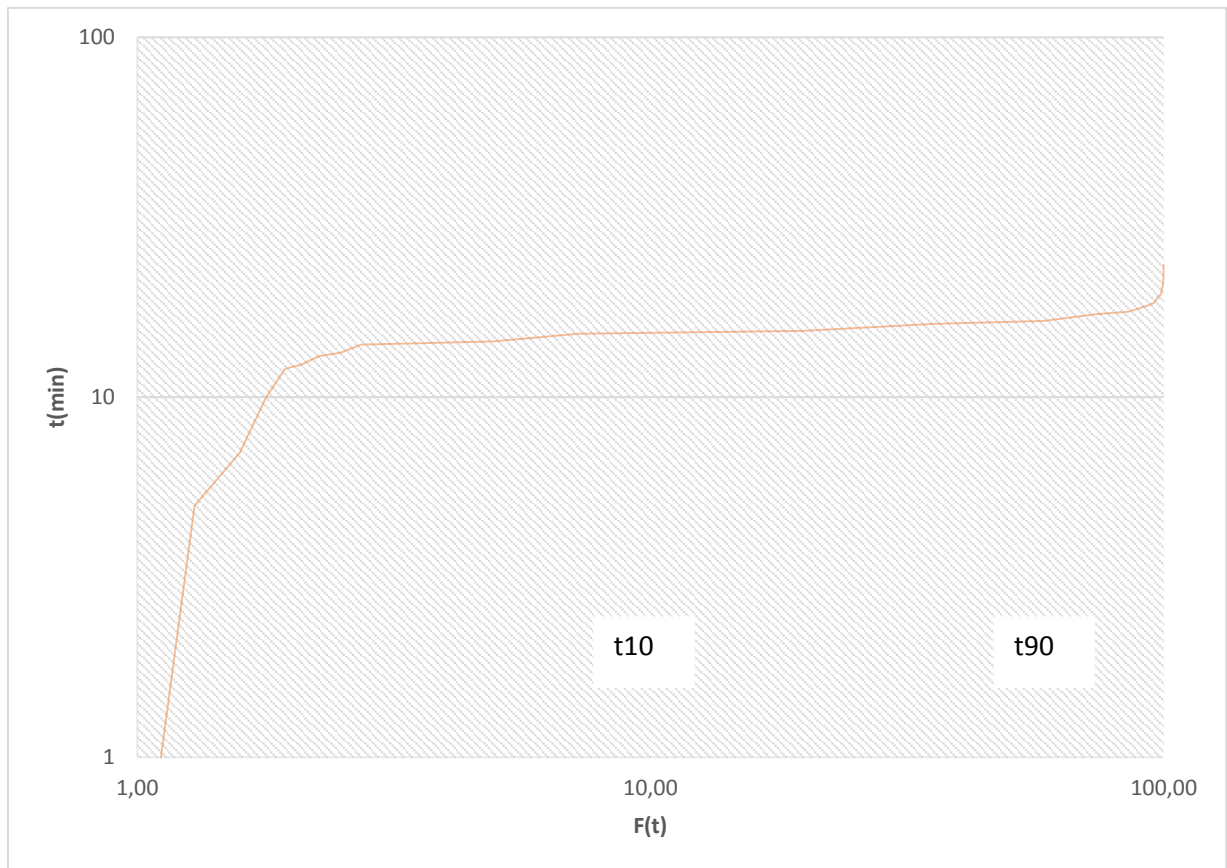


Figura 7.12-4: Índice de Morril para un caudal de 950 l/s en el floculador 2

Fuente: Criollo & Lara (2020).

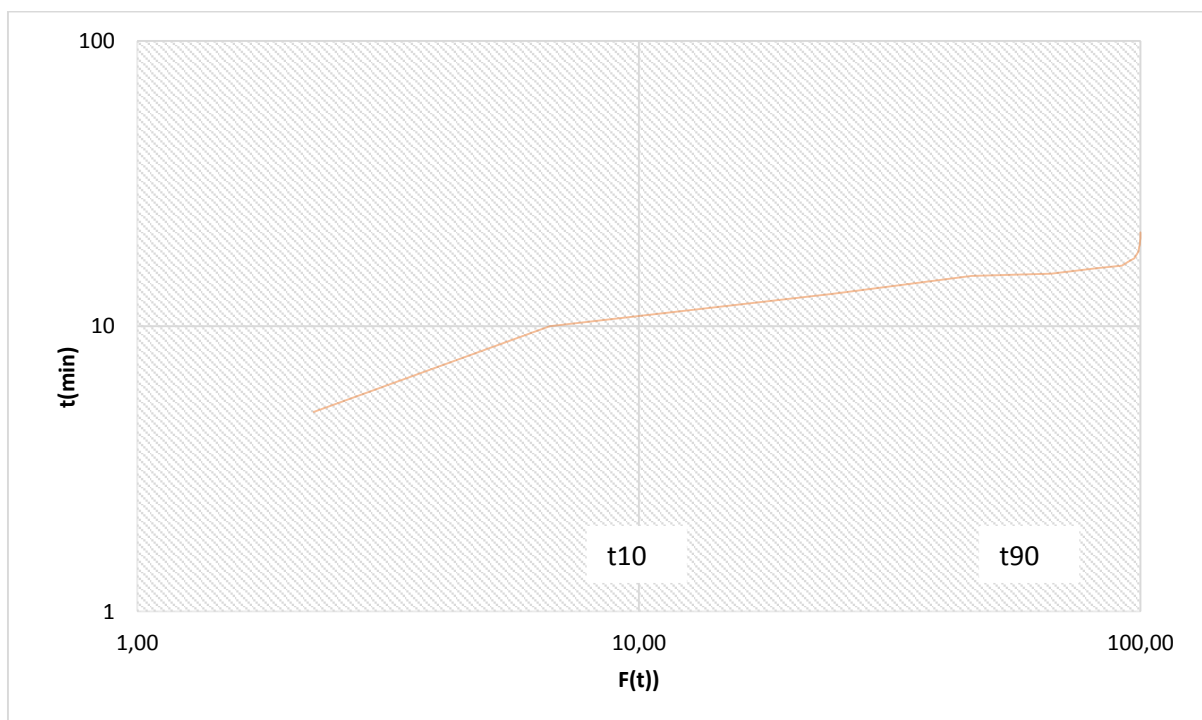


Figura 7.12-5: Índice de Morril para un caudal de 800 l/s en el floculador 2

Fuente: Criollo & Lara (2020).

7.13 Anexo VII-M: Resultados pruebas de jarras

Tabla 7.13-1: *Resultados de las pruebas de trazadores con un caudal de 1000 l/s en el floculador 1*

Floculador 1 con un caudal de 1000 l/s								
Nº de muestra	t [min]	K	C	t/to	(C-CO)	$\Sigma(C-CO)$	F(t)	1-F(t)
1	1	100	49.00	0.05	0.00	0.00	0.00	100.00
2	3	101	49.49	0.15	0.49	0.49	0.01	99.99
3	5	100	49.00	0.25	0.00	0.49	0.01	99.99
4	7	101	49.49	0.35	0.49	0.98	0.03	99.97
5	9	101.1	49.54	0.45	0.54	1.52	0.04	99.96
6	11	102	49.98	0.55	0.98	2.50	0.06	99.94
7	13	101.5	49.74	0.65	0.73	3.23	0.08	99.92
8	14	100	49.00	0.70	0.00	3.23	0.08	99.92
9	15	101	49.49	0.75	0.49	3.72	0.10	99.90
10	16	101.8	49.88	0.80	0.88	4.61	0.12	99.88
11	17	100	49.00	0.85	0.00	4.61	0.12	99.88
12	17.1	100	49.00	0.86	0.00	4.61	0.12	99.88
13	17.2	101	49.49	0.86	0.49	5.10	0.13	99.87
14	17.3	101.4	49.69	0.87	0.69	5.78	0.15	99.85
15	17.4	105.5	51.70	0.87	2.70	8.48	0.22	99.78
16	17.5	110.5	54.15	0.88	5.15	13.62	0.35	99.65
17	18	118.6	58.11	0.90	9.11	22.74	0.59	99.41
18	18.1	137	67.13	0.91	18.13	40.87	1.06	98.94
19	18.2	153.5	75.22	0.91	26.22	67.08	1.74	98.26
20	18.3	179.4	87.91	0.92	38.91	105.99	2.75	97.25
21	18.4	199	97.51	0.92	48.51	154.50	4.01	95.99
22	18.5	237	116.13	0.93	67.13	221.63	5.75	94.25
23	19	277	135.73	0.95	86.73	308.36	8.00	92.00
24	19.1	283	138.67	0.96	89.67	398.03	10.32	89.68
25	19.2	377	184.73	0.96	135.73	533.76	13.84	86.16
26	19.3	457	223.93	0.97	174.93	708.69	18.38	81.62
27	19.4	464	227.36	0.97	178.36	887.05	23.01	76.99
28	19.5	505	247.45	0.98	198.45	1085.50	28.15	71.85
29	20	546	267.54	1.00	218.54	1304.04	33.82	66.18
30	20.1	530	259.70	1.01	210.70	1514.74	39.29	60.71
31	20.2	529	259.21	1.01	210.21	1724.95	44.74	55.26
32	20.3	516	252.84	1.02	203.84	1928.79	50.03	49.97
33	20.4	500	245.00	1.02	196.00	2124.79	55.11	44.89
34	20.5	488	239.12	1.03	190.12	2314.91	60.04	39.96
35	21	468	229.32	1.05	180.32	2495.23	64.72	35.28
36	21.1	420	205.80	1.06	156.80	2652.03	68.79	31.21
37	21.2	383	187.67	1.06	138.67	2790.70	72.38	27.62
38	21.3	369	180.81	1.07	131.81	2922.51	75.80	24.20
39	21.4	348	170.52	1.07	121.52	3044.03	78.95	21.05

40	21.5	344	168.56	1.08	119.56	3163.59	82.05	17.95
41	22	330	161.70	1.10	112.70	3276.29	84.98	15.02
42	22.1	303	148.47	1.11	99.47	3375.76	87.56	12.44
43	22.2	261	127.89	1.11	78.89	3454.65	89.60	10.40
44	22.3	235	115.15	1.12	66.15	3520.80	91.32	8.68
45	22.4	214	104.86	1.12	55.86	3576.66	92.77	7.23
46	22.5	206.8	101.33	1.13	52.33	3628.99	94.12	5.88
47	23	177.3	86.88	1.15	37.88	3666.87	95.11	4.89
48	23.1	160	78.40	1.16	29.40	3696.27	95.87	4.13
49	23.2	144	70.56	1.16	21.56	3717.83	96.43	3.57
50	23.3	139	68.11	1.17	19.11	3736.94	96.92	3.08
51	23.3	140	68.60	1.17	19.60	3756.54	97.43	2.57
52	23.4	138	67.62	1.17	18.62	3775.16	97.92	2.08
53	23.5	135	66.15	1.18	17.15	3792.31	98.36	1.64
54	24	130	63.70	1.20	14.70	3807.01	98.74	1.26
55	24.1	128	62.72	1.21	13.72	3820.73	99.10	0.90
56	24.2	121	59.29	1.21	10.29	3831.02	99.36	0.64
57	24.3	120	58.80	1.22	9.80	3840.82	99.62	0.38
58	24.4	114	55.86	1.22	6.86	3847.68	99.80	0.20
59	24.5	114	55.86	1.23	6.86	3854.54	99.97	0.03
60	25	101	49.49	1.25	0.49	3855.03	99.99	0.01
61	25.1	101	49.49	1.26	0.49	3855.52	100.00	0.00
62	25.2	100	49.00	1.26	0.00	3855.52	100.00	0.00
63	26	100	49.00	1.30	0.00	3855.52	100.00	0.00

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.13-2: *Resultados de las pruebas de trazadores con un caudal de 950 l/s en el floculador 1*

Floculador 1 con un caudal de 950 l/s								
Nº muestra	t (min)	K	C	t/to	(C-CO)	Σ(C-CO)	F(t)	1-F(t)
1	1	116.5	51.26	0.06	0.00	0.00	0.00	100.00
2	3	116.5	51.26	0.17	0.00	0.00	0.00	100.00
3	5	116.5	51.26	0.28	0.00	0.00	0.00	100.00
4	7	116.5	51.26	0.39	0.00	0.00	0.00	100.00
5	10	116.5	51.26	0.56	0.00	0.00	0.00	100.00
6	13	116.5	51.26	0.72	0.00	0.00	0.00	100.00
7	15.3	116.6	51.30	0.85	0.04	0.04	0.00	100.00
8	16	129	56.76	0.89	5.50	5.54	0.51	99.49
9	16.3	135	59.40	0.91	8.14	13.68	1.26	98.74
10	17	150	66.00	0.94	14.74	28.42	2.62	97.38
11	17.3	170	74.80	0.96	23.54	51.96	4.79	95.21
12	18	536	235.84	1.00	184.5	236.54	21.82	78.18
13	18.3	665	292.60	1.02	241.3	477.88	44.08	55.92

14	19	580	255.20	1.06	203.94	681.82	62.89	37.11
15	19.3	510	224.40	1.07	173.14	854.96	78.86	21.14
16	20	400	176.00	1.11	124.74	979.70	90.37	9.63
17	20.3	269	118.36	1.13	67.10	1046.80	96.56	3.44
18	21	157.1	69.12	1.17	17.86	1064.67	98.21	1.79
19	21.3	149.7	65.87	1.18	14.61	1079.28	99.55	0.45
20	22	122.5	53.90	1.22	2.64	1081.92	99.80	0.20
21	22.3	120	52.80	1.24	1.54	1083.46	99.94	0.06
22	23	118	51.92	1.28	0.66	1084.12	100.00	0.00
23	23.3	116.5	51.26	1.29	0.00	1084.12	100.00	0.00
24	24	116.5	51.26	1.33	0.00	1084.12	100.00	0.00
25	24.3	116.5	51.26	1.35	0.00	1084.12	100.00	0.00

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.13-3: *Resultados de las pruebas de trazadores con un caudal de 800 l/s en el floculador 1*

Floculador 1 con un caudal de 800 l/s								
Nº de muestra	t (min)	K	C	t/to	(C-CO)	Σ(C-CO)	F(t)	1-F(t)
1	5	109.2	51.32	0.28	0.00	0.00	0.00	100.00
2	7	109.2	51.32	0.39	0.00	0.01	0.00	100.00
3	10	110.4	51.89	0.56	0.57	0.58	0.06	99.94
4	13	121.7	57.20	0.72	5.88	6.45	0.70	99.30
5	15	147.4	69.28	0.83	17.96	24.41	2.65	97.35
6	15.3	230	108.10	0.85	56.78	81.19	8.82	91.18
7	16	459	215.73	0.89	164.41	245.60	26.69	73.31
8	16.3	535	251.45	0.91	200.13	445.73	48.44	51.56
9	17	468	219.96	0.94	168.64	614.37	66.76	33.24
10	17.3	356	167.32	0.96	116.00	730.37	79.37	20.63

11	18	270	126.9 0	1.00	75.58	805.95	87.58	12.42
12	18.3	214	100.5 8	1.02	49.26	855.21	92.94	7.06
13	19	211	99.17	1.06	47.85	903.06	98.14	1.86
14	19.3	124	58.28	1.07	6.96	910.02	98.89	1.11
15	20	119	55.93	1.11	4.61	914.63	99.39	0.61
16	20.3	114.4	53.77	1.13	2.45	917.08	99.66	0.34
17	21	113.2	53.20	1.17	1.88	918.97	99.86	0.14
18	21.3	111	52.17	1.18	0.85	919.82	99.96	0.04
19	22	110	51.70	1.22	0.38	920.20	100.00	0.00
20	22.3	109.2	51.32	1.24	0.00	920.20	100.00	0.00
21	23	109.2	51.32	1.28	0.00	920.20	100.00	0.00
22	23.3	109.2	51.32	1.29	0.00	920.21	100.00	0.00
23	24	109.2	51.32	1.33	0.00	920.21	100.00	0.00
24	24.3	109.2	51.32	1.35	0.00	920.21	100.00	0.00
25	25	109.2	51.32	1.39	0.00	920.21	100.00	0.00
26	25.3	109.2	51.32	1.41	0.00	920.21	100.00	0.00

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.13-4: Resultados de las pruebas de trazadores con un caudal de 1000 l/s en el floculador 2

Floculador 2 con un caudal de 1000 l/s								
Nº muestr a	t (min)	K	C	t/to	(C- CO)	Σ(C- CO)	F(t)	1-F(t)
1	1	106	49.82	0.06	0.00	0.00	0.00	100.00
2	5	106	49.82	0.28	0.00	0.00	0.00	100.00
3	9	106	49.82	0.50	0.00	0.00	0.00	100.00
4	12	106. 5	50.06	0.67	0.23	0.23	0.02	99.98
5	14	106. 5	50.06	0.78	0.23	0.47	0.04	99.96
6	14.3	106. 5	50.06	0.79	0.23	0.70	0.06	99.94



7	15	106. 5	50.06	0.83	0.23	0.94	0.08	99.92
8	15.3	106. 5	50.06	0.85	0.23	1.18	0.09	99.91
9	16	106. 5	50.06	0.89	0.23	1.41	0.11	99.89
10	16.3	106. 5	50.06	0.91	0.23	1.65	0.13	99.87
11	17	106. 5	50.06	0.94	0.23	1.88	0.15	99.85
12	17.3	106. 5	50.06	0.96	0.23	2.11	0.17	99.83
13	18	109	51.23	1.00	1.41	3.52	0.28	99.72
14	18.3	119	55.93	1.02	6.11	9.63	0.78	99.22
15	19	120	56.40	1.06	6.58	16.22	1.31	98.69
16	19.3	124. 5	58.52	1.07	8.69	24.91	2.01	97.99
17	20	156. 2	73.41	1.11	23.59	48.50	3.92	96.08
18	20.3	229	107.6 3	1.13	57.81	106.31	8.58	91.42
19	21	333	156.5 1	1.17	106.6 9	213.00	17.19	82.81
20	21.3	420	197.4 0	1.18	147.5 8	360.58	29.11	70.89
21	22	450	211.5 0	1.22	161.6 8	522.26	42.16	57.84
22	22.3	515	242.0 5	1.24	192.2 3	714.49	57.68	42.32
23	23	419	196.9 3	1.28	147.1 1	861.60	69.55	30.45
24	23.3	337	158.3 9	1.29	108.5 7	970.17	78.31	21.69
25	24	237	111.3 9	1.33	61.57	1031.7 4	83.28	16.72
26	24.15	199. 7	93.86	1.34	44.04	1075.7 8	86.84	13.16

27	24.3	172.3	80.98	1.35	31.16	1106.94	89.35	10.65
28	24.45	164.1	77.13	1.36	27.31	1134.25	91.56	8.44
29	25	158	74.26	1.39	24.44	1158.69	93.53	6.47
30	25.15	147.8	69.47	1.40	19.65	1178.34	95.12	4.88
31	25.3	139.5	65.57	1.41	15.75	1194.08	96.39	3.61
32	25.45	130	61.10	1.41	11.28	1205.36	97.30	2.70
33	26	126.7	59.55	1.44	9.73	1215.09	98.08	1.92
34	26.15	120.7	56.73	1.45	6.91	1222.00	98.64	1.36
35	26.3	117	54.99	1.46	5.17	1227.17	99.06	0.94
36	26.45	116.5	54.76	1.47	4.94	1232.11	99.46	0.54
37	27	113	53.11	1.50	3.29	1235.40	99.72	0.28
38	28	111	52.17	1.56	2.35	1237.75	99.91	0.09
39	29	108	50.76	1.61	0.94	1238.69	99.99	0.01
40	30	106.3	49.96	1.67	0.14	1238.83	100.00	0.00

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.13-5: Resultados de las pruebas de trazadores con un caudal de 950 l/s en el floculador 2

Floculador 2 con un caudal de 950 l/s								
Nº	t [min]	K	C	t/to	(C-CO)	Σ(C-CO)	F(t)	1-F(t)
muestra								
1	1	106	50.88	0.06	0.00	0.00	0.00	100.00
2	5	106.3	51.02	0.28	0.14	0.14	0.01	99.99

3	7	106	50.88	0.39	0.00	0.14	0.01	99.99
4	10	106.1	50.93	0.56	0.05	0.19	0.01	99.99
5	12	106	50.88	0.67	0.00	0.19	0.01	99.99
6	12.3	106	50.88	0.68	0.00	0.19	0.01	99.99
7	13	112	53.76	0.72	2.88	3.07	0.23	99.77
8	13.3	111.1	53.33	0.74	2.45	5.52	0.41	99.59
9	14	114.2	54.82	0.78	3.94	9.46	0.70	99.30
10	14.3	111.6	53.57	0.79	2.69	12.14	0.90	99.10
11	15	112	53.76	0.83	2.88	15.02	1.11	98.89
12	15.3	111.1	53.33	0.85	2.45	17.47	1.29	98.71
13	16	114.2	54.82	0.89	3.94	21.41	1.58	98.42
14	16.3	111.6	53.57	0.91	2.69	24.10	1.78	98.22
15	17	110.5	53.04	0.94	2.16	26.26	1.94	98.06
16	17.3	110	52.80	0.96	1.92	28.18	2.08	97.92
17	18	111	53.28	1.00	2.40	30.58	2.26	97.74
18	18.3	112.5	54.00	1.02	3.12	33.70	2.49	97.51
19	19	112.5	54.00	1.06	3.12	36.82	2.72	97.28
20	19.3	168.2	80.74	1.07	29.86	66.67	4.93	95.07
21	20	170.4	81.79	1.11	30.91	97.58	7.22	92.78
22	20.3	460	220.8	1.13	169.9	267.50	19.79	80.21
			0		2			
23	21	556	266.8	1.17	216.0	483.50	35.77	64.23
			8		0			
24	21.3	741	355.6	1.18	304.8	788.30	58.32	41.68
			8		0			
25	22	538	258.2	1.22	207.3	995.66	73.66	26.34
			4		6			
26	22.3	438	210.2	1.24	159.3	1155.0	85.45	14.55
			4		6	2		
27	23	329	157.9	1.28	107.0	1262.0	93.37	6.63
			2		4	6		
28	23.3	178.3	85.58	1.29	34.70	1296.7	95.93	4.07
						7		
29	24	151	72.48	1.33	21.60	1318.3	97.53	2.47
						7		
30	24.3	140.1	67.25	1.35	16.37	1334.7	98.74	1.26
						4		
31	25	120.3	57.74	1.39	6.86	1341.6	99.25	0.75
						0		
32	25.3	114	54.72	1.41	3.84	1345.4	99.53	0.47
						4		
33	26	112	53.76	1.44	2.88	1348.3	99.75	0.25
						2		
34	26.3	110	52.80	1.46	1.92	1350.2	99.89	0.11
						4		
35	27	109	52.32	1.50	1.44	1351.6	100.0	0.00
						8	0	
36	28	106	50.88	1.56	0.00	1351.6	100.0	0.00
						8	0	
37	29	106.1	50.93	1.61	0.05	1351.7	100.0	0.00
						3	0	

38	30	106	50.88	1.67	0.00	1351.7 3	100.0 0	0.00
----	----	-----	-------	------	------	-------------	------------	------

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.13-6: Resultados de las pruebas de trazadores con un caudal de 800 l/s en el floculador 2

Floculador 2 con un caudal de 800 l/s								
Nº muestr a	t [min]	K	C	t/to	(C- CO)	Σ(C- CO)	F(t)	1-F(t)
1	5	110	50.60	0.28	0.00	0.00	0.00	100.00
2	10	110	50.60	0.56	0.00	0.00	0.00	100.00
3	13	111.3	51.20	0.72	0.60	0.60	0.06	99.94
4	15	111.3	51.20	0.83	0.60	1.20	0.12	99.88
5	15.3	110.6	50.88	0.85	0.28	1.47	0.15	99.85
6	16	110.3	50.74	0.89	0.14	1.61	0.16	99.84
7	16.3	110.6	50.88	0.91	0.28	1.89	0.19	99.81
8	17	113.6	52.26	0.94	1.66	3.54	0.36	99.64
9	17.3	150	69.00	0.96	18.40	21.94	2.25	97.75
10	18	203.4	93.56	1.00	42.96	64.91	6.65	93.35
11	18.3	485	223.10	1.02	172.5 0	237.4 1	24.32	75.68
12	19	571	262.66	1.06	212.0 6	449.4 7	46.04	53.96
13	19.3	542	249.32	1.07	198.7 2	648.1 9	66.39	33.61
14	20	457	210.22	1.11	159.6 2	807.8 1	82.75	17.25
15	20.3	302	138.92	1.13	88.32	896.1 3	91.79	8.21
16	21	187.8	86.39	1.17	35.79	931.9 1	95.46	4.54
17	21.3	148.7	68.40	1.18	17.80	949.7 2	97.28	2.72
18	22	135.6	62.38	1.22	11.78	961.4 9	98.49	1.51
19	22.3	122.9	56.53	1.24	5.93	967.4 3	99.10	0.90

20	23	117.4	54.00	1.28	3.40	970.8 3	99.44	0.56
21	23.3	114.6	52.72	1.29	2.12	972.9 5	99.66	0.34
22	24	113.8	52.35	1.33	1.75	974.6 9	99.84	0.16
23	24.3	112.4	51.70	1.35	1.10	975.8 0	99.95	0.05
24	25	111	51.06	1.39	0.46	976.2 6	100.0 0	0.00
25	25.3	110	50.60	1.41	0.00	976.2 6	100.0 0	0.00

Fuente. Criollo & Lara (2020).

7.14 Anexo VII-N: Resultados de dosis óptimas de turbiedad, color y pH

Tabla 7.14-1: Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 1000 l/s – SAGB

Fecha	Número de ensayo	TURB[NTU]		CA[UPC]		pH		Dosis óptima [mg/l]
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
2019/03/22	1	8		1,39	85	4.32	7.55	23
2019/03/25	2	4,61		0,85	41	3.49	7.23	20
2019/03/26	3	2,89		1,11	33	2.61	7.89	15
2019/03/27	4	3,72		0,99	39	3.57	7.59	20
2019/03/28	5	264		0,88	1407	9.82	7.29	39
2019/03/30	6	337		0,7	1622	10.89	7.55	42
2019/04/01	7	4,95		0,6	45	3.25	7.24	20
2019/04/03	8	23,7		1,1	210	6,79	7.57	26
2019/04/04	9	210		0,88	1068	8.39	7.9	37
2019/04/22	10	237		0,67	1125	8.64	7.76	38
2019/04/24	11	37,7		1,17	385	6.72	7,36	29
2019/04/26	12	7,86		1	74	2.54	7.74	23
2019/04/29	13	13		1,08	185	6.59	7.68	25
2019/04/30	14	6,42		0,9	45	5.61	7,64	15
2019/05/09	15	26		0,79	217	3,5	7,73	28



2019/05/15	16	4	0,55	40	2	7,8	7,5	14
2019/05/22	17	71	0,86	645	2	7,5	7	31
2019/05/29	18	101	1,58	700	2.68	7,25	6,95	33
2019/06/12	19	500	0,91	1800	1.59	7,25	6,73	44
2019/06/21	20	24	2,42	215	7,5	7,67	7	27
2019/07/01	21	119	1,17	716	10	7,4	6,57	36
2019/07/15	22	136	1	764	11.28	7,51	6,35	35
2019/07/29	23	2,59	0,92	32	5.89	7,92	7,39	18

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.14-2: *Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 1000 l/s – SAGA*

Fecha	Número de ensayo	TURB[NTU]		CA[UPC]		pH		Dosis óptima [mg/l]
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
2019/03/27	1	3,72	1,09	39	4.34	7.59	7.20	12
2019/03/28	2	264	1.54	1407	2.29	7.29	7.0	37
2019/03/30	3	337	0.87	1622	0	7.55	6.54	42
2019/04/01	4	4,95	1.58	45	3	7.24	7.10	19
2019/04/03	5	23,7	1	210	2	7.57	7.40	24
2019/04/04	6	210	1	1068	5.93	7.9	7.21	35
2019/04/22	7	237	1.12	1125	2.57	7.76	7.35	36
2019/04/24	8	37,7	1.10	385	2.45	7,36	6.30	29
2019/04/26	9	7,86	1,16	74	2.72	7.74	7.12	22
2019/04/29	10	13	1.25	185	3.98	7.68	7.31	23
2019/04/30	11	6,42	1.11	45	2.76	7,64	7.0	20
2019/05/09	12	26	1	217	3.42	7,73	7.10	27
2019/05/15	13	4	0,44	40	2.5	7,8	7,45	13
2019/05/22	14	71	1,08	645	0	7,5	6,9	29
2019/05/29	15	101	1,72	700	7.89	7,25	6,92	32
2019/06/12	16	500	1	1800	0	7,25	6,75	43
2019/06/21	17	24	1,18	215	8,5	7,67	6,97	26
2019/07/01	18	119	1,60	716	5.78	7,4	6,39	35
2019/07/15	19	136	0,64	764	3.58	7,51	6.46	36

2019/07/29	20	2,59	1.14	32	3.58	7,92	7,39	12
------------	----	------	------	----	------	------	------	----

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.14-3: *Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 950 l/s- SAGB*

Fecha	Número de ensayo	TURB[NTU]		CA[UPC]		pH		Dosis óptima [mg/l]
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
2019/04/05	1	5,33	0,72	48	2.58	7.48	7.25	22
2019/04/08	2	4,95	0,6	45	4.58	7.44	7,38	20
2019/04/09	3	2,74	0,96	25	3.58	7.35	7.25	17
2019/04/12	4	44	1,00	200	7.58	7,61	6,91	30
2019/05/02	5	64	0,9	395	1.25	7,25	6,96	32
2019/05/13	6	112	0,99	257	4.58	7,6	6,98	36
2019/05/17	7	80,1	1,25	536	4.58	7.10	6,57	33
2019/06/03	8	160.8	1.55	987	8.87	7.40	7.10	41
2019/06/30	9	7.89	1.32	547	3.58	7.88	7.40	24
2019/07/05	10	50.8	1.14	325	5.47	7.27	6.57	32
2019/07/11	11	15.1	1	147	3.75	7.29	6.78	26

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.14-4: *Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 950 l/s – SAGA*

Fecha	Número de ensayo	TURB[NTU]		CA[UPC]		pH		Dosis óptima [mg/l]
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
2019/04/08	1	4,95	1.10	45	4.15	7.44	7.25	18
2019/04/09	2	2,74	1	25	2.56	7.35	7.20	15
2019/04/12	3	44	1	200	4.58	7,61	7.20	27
2019/05/02	4	64	0.95	395	2.5	7,25	6,70	30
2019/05/13	5	112	0.88	257	3.20	7,6	7.11	35
2019/05/17	6	80,1	1	536	2.98	7	6.78	32
2019/06/03	7	160.8	1.10	987	4.78	7.40	6,60	40
2019/06/30	8	5.89	0.92	547	3.74	7.88	6.85	24
2019/07/05	9	50.8	1	325	4.61	7.27	6.50	32
2019/07/11	10	15.1	0.97	147	3.41	7.29	6.80	27

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.14-5: *Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 800 l/s- SAGB*

Fecha	Número de ensayo	TURB[NTU]		CA[UPC]		pH		Dosis óptima [mg/l]
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
2019/07/03	1	52.89	1,1	334	3	7.5	6.78	35
2019/07/05	2	1.37	1	400	4	7.1	6.89	22
2019/07/08	3	1.54	1.1	15	6	7.06	6.55	20
2019/07/10	4	8.48	0,98	84	0	7.84	6.57	23
2019/07/31	5	1.89	1,10	18	5	7.06	6.5	21
2019/08/01	6	9.8	0,91	20	6	6.78	6.09	26
2019/08/05	7	30.5	1.15	89	5	7.1	6.58	30
2019/08/08	8	62.45	1,2	502	4	7.03	6.96	33
2019/08/12	9	72.9	1.4	256	5	7.2	6.7	35
2019/08/14	10	109.1	1.2	779	5	6.89	6.89	37

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.14-6: *Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 800 l/s- SAGA*

Fecha	Número de ensayo	TURB[NTU]		CA[UPC]		pH		Dosis óptima [mg/l]
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
2019/07/03	1	52.89	0,55	334	3.1	7.5	6.4	33
2019/07/05	2	1.37	0,97	400	4	7.1	7.68	20
2019/07/08	3	1.54	1	15	1	7.06	6.33	19
2019/07/10	4	8.48	0,87	18	3	7.84	6.23	18
2019/07/31	5	1.89	0,75	84	0	7.06	6.43	20
2019/08/01	6	9.8	0,9	20	3	6.78	6.27	25
2019/08/05	7	30.5	1	89	6	7.1	6.54	28
2019/08/08	8	62.45	1,1	502	6	7.03	6.79	32
2019/08/12	9	72.9	0,97	256	4	7.2	6.8	34
2019/08/14	10	109.1	0,99	779	5	6.89	6.7	35

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.14-7: *Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 1000 l/s - SAGB del polímero.*

Fecha	Número de ensayo	TURB[NTU]		CA[UPC]		pH		Dosis óptima polímero [mg/l]
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
2019/03/22	1	8	0,65	85	3,56	7,55	7,19	0,03
2019/03/25	2	4,61	0,6	41	3,12	7,23	7,05	0,03
2019/03/26	3	2,89	0,83	33	2,41	7,89	6,59	0,04
2019/03/27	4	3,72	0,8	39	2,45	7,59	7,12	0,02
2019/03/28	5	264	0,55	1407	7,45	7,29	6,87	0,09
2019/03/30	6	337	0,6	1622	9,51	7,55	7,35	0,04
2019/04/01	7	4,95	0,4	45	2,54	7,24	7,05	0,03
2019/04/03	8	23,7	0,5	210	4,25	7,57	7,1	0,04
2019/04/04	9	210	0,79	1068	7,89	7,9	7,18	0,03
2019/04/22	10	237	0,55	1125	7,58	7,76	7,04	0,1
2019/04/24	11	37,7	0,81	385	5,44	7,36	6,95	0,05
2019/04/26	12	7,86	0,56	74	2,05	7,74	7,01	0,04
2019/04/29	13	13	0,95	185	5,69	7,68	7,12	0,02
2019/04/30	14	6,42	0,62	45	4,99	7,64	7,23	0,03
2019/05/09	15	26	0,71	217	2,85	7,73	7,2	0,04
2019/05/15	16	4	0,48	40	1,58	7,8	7,46	0,03
2019/05/22	17	71	0,49	645	1,12	7,5	6,93	0,04
2019/05/29	18	101	0,91	700	1,24	7,25	6,66	0,05
2019/06/12	19	500	0,56	1800	0,96	7,25	6,64	0,09
2019/06/21	20	24	0,87	215	4,58	7,67	6,64	0,04
2019/07/01	21	119	0,99	716	8,45	7,4	6,45	0,05
2019/07/15	22	136	0,87	764	10,45	7,51	6,33	0,04
2019/07/19	23	2,59	0,57	32	4,2	7,92	7,14	0,02

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.14-8: *Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 1000 l/s – SAGA del polímero*

Fecha	Número de ensayo	TURB[NTU]		CA[UPC]		pH		Dosis óptima polímero [mg/l]
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
2019/03/27	1	3,72	0,85	39	3,44	7,59	7,07	0,02
2019/03/28	2	264	0,75	1407	1,23	7,29	7,11	0,05
2019/03/30	3	337	0,52	1622	0	7,55	6,45	0,06
2019/04/01	4	4,95	0,98	45	1,89	7,24	6,78	0,02
2019/04/03	5	23,7	0,9	210	1,5	7,57	7,31	0,03
2019/04/04	6	210	0,62	1068	1,41	7,9	7,02	0,05
2019/04/22	7	237	0,53	1125	1,45	7,76	7,14	0,08
2019/04/24	8	37,7	0,84	385	2	7,36	6,21	0,04
2019/04/26	9	7,86	0,75	74	1,45	7,74	7,1	0,03
2019/04/29	10	13	0,67	185	1,48	7,68	7,23	0,02
2019/04/30	11	6,42	0,81	45	1,89	7,64	7,05	0,03
2019/05/09	12	26	0,78	217	2,69	7,73	6,96	0,05
2019/05/15	13	4	0,3	40	2,11	7,8	7,4	0,02
2019/05/22	14	71	0,73	645	0	7,5	6,85	0,05
2019/05/29	15	101	0,75	700	3,46	7,25	6,9	0,07
2019/06/12	16	500	0,51	1800	0	7,25	6,65	0,11
2019/06/21	17	24	0,8	215	5,66	7,67	6,84	0,06
2019/07/01	18	119	0,91	716	4	7,4	6,35	0,06
2019/07/15	19	136	0,22	764	2,46	7,51	6,35	0,08
2019/07/29	20	2,59	0,67	32	2,37	7,92	7,34	0,04

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.14-9: *Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 950 l/s - SAGB del polímero.*

Número de ensayo	Turbiedad [NTU]		Color [UPC]		pH		Dosis [mg/l]		Dosis óptima
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
1	2,74		0,72	25	2,35	7,35	7,12		0,02
2	4,95		0,5	45	4,15	7,44	7,31		0,03
3	5,33	0,5		48	2,15	7,48	7,13		0,04



4	7,89	0,76	547	2,13	7,88	7,15	0,03
5	15,1	0,78	147	2,78	7,29	6,63	0,07
6	44	0,56	200	5,46	7,61	6,82	0,04
7	50,8	0,98	325	4,51	7,27	6,47	0,04
8	64	0,45	395	0,85	7,25	6,96	0,05
9	80,1	0,89	536	3,58	7,1	6,46	0,06
10	112	0,8	257	4,21	7,6	6,91	0,07
11	160,8	0,91	987	6,48	7,4	6,89	0,08

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.14-10 : *Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 950 l/s – SAGA del polímero*

Fecha	Número de ensayo	Turbiedad [NTU]		Color [UPC]		pH		Dosis óptima [mg/l]
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
2019/04/08	1	2,74	0,75	25	1,46	7,35	7,05	0,02
2019/04/09	2	4,95	0,78	45	3,25	7,44	7,11	0,02
2019/04/12	3	5,89	0,7	547	2,1	7,88	6,76	0,04
2019/05/02	4	15,1	0,67	147	2,32	7,29	6,7	0,05
2019/05/13	5	44	0,64	200	3	7,61	7,07	0,04
2019/05/17	6	50,8	0,49	325	2,05	7,27	6,52	0,06
2019/06/03	7	64	0,45	395	1,5	7,25	6,61	0,04
2019/06/30	8	80,1	0,43	536	1,23	7	6,65	0,05
2019/07/05	9	112	0,47	257	2,13	7,6	6,78	0,07
2019/07/11	10	160,8	0,62	987	2,44	7,4	6,51	0,09

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.14-11: *Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 800 l/s - SAGB del polímero.*

Fecha	Número de ensayo	Turbiedad [NTU]		Color [UPC]		pH		Dosis óptima [mg/l]
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
2019/07/03	1	52,89	0,78	334	2	7,5	6	0,07
2019/07/05	2	1,37		400	3	7,1	6,89	0,04
2019/07/08	3	1,54	0,67	15	4	7,06	6,55	0,02
2019/07/10	4	1,89	0,64	18	3	7,06	6,5	0,02
2019/07/31	5	8,48	0,68	84	0	7,84	7,46	0
2019/08/01	6	9,8	0,85	20	4	6,78	6,09	0,05
2019/08/05	7	30,5	0,86	89	3	7,1	6,58	0,04
2019/08/08	8	62,45	0,79	502	3	7,03	6,96	0,05
2019/08/12	9	72,9	0,74	256	2	7,2	6,7	0,07



2019/08/14	10	109,1	0,73	779	3	6,89	6,89	0,1
------------	----	-------	------	-----	---	------	------	-----

Fuente: Criollo & Lara (2020).

Tabla 7.14-12: *Resumen de condiciones iniciales y finales para un caudal de 800 l/s – SAGA del polímero.*

Fecha	Número de ensayo	Turbiedad [NTU]		Color [UPC]		pH		Dosis óptima [mg/l]
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
2019/07/03	1	52,89	0,3	400	1	7,5	6,31	0,06
2019/07/05	2	1,37	0,7	15	3	7,1	7,06	0,02
2019/07/08	3	1,54	0,75	18	0	7,06	6,3	0,04
2019/07/10	4	8,48	0,62	84	2	7,84	6,2	0,04
2019/07/31	5	1,89	0,61	20	0	7,06	6,45	0,03
2019/08/01	6	9,8	0,71	89	2	6,78	6,21	0,04
2019/08/05	7	30,5	0,68	334	4	7,1	6,41	0,05
2019/08/08	8	62,45	0,72	502	4	7,03	6,62	0,07
2019/08/12	9	72,9	0,74	256	3	7,2	6,81	0,09
2019/08/14	10	109,1	0,54	779	2	6,89	6,65	0,09

Fuente: Criollo & Lara (2020).

7.15 Anexo VII-O: Curvas de dosificación coagulante

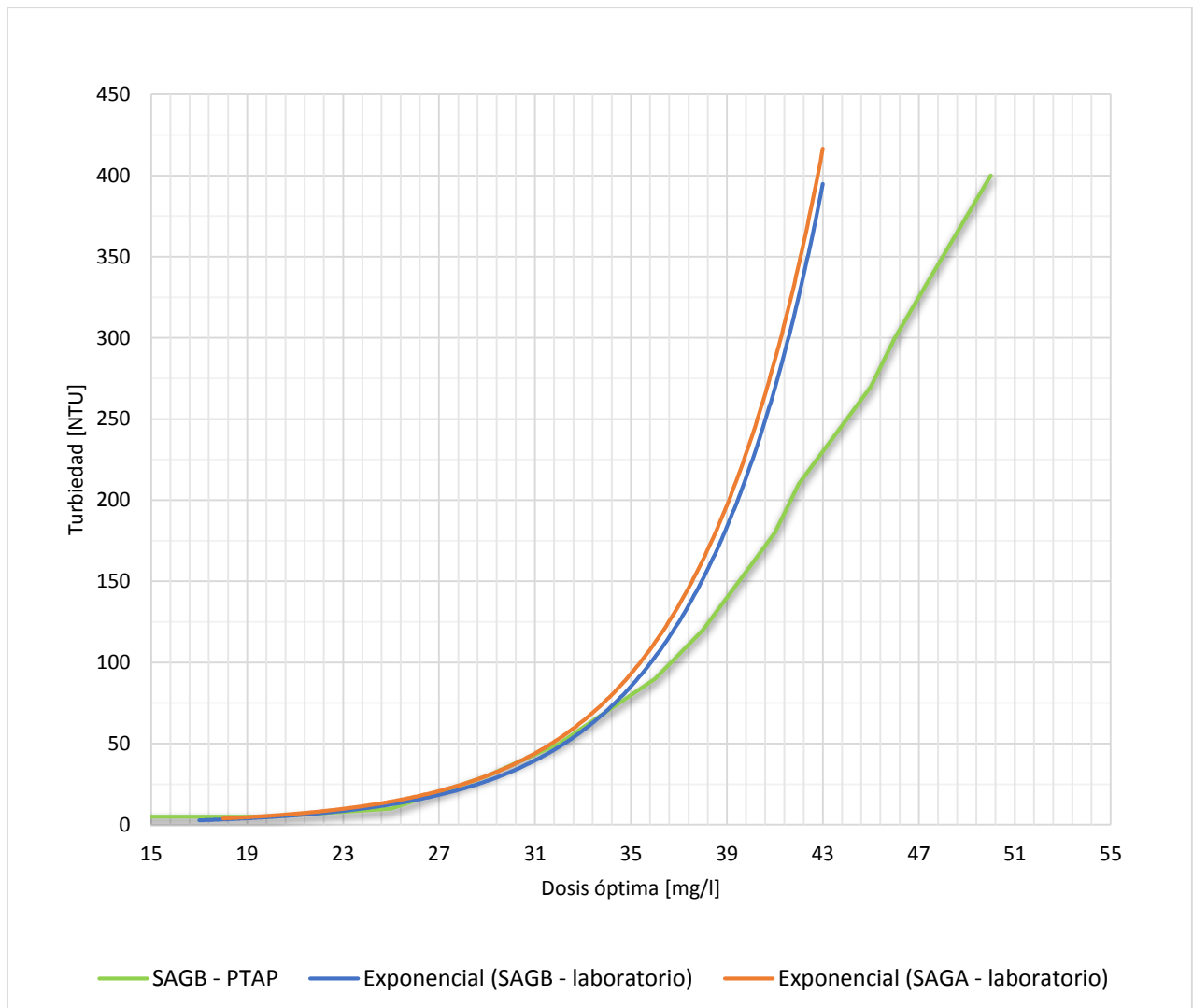


Figura 7.15-1: TURB inicial vs dosis óptima para un caudal de 950 l/s

Fuente: Criollo & Lara (2020)

$$y = 0,1322e^{0,1873x}$$

Ecuación 7.15-1: Dosis de SAGA en función de la TURB con datos del laboratorio

$$y = 0,1045e^{0,1916x}$$

Ecuación 7.15-2: Dosis de SAGB en función de la TURB con datos del laboratorio

$$y = 0,6916e^{0,1318x}$$

Ecuación VII-3: Dosis de SAGB en función de la TURB con datos de la PTAP del Cebollar.

X: Valor de TURB del agua cruda (NTU)

Y: Valor de la dosis óptima de sulfato de aluminio granular tipo B (mg/l)

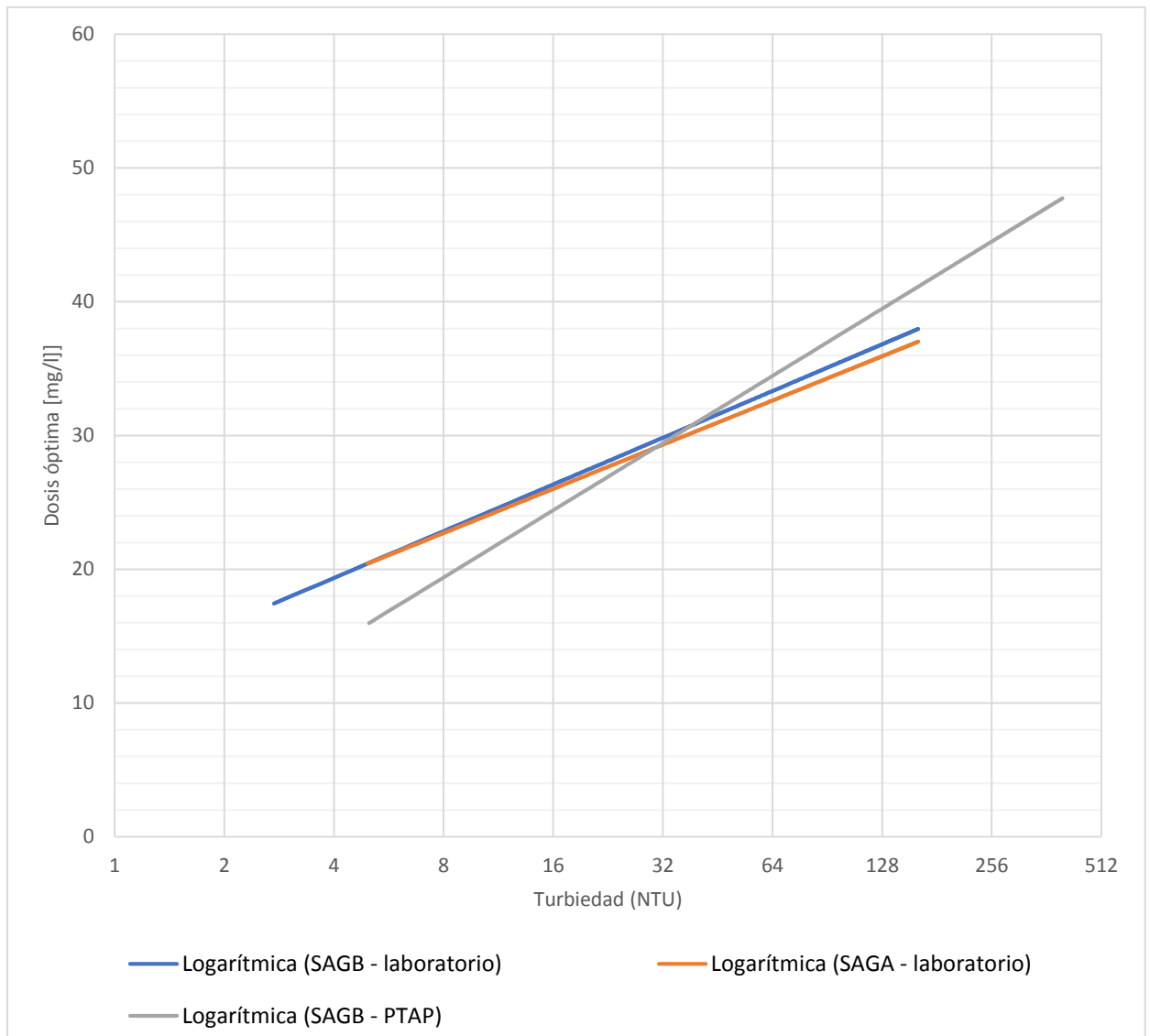


Figura 7.15-2: Gráfica semilogarítmica de la TURB inicial vs dosis óptima para un caudal de 950 l/s
Fuente: Criollo & Lara (2020).

$$y = 4,7674 \ln(x) + 12,792$$

Ecuación VII-5: Dosis de sulfato tipo A en función de la TURB con datos del laboratorio

$$y = 5,0391 \ln(x) + 12,369$$

Ecuación VII-6: Dosis de sulfato tipo B en función de la TURB con datos del laboratorio

$$y = 7,2471 \ln(x) + 4,3144$$

Ecuación VII-7: Dosis de sulfato tipo B en función de la TURB con datos de la P.D.P del Cebollar.

X: Valor de TURB del agua cruda (NTU)

Y: Valor de la dosis óptima de sulfato de aluminio granular tipo B (mg/l)

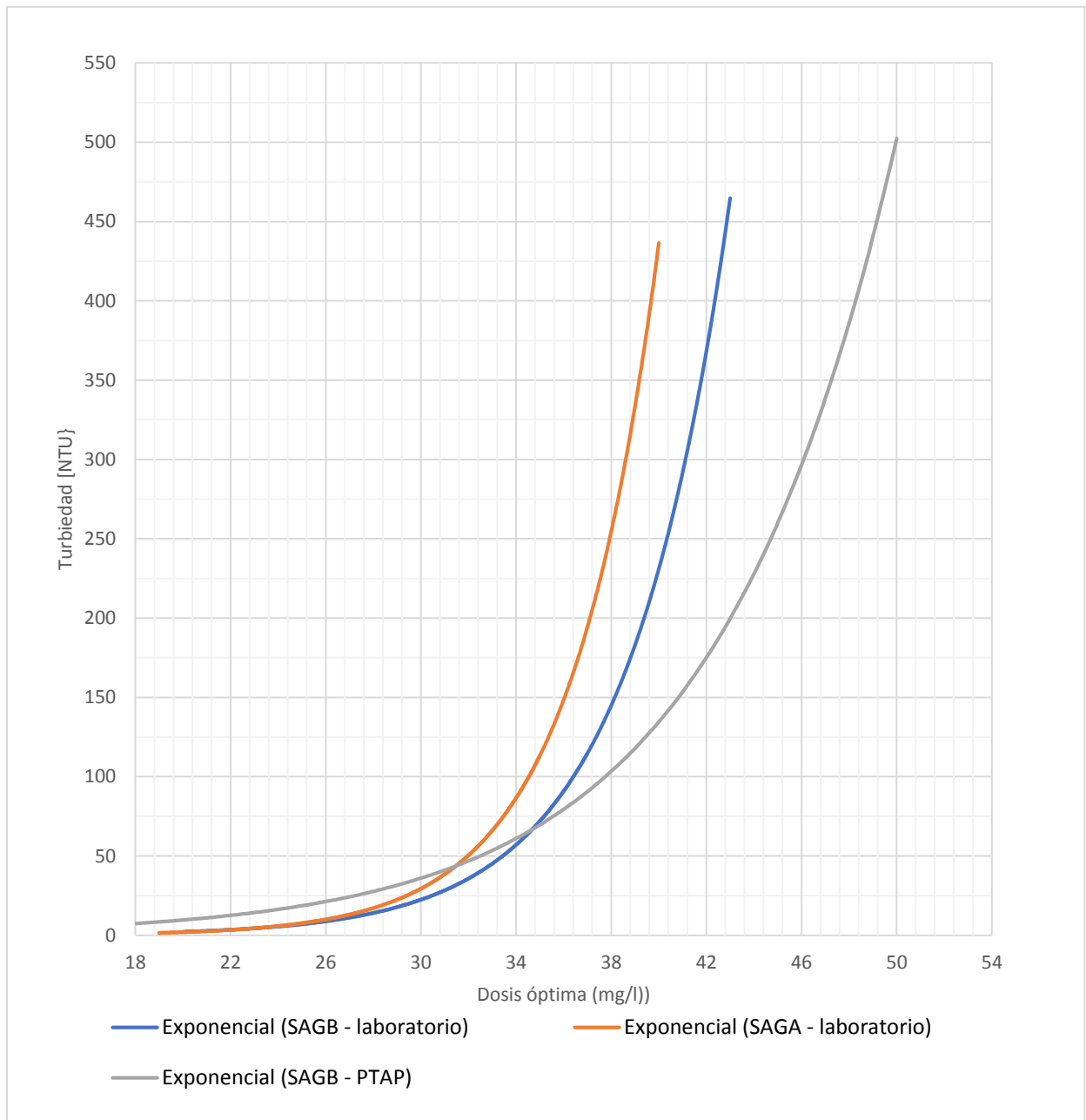


Figura 7.15-3: TURB inicial vs dosis óptima para un caudal de 800 l/s

Fuente: Criollo & Lara (2020).

$$y = 0,009e^{0,2698x}$$

$$y = 0,0206e^{0,2331x}$$

$$y = 0,6916e^{0,1318x}$$

Ecuación VII-8: Dosis de sulfato tipo A en función de la TURB con datos del laboratorio

Ecuación VII-9: Dosis de sulfato tipo B en función de la TURB con datos del laboratorio

Ecuación VII-10: Dosis de sulfato tipo B en función de la TURB con datos de la P.D.P del Cebollar.

X: Valor de TURB del agua cruda (NTU)

Y: Valor de la dosis óptima de sulfato de aluminio granular tipo B (mg/l)

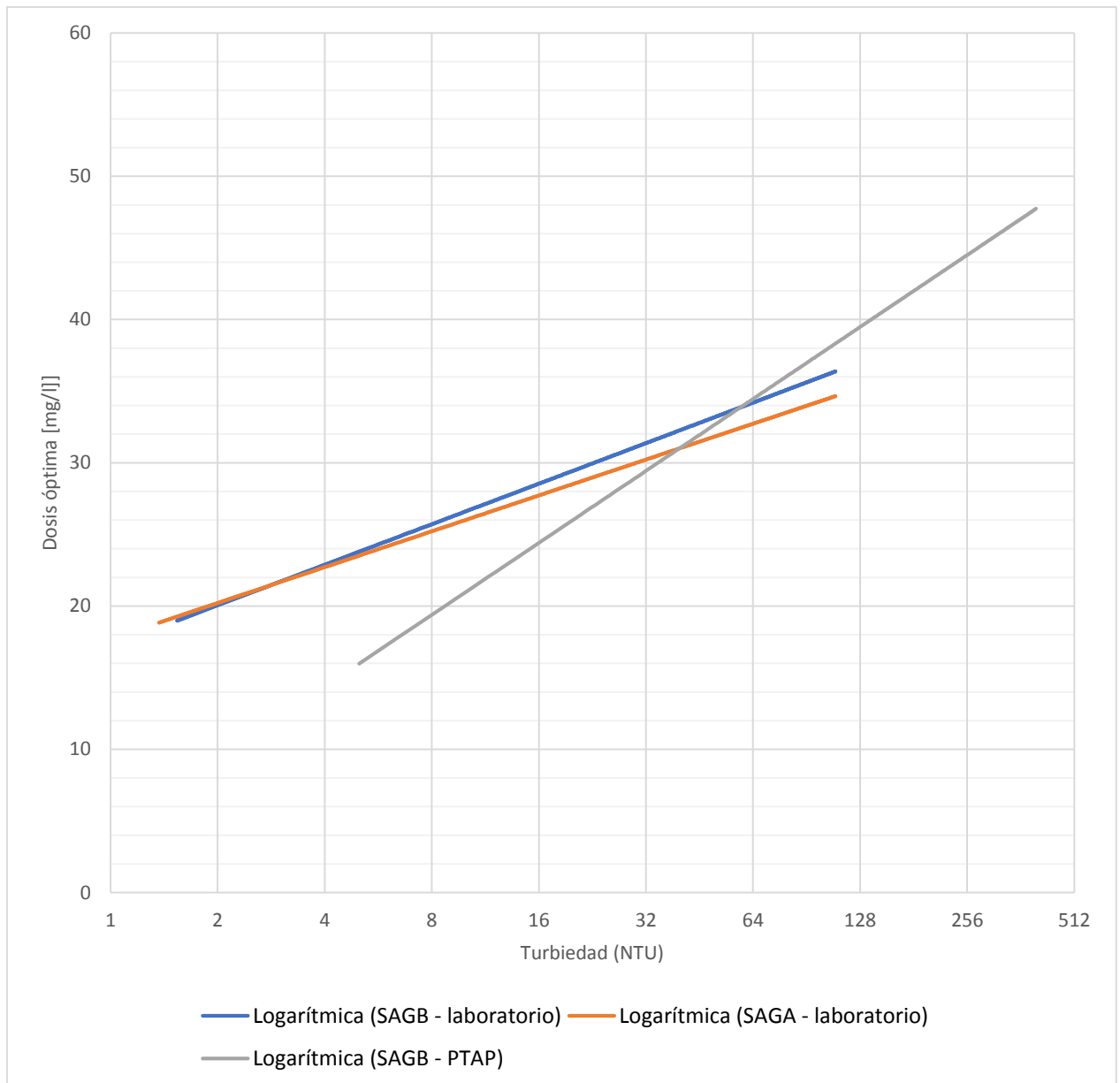


Figura 7.15-4: Gráfica semilogarítmica de la TURB inicial vs dosis óptima para un caudal de 800 l/s
Fuente: Criollo & Lara (2020).

$$y = 3,6102\ln(x) + 17,71$$

$$y = 4,0809\ln(x) + 17,226$$

$$y = 7,2471\ln(x) + 4,3144$$

Ecuación VII-8: Dosis de sulfato tipo A en función de la TURB con datos del laboratorio

Ecuación VII-9: Dosis de sulfato tipo B en función de la TURB con datos del laboratorio

Ecuación VII-10: Dosis de sulfato tipo B en función de la TURB con datos de la P.D.P del Cebollar.

X: Valor de TURB del agua cruda (NTU)

Y: Valor de la dosis óptima de sulfato de aluminio granular tipo B (mg/l)

7.16 Anexo VII-P: Resultados estadísticos

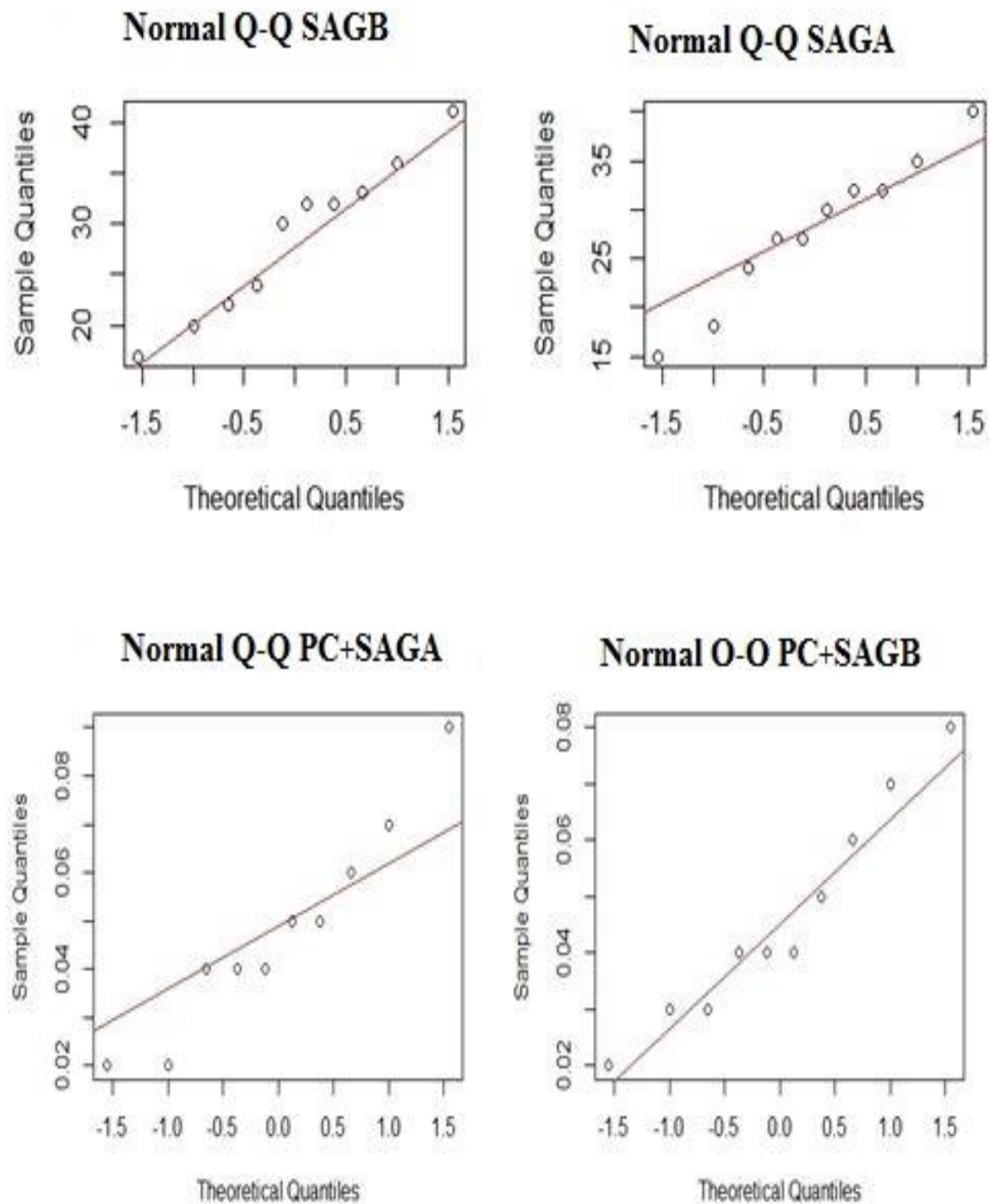


Figura 7.16-1: Gráficas de Q-Q plots. En el parte superior se encuentra la normalidad del coagulante y en la parte inferior del floculante con el coagulante para un caudal de 950 l/s.

Fuente: Criollo & Lara (2020).

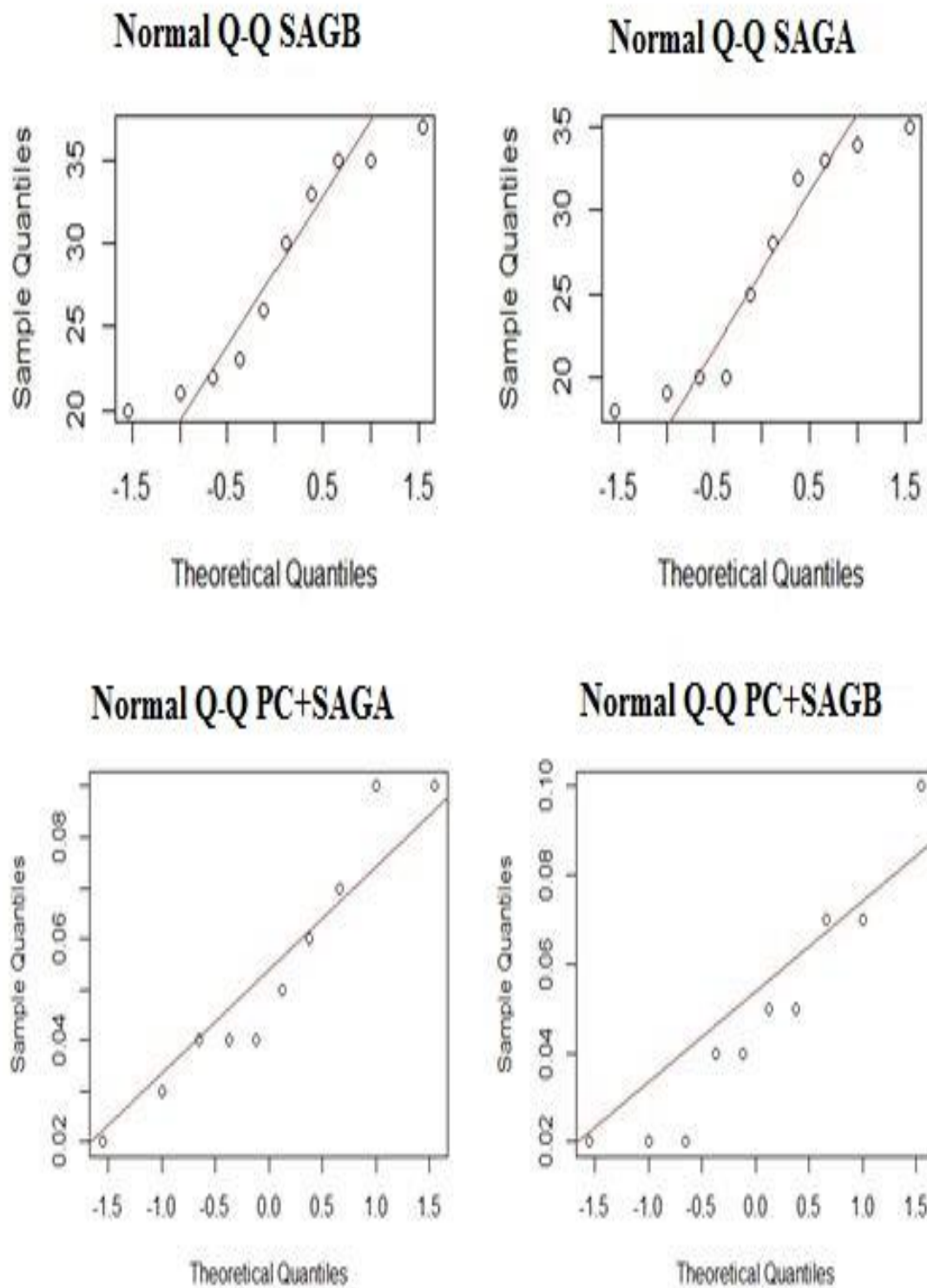


Figura 7.16-2: Gráficas de Q-Q plots. En el parte superior se encuentra la normalidad del coagulante y en la parte inferior del floculante con el coagulante para un caudal de 800 l/s.

Fuente: Criollo & Lara (2020).

7.17 Anexo VII-Q: Curvas de dosificación floculante

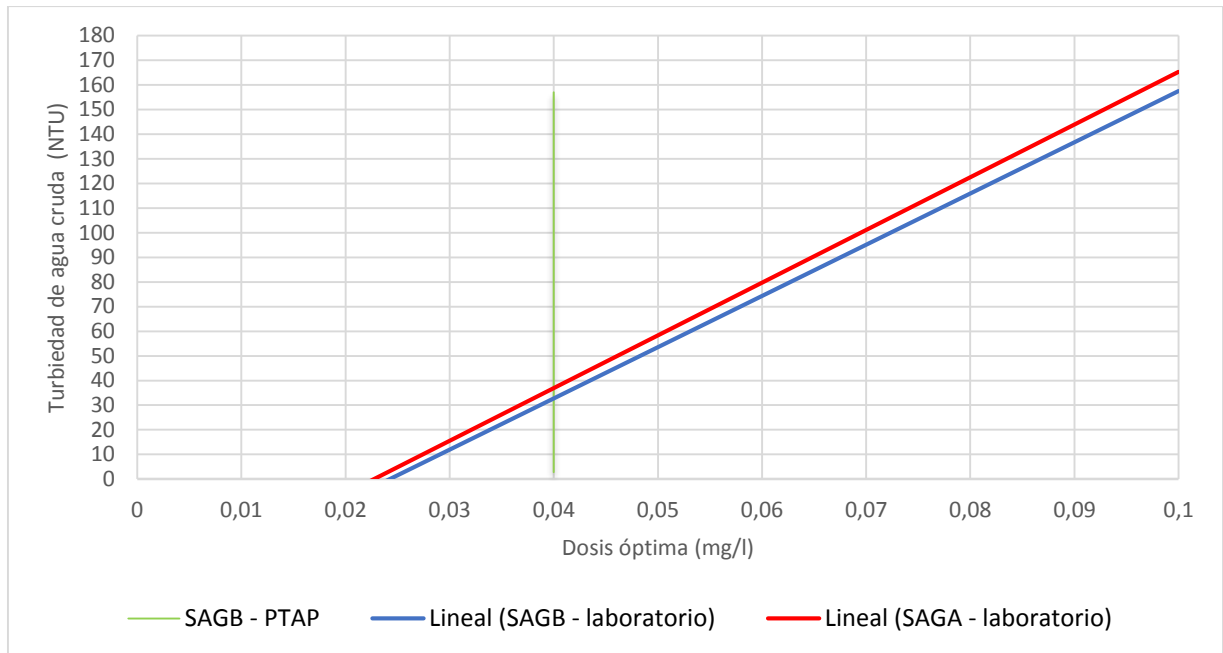


Figura 7.17-1: Curvas de dosificaciónes con los dos coagulantes y el empleado en la PTAP para un caudal de 950 l/s

Fuente: Criollo & Lara (2020).

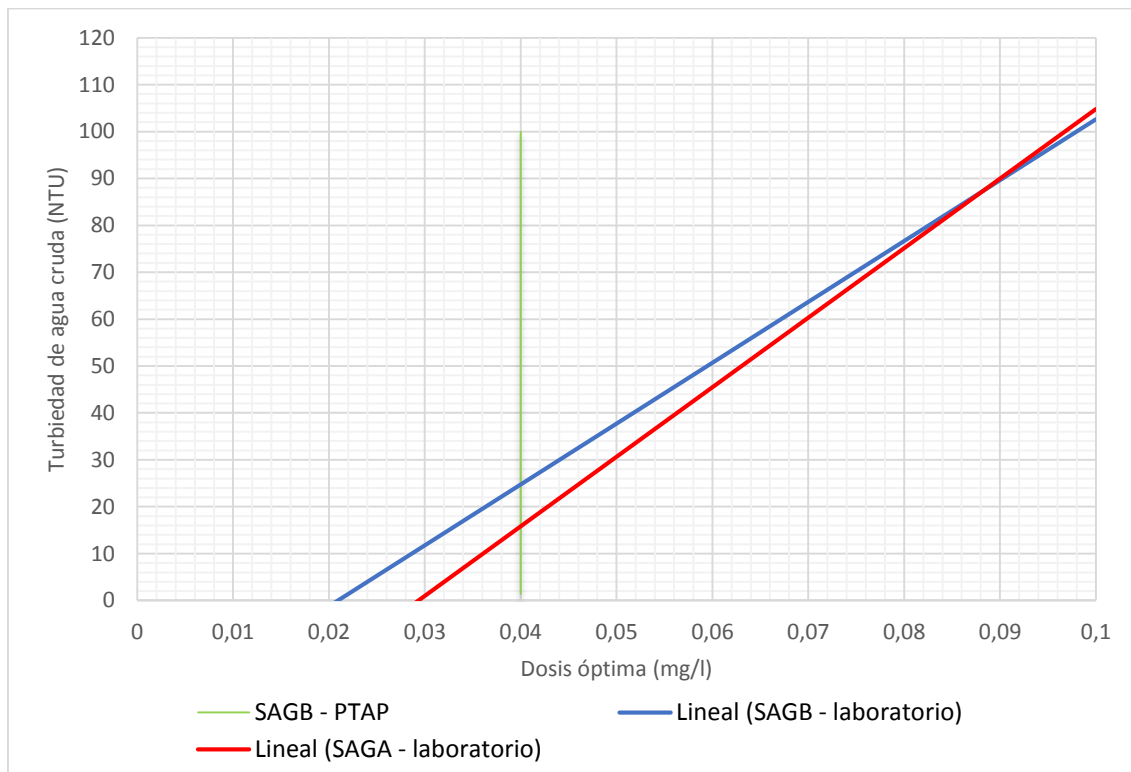


Figura 7.17-2: Curvas de dosificaciónes con los dos coagulantes y el empleado en la PTAP para un caudal de 800 l/s

Fuente: Criollo & Lara (2020).



7.18 Anexo VII-R: Curvas de eficiencia de coagulante y floculante

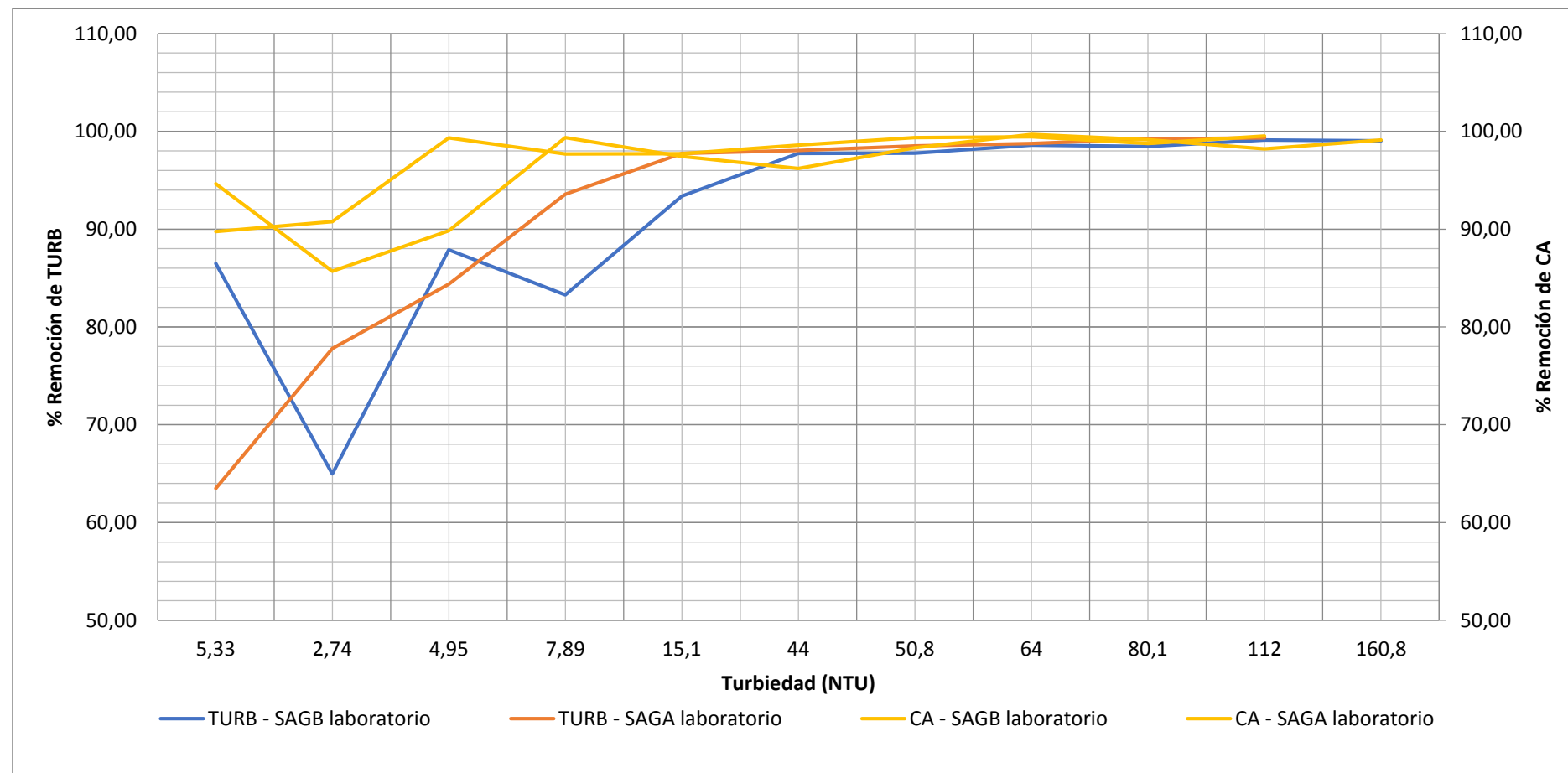


Figura 7.18-1: Comportamiento de la eficiencia de TURB, CA y pH para un caudal de 950 l/s del SA
Fuente: Criollo & Lara (2020).

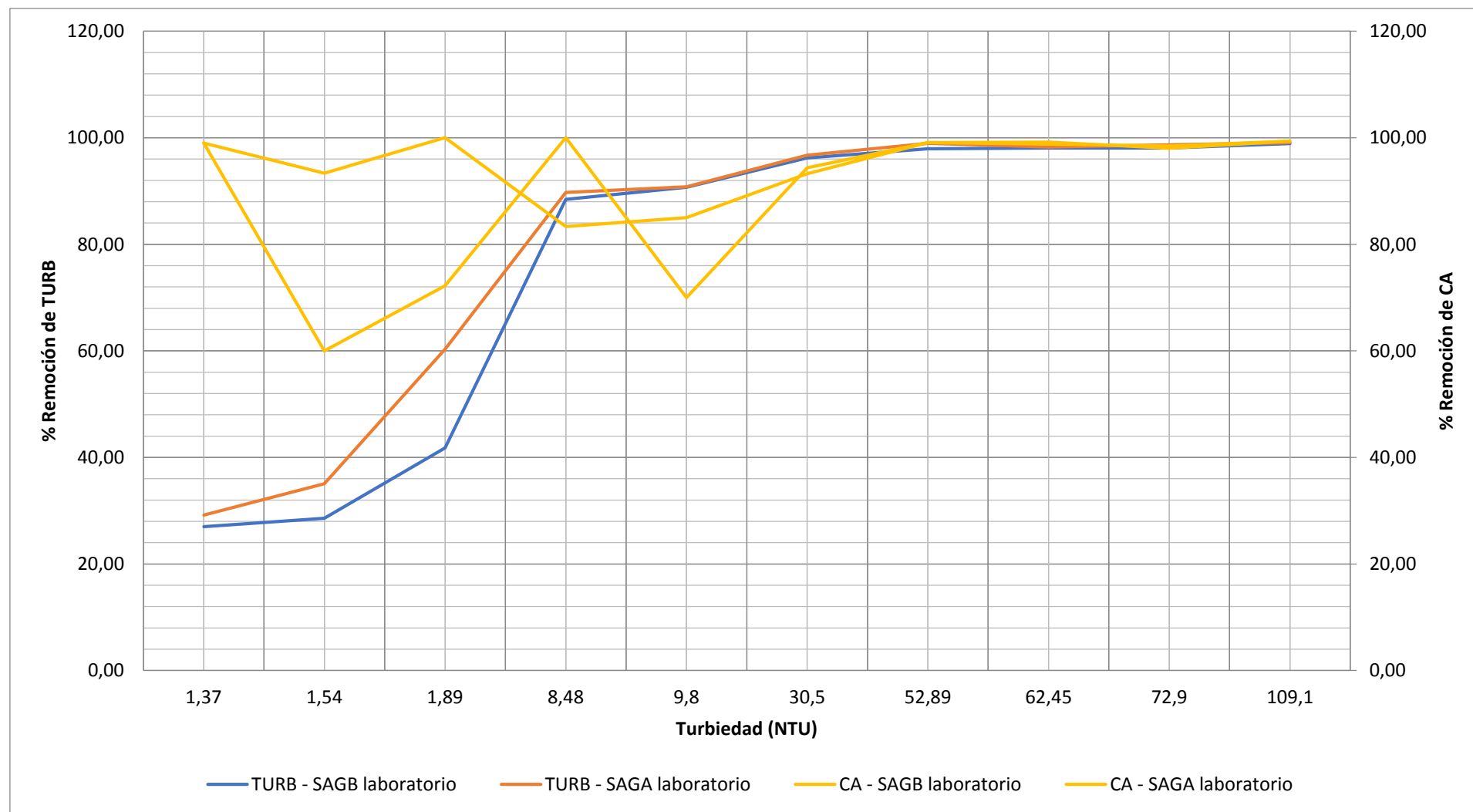


Figura 7.18-2: Comportamiento de la eficiencia de TURB, CA y pH para un caudal de 800 l/s del SA.
Fuente: Criollo & Lara (2020).

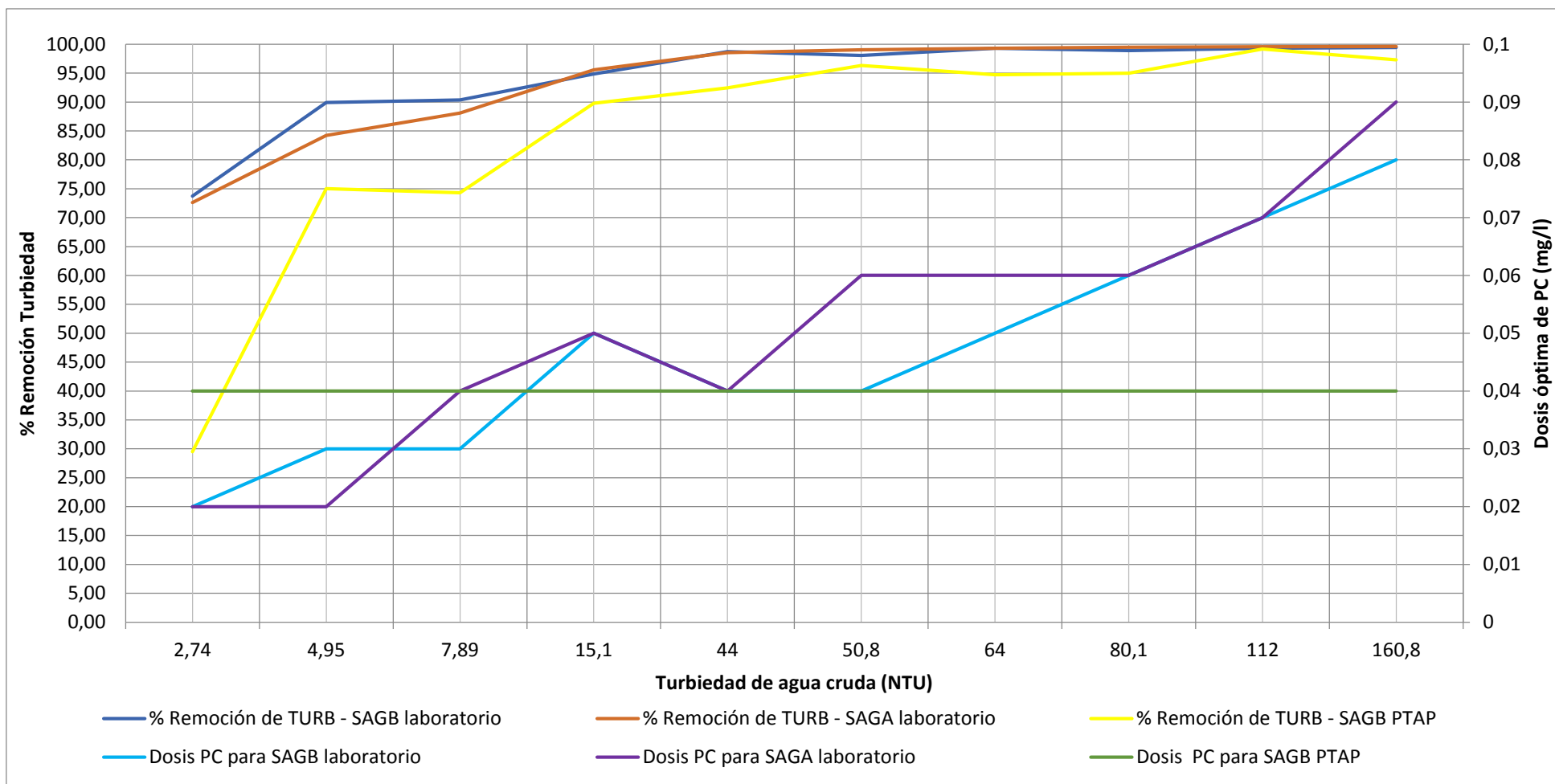


Figura 7.18-3: Eficiencia del polímero para un caudal de 950 l/s
Fuente: Criollo & Lara (2020).

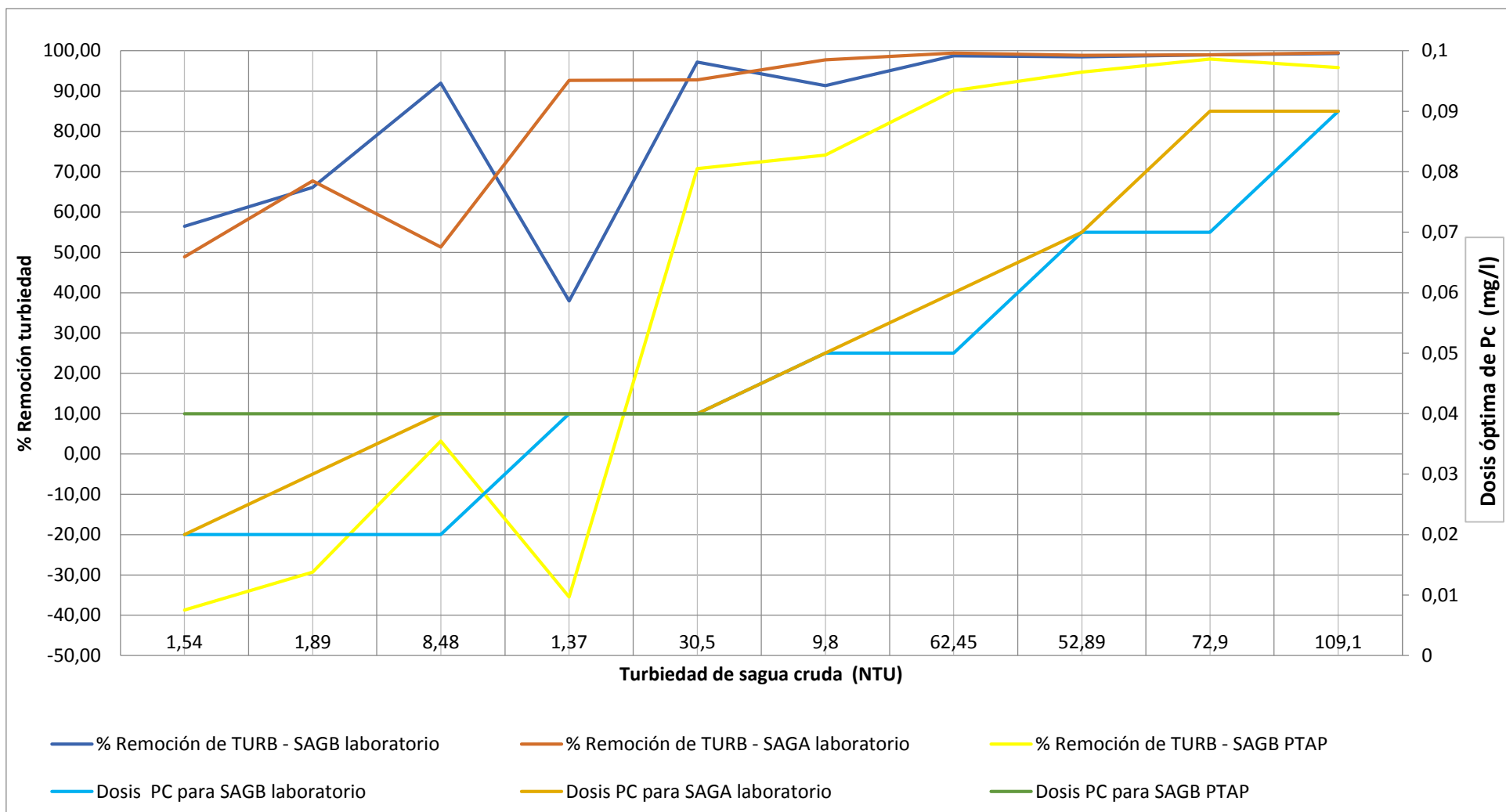


Figura 7.18-4: Eficiencia del polímero para un caudal de 800 l/s
Fuente: Criollo & Lara (2020)

