

UCUENCA

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

Evaluación de la dosificación de policloruro de aluminio sobre el rendimiento de la coagulación – floculación en la planta potabilizadora de la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas

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

Autores:

Mateo Roberto Patiño Ullauri

CI: 0105812812

Correo electrónico: mateop9911@gmail.com

Bryan Alexander Vallejo Chuchuca

CI: 0106423064

Correo electrónico: bryanvallejo44@gmail.com

Tutor:

Ing. Fausto Fernando García Ávila PhD.

CI: 0301454617

Cuenca, Ecuador

12-septiembre-2022

RESUMEN

El presente trabajo fue realizado en la planta de potabilización de la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas (JAAPRB), el estudio estuvo orientado a evaluar la dosificación de policloruro de aluminio (PAC) sobre el rendimiento de la coagulación-floculación, para lo cual se realizaron pruebas de jarras con el uso de este coagulante en conjunto a polímero catiónico (PC) durante los meses de agosto y septiembre de 2021 así como febrero y marzo de 2022 abarcando un amplio rango de turbiedad del agua cruda. Con los resultados obtenidos en las pruebas de jarras se elaboró la curva de dosificación de PAC en base a tres criterios analizados, los cuáles correspondieron al análisis del rango completo de turbiedad registrado, rango menor a 500 NTU y rango mayor a 500 NTU, y también se determinó la dosis óptima de PC. Para la evaluación del proceso de coagulación-floculación se determinó un modelo matemático que describa la turbiedad del agua después del proceso de sedimentación en función de los parámetros turbiedad, pH y temperatura del agua cruda que ingresa al proceso de tratamiento, mediante la aplicación de la metodología de superficie de respuesta (MSR).

Los resultados obtenidos indicaron que el promedio del porcentaje de remoción de la turbiedad del agua cruda en el desarrollo de las pruebas de jarras fue de 93.73% en un rango de turbiedad de 6.23 a 6030 NTU. Además, se encontró que existe un beneficio económico anual para la JAAPRB de aproximadamente \$872.10 asociado a la reducción en la adquisición del producto químico PAC para la potabilización del agua cruda. De manera análoga, la curva de dosificación permite a los operarios establecer la dosis óptima de PAC para un valor de turbiedad específico, lo cual asegura y mejora el sistema de potabilización de agua, al igual que permite cumplir con los requerimientos establecidos en la normativa de calidad del agua INEN 1108.

Palabras clave: Coagulación. Floculación. Policloruro de aluminio. Polímero catiónico. Prueba de jarras. Curva de dosificación. Metodología de superficie de respuesta.

ABSTRACT

The present work was carried out at the Bayas Regional Drinking Water Board (JAAPRB) drinking water treatment plant, the study was aimed towards at evaluating the dosage of aluminum polychloride (PAC) on the coagulation-flocculation performance, for which jar tests were conducted with the use of this coagulant in conjunction with cationic polymer (PC) during the months of August and September 2021 and February and March 2022, covering a wide range of raw water turbidity. With the results obtained in the jug tests, the PAC dosage curve was elaborated based on three analyzed criteria, which corresponded to the analysis of the complete range of turbidity recorded, range less than 500 NTU and range greater than 500 NTU, and the optimum PC dosage was also determined. For the evaluation of the coagulation-flocculation process, a mathematical model was determined to describe the turbidity of the water after the sedimentation process as a function of the parameters turbidity, pH and temperature of the raw water entering the treatment process, by applying the response surface methodology (RSM).

The results obtained indicated that the average percentage of turbidity removal of the raw water in the development of the jug tests was 93.73% in a turbidity range of 6.23 to 6030 NTU. In addition, it was found that there is an annual economic benefit to the JAAPRB of approximately \$872.10 associated with the reduction in the purchase of the PAC chemical for the potabilization of raw water. Similarly, the dosage curve allows operators to establish the optimal PAC dosage for a specific turbidity value, which ensures and improves the water purification system, as well as allows compliance with the requirements established in the INEN 1108 water quality standard.

Key words: Coagulation. Flocculation. Aluminum polychloride. Cationic polymer. Jar test. Dosing curve. Response surface methodology.

LISTA DE ABREVIATURAS

CF: Cloruro férrico

JAAPRB: Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas

MSE: Error medio cuadrático

MSR: Metodología de Superficie de Respuesta

NTU: Unidad nefelométrica de turbiedad

PAC: Policloruro de aluminio

PC: Polímero catiónico

PTAP: Planta de Tratamiento de Agua Potable

RMSE: Raíz del error medio cuadrático

RPM: Revoluciones por minuto

SA: Sulfato de aluminio

UC Pt-Co: Unidades de color platino-cobalto

ÍNDICE

PORTADA	1
RESUMEN	2
ABSTRACT	3
LISTA DE ABREVIATURAS	4
CAPTULO I	24
1. Introducción y objetivos.....	24
1.1. Introducción	24
1.1.1. Antecedentes	24
1.1.2. Problemática.....	24
1.1.3. Justificación.....	25
1.2. Objetivos	25
1.2.1. Objetivo general	25
1.2.2. Objetivos específicos.....	25
CATIPULO II	26
2. Marco Teórico	26
2.1. Tipos de agua	26
2.1.1. Agua cruda	26
2.1.2. Agua potable	26
2.2. Parámetros de calidad del agua	26
2.2.1. Parámetros físicos	26
2.2.1.1. Turbiedad	26
2.2.1.2. Color.....	27
2.2.1.3. Olor y sabor	27
2.2.1.4. Temperatura	27
2.2.1.5. Sólidos.....	27
2.2.1.6. Conductividad eléctrica.....	28
2.2.1.7. pH.....	28
2.2.2. Parámetros químicos	28
2.2.3. Parámetros microbiológicos	28
2.2.4. Normativa INEN 1108	29
2.3. Procesos de potabilización convencional del agua.....	29
2.3.1. Coagulación.....	29
2.3.2. Floculación	29
2.3.3. Sedimentación de alta tasa	29
2.3.4. Filtración rápida	30

2.3.5.	Desinfección.....	30
2.4.	Teoría de coagulación	30
2.4.1.	Coloides.....	30
2.4.1.1.	Doble capa eléctrica	31
2.4.1.2.	Potencial zeta.....	31
2.4.1.3.	Movimiento browniano	32
2.4.2.	Estabilidad coloidal	32
2.4.2.1.	Fuerza de atracción de Van der Waals	32
2.4.2.2.	Fuerzas de repulsión electrostáticas.....	32
2.4.3.	Mecanismos de coagulación.....	32
2.4.3.1.	Compresión de la doble capa eléctrica	32
2.4.3.2.	Adsorción electrostática o coagulación por neutralización	33
2.4.3.3.	Adsorción y puente químico.....	33
2.4.3.4.	Coagulación por barrido.....	34
2.4.4.	Parámetros influyentes en la coagulación	34
2.4.4.1.	Temperatura	34
2.4.4.2.	pH.....	34
2.4.4.3.	Alcalinidad, conductividad eléctrica y sales disueltas	35
2.4.4.4.	Concentración coloidal.....	35
2.4.4.5.	Color.....	35
2.4.4.6.	Turbiedad	35
2.4.5.	Coagulantes	35
2.4.5.1.	Coagulantes convencionales.....	35
a.	Sulfato de aluminio	36
2.4.5.2.	Coagulantes alternativos.....	36
2.4.5.3.	Dosis óptima de coagulante.....	36
2.4.6.	Mezcla rápida	37
2.4.6.1.	Parámetros operacionales	37
a.	Intensidad de mezcla o agitación.....	37
b.	Tiempo de mezcla	37
c.	Gradiente de velocidad.....	37
2.4.6.2.	Dosificación del coagulante	37
2.4.6.3.	Mezcladores	38
2.5.	Teoría de la floculación.....	38
2.5.1.	Mezcla Lenta	39
2.5.2.	Mecanismos de floculación.....	39
2.5.2.1.	Pericinética.....	39

2.5.2.2.	Ortocinética	39
2.5.2.3.	Asentamiento diferencial.....	40
2.5.3.	Parámetros influyentes en la floculación.....	40
2.5.3.1.	Gradiente de velocidad.....	40
2.5.3.2.	Tiempo de retención.....	40
2.5.3.3.	Concentración y naturaleza de las partículas.....	40
2.5.3.4.	Naturaleza del agua	41
2.5.4.	Floculantes	41
2.5.4.1.	Floculantes inorgánicos minerales	41
2.5.4.2.	Floculantes orgánicos naturales.....	42
2.5.4.3.	Floculantes orgánicos sintéticos	42
2.5.5.	Tipos de floculadores	42
2.5.5.1.	Floculadores hidráulicos.....	42
a.	Floculadores de flujo horizontal.....	42
b.	Floculadores de flujo vertical.....	43
2.5.5.2.	Floculadores mecánicos	43
2.6.	Pruebas de jarras.....	44
2.6.1.	Condiciones de la prueba de jarras.....	44
2.6.1.1.	Mezcla rápida	45
2.6.1.2.	Mezcla lenta	45
2.6.2.	Parámetros químicos operacionales	45
2.6.2.1.	pH.....	45
2.6.2.2.	Temperatura	45
2.6.2.3.	Concentración del coagulante	45
2.6.3.	Parámetros hidráulicos operacionales	45
2.6.3.1.	Gradiente de velocidad.....	45
2.6.3.2.	Tiempo de retención.....	45
2.6.4.	Curva de dosificación de coagulante.....	46
2.7.	Fundamento Estadístico	46
2.7.1.	Modelos de regresión	46
2.7.1.1.	Regresión Lineal	46
2.7.1.2.	Regresión Polinómica.....	46
2.7.1.3.	Regresión Logarítmica	47
2.7.2.	Ajuste de un modelo de regresión	47
2.7.2.1.	Error estándar residual RSE.....	47
2.7.2.2.	Coefficiente de determinación (R^2)	47
2.7.2.3.	Coefficientes de regresión	48

2.7.2.4.	Datos atípicos	48
2.7.2.5.	Datos influyentes.....	48
2.7.2.6.	Distancia de Cook	48
2.7.2.7.	Prueba de Bonferroni.....	49
2.7.3.	Metodología de superficie de respuesta	49
2.7.3.1.	Ajuste de superficie de respuesta o diseño de modelos.....	49
2.7.3.2.	Análisis de varianza.....	50
2.7.3.3.	Coefficiente de determinación predictivo (R^2 pred)	50
2.7.3.4.	Coefficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado).....	50
2.7.4.	Análisis de sensibilidad.....	51
2.7.5.	Validación de modelos matemáticos	51
2.7.5.1.	Validación externa de un modelo.....	51
2.7.6.	Normalidad de residuos de un modelo matemático de regresión.....	51
2.8.	Estado del Arte	51
CAPÍTULO III.....		53
3.	Metodología	53
3.1.	Descripción de la Planta Potabilizadora de la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas.....	53
3.1.1.	Captación y fuentes de agua de la planta potabilizadora.....	54
3.1.2.	Descripción del proceso de potabilización de la planta de tratamiento.....	55
3.1.2.1.	Ingreso de agua cruda.....	56
3.1.2.2.	Mezcla rápida o coagulación	57
3.1.2.3.	Mezcla lenta o floculación	57
3.1.2.4.	Sedimentación o decantación	59
3.1.2.5.	Prefiltración.....	60
3.1.2.6.	Filtración rápida	61
3.1.2.7.	Desinfección.....	62
3.1.2.8.	Almacenamiento y distribución de agua tratada	62
3.2.	Realización de las pruebas de jarras usando Policloruro de Aluminio	63
3.2.1.	Descripción de las características hidráulicas de las unidades de coagulación-floculación.....	63
3.2.1.1.	Características hidráulicas de la mezcla rápida y mezcla lenta	63
a.	Tiempo de mezcla de la unidad de coagulación.....	64
b.	Tiempo de retención de la unidad de floculación.....	64
c.	Gradiente de velocidad unidad de coagulación.....	64
d.	Gradiente de velocidad unidad de floculación	64
3.2.1.2.	Obtención de las velocidades de agitación para el equipo jar test.....	64

3.2.2.	Toma de muestras de agua cruda	65
3.2.3.	Preparación de soluciones químicas de laboratorio.....	66
3.2.3.1.	Preparación de Policloruro de Aluminio – coagulante.....	66
3.2.3.2.	Preparación del polímero catiónico – floculante	66
3.2.4.	Determinación del volumen de alícuotas	67
3.2.5.	Materiales, equipos y reactivos	68
3.2.6.	Procedimiento para las pruebas de jarras	69
3.3.	Elaboración de la curva de dosificación de Policloruro de Aluminio	69
3.3.1.	Recopilación de datos.....	69
3.3.2.	Selección de datos	70
3.3.3.	Construcción de una base de datos.....	70
3.3.4.	Análisis del comportamiento del pH.....	70
3.3.5.	Creación de la curva de dosificación de policloruro de aluminio	70
3.3.5.1.	Significancia de los coeficientes de regresión.....	71
3.3.6.	Identificación de datos atípicos y datos influyentes - criterio estadístico	71
3.3.6.1.	Detección de datos influyentes.....	71
3.3.6.2.	Detección de datos atípicos	72
3.3.7.	Identificación de datos con eventualidades - criterio técnico.....	72
3.3.8.	Análisis de costos	72
3.4.	Evaluación de la eficiencia del proceso de coagulación-floculación	72
3.4.1.	Selección de factores	73
3.4.1.1.	Combinación de factores	73
3.4.2.	Creación de modelos matemáticos.....	73
3.4.2.1.	Ajuste de modelos matemáticos	73
3.4.2.2.	Análisis de sensibilidad	74
3.4.3.	Análisis de modelos matemáticos	74
3.4.3.1.	Elección del mejor modelo.....	74
3.4.3.2.	Análisis de residuos.....	74
3.4.3.3.	Gráficas de superficie de respuesta y contorno del modelo matemático.....	75
3.4.3.4.	Validación externa del modelo matemático	75
CAPÍTULO IV	76
4.	Resultados	76
4.1.	Realización de las pruebas de jarras usando policloruro de aluminio.....	76
4.1.1.	Remoción de turbiedad del agua cruda	76
4.1.2.	Comportamiento de pH.....	79
4.1.3.	Determinación de la dosis óptima de policloruro de aluminio.....	81
4.1.4.	Determinación de la dosis óptima de polímero catiónico	81

4.1.5.	Construcción de la base de datos para la dosis óptima de PAC	82
4.2.	Elaboración de la curva de dosificación de Policloruro de Aluminio	83
4.2.1.	Creación de la curva de dosificación de policloruro de aluminio	83
4.2.1.1.	Significancia de los coeficientes de regresión.....	92
4.2.2.	Identificación de datos atípicos y datos influyentes – criterio estadístico.....	94
4.2.3.	Identificación de datos con eventualidades – criterio técnico	96
4.2.4.	Curvas de dosificación para los criterios de análisis	96
4.2.4.1.	Interpretación de curvas de dosificación para los operarios de la Planta de Potabilización	101
4.2.5.	Análisis de costos	102
4.3.	Evaluación de la eficiencia del proceso de coagulación-floculación	103
4.3.1.	Exploración gráfica de las variables pH y temperatura del agua cruda.....	103
4.3.2.	Creación de modelos	103
4.3.3.	Análisis de sensibilidad.....	105
4.3.4.	Análisis de resultados de modelos matemáticos	108
4.3.4.1.	Elección y descripción del mejor modelo	111
4.3.4.2.	Análisis de residuos del modelo matemático	116
4.3.4.3.	Gráficas de superficie de respuesta del modelo matemático	117
4.3.4.4.	Gráficas de superficie de contorno del modelo matemático.....	119
4.3.4.5.	Validación externa del modelo matemático	121
CAPÍTULO V.....		125
5.	Conclusiones y Recomendaciones	125
5.1.	Conclusiones	125
5.2.	Recomendaciones.....	127
CAPÍTULO VI.....		129
6.	Referencias Bibliográficas	129
CAPÍTULO VII.....		136
7.	Anexos.....	136
7.1.	Anexo 1: NTE INEN 1108:2020.....	136
7.2.	Anexo 2: Permiso para la utilización del equipo de jarras	139
7.3.	Anexo 3: Resultados de las pruebas o ensayos de jarras.....	140
7.4.	Anexo 4: Fichas técnicas de los reactivos químicos	149
7.5.	Anexo 5: Fichas técnicas de los equipos	152
7.6.	Anexo 6: Procedimiento para la realización de las pruebas de jarras	155
7.7.	Anexo 7: Ensayos de jarras para la dosis óptima de polímero catiónico	157
7.8.	Anexo 8: Base de datos utilizados para crear el modelo matemático	161
7.9.	Anexo 9: Evidencias fotográficas de las pruebas de jarras realizadas	162

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Doble capa eléctrica.....	31
Figura 2. Compresión de la doble capa eléctrica.....	33
Figura 3. Iones de carga diferente adsorbidos en un coloide	33
Figura 4. Polímeros adsorbidos en una partícula coloidal.....	34
Figura 5. Combinación de Aluminio cargado positivamente con una partícula coloidal de carga negativa	36
Figura 6. Combinación de Hidróxido de Aluminio (+) con una partícula coloidal negativa	36
Figura 7. Progresión del proceso de agregación de partículas	39
Figura 8. Efecto del tiempo de floculación	41
Figura 9. Floculador de pantallas flujo horizontal	43
Figura 10. Floculador de pantallas flujo vertical.....	43
Figura 11. Floculador de paletas de eje horizontal.....	44
Figura 12. Equipo utilizado en la prueba de jarras.....	44
Figura 13. Ubicación de la Planta de Potabilización Bayas en la división geográfica política.....	53
Figura 14. Imagen Satelital de la Planta de Potabilización Bayas. Elaboración mediante plugin Quick Map Services para QGIS 3.4	54
Figura 15. Captación Mahuar cay Alto	55
Figura 16. Captación Mahuar cay Bajo.....	55
Figura 17. Captación Chagracazhca.....	55
Figura 18. Captación Santa Ana Llaucay	55
Figura 19. Captación Pilzhum.....	55
Figura 20. Válvulas de ingreso de agua cruda.....	56
Figura 21. Vertedero rectangular para resalto hidráulico.....	57
Figura 22. Tanque de 1000 litros de capacidad para la preparación del policloruro de aluminio....	57
Figura 23. Flauta de dosificación de coagulante	57
Figura 24. Floculador hidráulico de flujo horizontal	58
Figura 25. Floculador hidráulico de flujo vertical.....	59
Figura 26. Flauta de dosificación del polímero catiónico	59
Figura 27. Tanque de 200 litros de capacidad para la preparación del polímero catiónico	59
Figura 28. Sedimentador laminar de placas paralelas	60
Figura 29. Sedimentador tubular	60
Figura 30. Proceso de prefiltración luego de la sedimentación.....	60
Figura 31. Canal de recolección de agua prefiltrada (floculador de flujo vertical).....	61
Figura 32. Canal de recolección de agua prefiltrada (floculador de flujo horizontal).....	61
Figura 33. Batería de filtros rápidos	61

Figura 34. Canal de recolección de agua proveniente de la filtración rápida.....	61
Figura 35. Sistema de goteo directo de hipoclorito de calcio.....	62
Figura 36. Cuarto de cloración.....	62
Figura 37. Tanque de almacenamiento de agua tratada	62
Figura 38. Abaco de gradiente de velocidad vs velocidad de agitación de la paleta.....	65
Figura 39. Policloruro de aluminio (izquierda), polímero catiónico (derecha).....	67
Figura 40. Equipo de Jarras.....	68
Figura 41. Turbidímetro	68
Figura 42. Colorímetro.....	68
Figura 43. Equipo de pH y Temperatura.....	69
Figura 44. Balanza Analítica.....	69
Figura 45. Comportamiento de la Turbiedad Inicial y Turbiedad Final. Ensayo 1 al 15	77
Figura 46. Comportamiento de la Turbiedad Inicial y Turbiedad Final. Ensayo 16 al 32	78
Figura 47. Comportamiento de la Turbiedad Inicial y Turbiedad Final. Ensayo 33 al 49	78
Figura 48. Comportamiento de la Turbiedad Inicial y Turbiedad Final. Ensayo 50 al 56	78
Figura 49. Comportamiento de la Turbiedad Inicial y Turbiedad Final. Ensayo 57 al 63	79
Figura 50. Comportamiento del pH inicial y final en función de la dosis de PAC utilizada	79
Figura 51. Variación de pH.....	80
Figura 52. Gráfico de dispersión - Rango de turbiedad completa (6.23 - 6030 NTU).....	83
Figura 53. Ajuste de regresión lineal - Rango de turbiedad completa (6.23 - 6030 NTU)	84
Figura 54. Ajuste de regresión polinómica de grado 5 - Rango de turbiedad completa (6.23 - 6030 NTU)	85
Figura 55. Ajuste de regresión logarítmica - Rango de turbiedad completa (6.23 - 6030 NTU).....	85
Figura 56. Gráfico de dispersión - Rango de turbiedad < 500 NTU	86
Figura 57. Ajuste de regresión lineal - Rango de turbiedad < 500 NTU.....	87
Figura 58. Ajuste de regresión polinómica de grado 6 - Rango de turbiedad < 500 NTU.....	88
Figura 59. Ajuste de regresión logarítmica - Rango de turbiedad < 500 NTU	88
Figura 60. Gráfico de dispersión - Rango de turbiedad > 500 NTU	89
Figura 61. Ajuste de regresión lineal – Rango de turbiedad > 500 NTU	90
Figura 62. Ajuste de regresión polinómica de grado 6 - Rango de turbiedad > 500 NTU.....	91
Figura 63. Ajuste de regresión logarítmica - Rango de turbiedad > 500 NTU	91
Figura 64. Regresión logarítmica con la eliminación del intercepto – Rango de turbiedad < 500 NTU.....	93
Figura 65. Regresión logarítmica de la eliminación del coeficiente intercepto (Turbiedad > 500 NTU)	93
Figura 66. Datos influyentes - Rango de Turbiedad completa (6.23 - 6030 NTU).....	94

Figura 67. Datos influyentes – Rango de Turbiedad < 500 NTU	95
Figura 68. Datos influyentes - Rango de Turbiedad > 500 NTU	95
Figura 69. Curva de dosificación de PAC del primer criterio de análisis	97
Figura 70. Curva de dosificación de PAC del segundo criterio de análisis	98
Figura 71. Curva de dosificación de PAC del tercer criterio de análisis.....	98
Figura 72. Histograma de las variables x3 y x4	103
Figura 73. Comparación entre la turbiedad final luego del ensayo de jarras y la turbiedad estimada por el modelo.....	112
Figura 74. Dispersión de datos observados y datos predichos por el modelo matemático	113
Figura 75. Exploración visual de los residuos del mejor modelo matemático.....	117
Figura 76. Superficie de Respuesta, variables: Turbiedad Inicial (NTU) vs Temperatura (°C)	118
Figura 77. Superficie de respuesta, variables: Turbiedad Inicial (NTU) vs pH.....	118
Figura 78. Superficie de respuesta, variables: pH vs Temperatura (°C)	119
Figura 79. Gráfica de contorno, variables: Turbiedad Inicial (NTU) vs Temperatura (°C).....	120
Figura 80. Gráfica de contorno, variables: Turbiedad Inicial (NTU) vs pH.....	120
Figura 81. Gráfica de contorno, variables: pH vs Temperatura (°C)	121
Figura 82. Exploración visual de los residuos de la validación del modelo matemático	123
Figura 83. Comparación en la turbiedad final en planta y la turbiedad final estimada por el modelo matemático	124
Figura 84. Certificado de análisis del policloruro de aluminio (PAC).....	149
Figura 85. Especificaciones técnicas del agente floculante	151
Figura 86. Datos técnicos del Standard Jar Tester modelo PB-700™	152
Figura 87. Datos técnicos del colorímetro portátil - Serie DR 800.....	152
Figura 88. Datos técnicos del turbidímetro LED – Serie TL23	153
Figura 89. Datos técnicos del medidor de pH 510	153
Figura 90. Datos técnicos de la Balanza Adventurer™ modelo “AV”	154
Figura 91. Homogenización de una muestra de agua cruda.....	162
Figura 92. Preparación de celda para medir turbiedad.....	162
Figura 93. Muestras de agua cruda con turbiedad alta	162
Figura 94. Planta de tratamiento de Mahuarcay.....	162
Figura 95. Adición del coagulante PAC.....	162
Figura 96. Prueba de jarras con turbiedades bajas	162
Figura 97. Preparación de la solución química de PAC.....	163
Figura 98. Submuestra de agua cruda	163

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Mezcladores Mecánicos y Mezcladores Hidráulicos	38
Tabla 2. Ubicaciones geográficas de las captaciones	54
Tabla 3. Tiempos de retención y gradiente de velocidad de las zonas de floculación	58
Tabla 4. Valores de diseño del floculador hidráulico de flujo horizontal	58
Tabla 5. Parámetros operacionales recomendados	64
Tabla 6. Equipos utilizados para la medición de parámetros y prueba de jarras	68
Tabla 7. Parámetros para la simulación en los ensayos de jarras	76
Tabla 8. Resultados de la remoción de turbiedad de la mejor jarra de cada ensayo	77
Tabla 9. Comparación del comportamiento del pH con otros estudios	80
Tabla 10. Base de datos obtenida para la selección de la dosis óptima de polímero catiónico	81
Tabla 11. Resultados de la remoción de la turbiedad de la mejor jarra en cada ensayo con polímero	82
Tabla 12. Base de datos obtenida para la construcción de la curva de dosificación de PAC	82
Tabla 13. Resultados del ajuste de modelos de regresión para el primer criterio de análisis	86
Tabla 14. Resultados del ajuste de modelos de regresión para el segundo criterio de análisis	89
Tabla 15. Resultados del ajuste de modelos de regresión para el tercer criterio de análisis	92
Tabla 16. Significancia de los coeficientes de regresión para el mejor ajuste de cada criterio de análisis	92
Tabla 17. Resultados del análisis de significancia de coeficientes de regresión	94
Tabla 18. Resumen análisis de datos atípicos e influyentes	96
Tabla 19. Identificación de datos con eventualidades – criterio técnico	96
Tabla 20. Comparación de otros estudios en las dosis de PAC para distintos valores de turbiedad	99
Tabla 21. Ecuaciones de regresión para las curvas de dosificación de los criterios analizados	100
Tabla 22. Comparación de resultados con estudio de Calle & Zambrano (2015)	101
Tabla 23. Cantidad de PAC adquirido por la JAAPRB	102
Tabla 24. Cantidad de PAC estimado por el estudio en cuatro meses	103
Tabla 25. Resultados de modelación primera combinación de factores	104
Tabla 26. Resultados de modelación segunda combinación de factores	104
Tabla 27. Resultados de modelación tercera combinación de factores	105
Tabla 28. Resultados de modelación cuarta combinación de factores	105
Tabla 29. Resultados de modelación quinta combinación de factores	106
Tabla 30. Resultados de modelación sexta combinación de factores	106
Tabla 31. Resultados de modelación séptima combinación de factores	106
Tabla 32. Resultados de modelación octava combinación de factores	107
Tabla 33. Resultados de modelación novena combinación de factores	107
Tabla 34. Resultados de modelación décima combinación de factores	107

Tabla 35. Resultados de modelación décima primera combinación de factores	108
Tabla 36. Coeficientes codificados	109
Tabla 37. Análisis de varianza	109
Tabla 38. Diagnóstico de observaciones	110
Tabla 39. Resumen de corrida de modelos	110
Tabla 40. Coeficientes codificados del mejor modelo	111
Tabla 41. Análisis de varianza del mejor modelo	111
Tabla 42. Síntesis de estudios que aplican MSR parte 1	114
Tabla 43. Síntesis de estudios que aplican MSR parte 2	115
Tabla 44. Resultados de las pruebas estadísticas de normalidad del mejor modelo	117
Tabla 45. Datos recolectados para la validación del modelo	121
Tabla 46. Resultados de la aplicación del modelo con los datos recolectados en planta	122
Tabla 47. Resultados estadísticos de las pruebas de normalidad de los residuos de la validación del modelo.....	123
Tabla 48. Comparación entre el modelo calibrado y el modelo validado	124
Tabla 49. Resultados de la prueba de jarras para una turbiedad de 10.80 NTU	140
Tabla 50. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 293 NTU	140
Tabla 51. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 50 NTU	141
Tabla 52. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 350 NTU	141
Tabla 53. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 61.8 NTU	141
Tabla 54. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 131 NTU	142
Tabla 55. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad 13 NTU.....	142
Tabla 56. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 50.3 NTU	142
Tabla 57. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 111 NTU	143
Tabla 58. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad 46.1 NTU.....	143
Tabla 59. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 13.4	143
Tabla 60. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 11 NTU	144
Tabla 61. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 248 NTU	144
Tabla 62. Resultados de la prueba de jarras para una turbiedad de 204 NTU	144
Tabla 63. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 164 NTU	145
Tabla 64. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 4150 NTU	145
Tabla 65. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 685 NTU	145
Tabla 66. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 900 NTU	146
Tabla 67. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 47.1 NTU	146
Tabla 68. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 11.9 NTU	146
Tabla 69. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 144 NTU	147
Tabla 70. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 3520 NTU	147

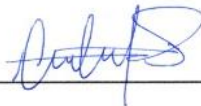
Tabla 71. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 617 NTU	147
Tabla 72. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 585 NTU	148
Tabla 73. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 8.16 NTU	148
Tabla 74. Velocidad de agitación y tiempos de retención empelados en cada ensayo de jarras realizado	156
Tabla 75. Resultado de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 31.7 NTU	157
Tabla 76. Resultado de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 164 NTU	157
Tabla 77. Resultado de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 248 NTU	158
Tabla 78. Resultado de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 4150 NTU	158
Tabla 79. Resultado de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 685 NTU	158
Tabla 80. Resultado de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 900 NTU	159
Tabla 81. Resultados de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 47.1 NTU	159
Tabla 82. Resultado de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 11.9 NTU	159
Tabla 83. Resultado de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 144 NTU	160
Tabla 84. Resultado de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 3520 NTU	160
Tabla 85. Base de datos empleada para crear el modelo matemático predictivo	161

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Mateo Roberto Patiño Ullauri en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación de la dosificación de policloruro de aluminio sobre el rendimiento de la coagulación – floculación en la planta potabilizadora de la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas", 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, 12 de septiembre de 2022



Mateo Roberto Patiño Ullauri

C.I: 0105812812

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Bryan Alexander Vallejo Chuchuca en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación de la dosificación de policloruro de aluminio sobre el rendimiento de la coagulación – floculación en la planta potabilizadora de la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas", 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, 12 de septiembre de 2022



Bryan Alexander Vallejo Chuchuca

C.I: 0106423064

Cláusula de Propiedad Intelectual

Mateo Roberto Patiño Ullauri autor del trabajo de titulación "Evaluación de la dosificación de policloruro de aluminio sobre el rendimiento de la coagulación – floculación en la planta potabilizadora de la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 12 de septiembre de 2022



Mateo Roberto Patiño Ullauri

C.I.: 0105812812

Cláusula de Propiedad Intelectual

Bryan Alexander Vallejo Chuchuca, autor del trabajo de titulación "Evaluación de la dosificación de policloruro de aluminio sobre el rendimiento de la coagulación – floculación en la planta potabilizadora de la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 12 de septiembre de 2022



Bryan Alexander Vallejo Chuchuca

C.I: 0106423064

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Pedro y Margarita y a mis hermanos Pedro, Rafaela y Juan, con quienes he compartido muchas experiencias y me han enseñado a nunca rendirme y seguir en la lucha. Agradezco haber sido impulsado día a día para lograr este objetivo y cumplir una de las metas añoradas hace muchos años, por lo que este logro no es solo mío sino también de mi familia. Así mismo, quiero dedicar este trabajo a mi madrina Antonieta y a mis primos Jorge y Carlos, personas que me han acogido en su vida y me han formado como la persona con carácter y decisión que hoy en día soy.

Dedico este trabajo a mis amigos de la universidad Bernarda, Janela, Kevin, Paula y Gabriela con quienes he aprendido el valor de la amistad y además me han enseñado a levantarme y me han ayudado en los momentos difíciles de todo este viaje. Sepan que les estimo mucho y siempre van a estar dentro de mi cabeza y corazón en todo momento.

Finalmente, este trabajo está dedicado a todas las personas que estuvieron presentes para la realización exitosa del mismo.

Mateo Roberto Patiño Ullauri

DEDICATORIA

Dedico mi trabajo de titulación especialmente a mis queridos padres, Carlos y Yolanda, ellos me han brindado todo su cariño y apoyo a lo largo de mi vida. Mi madre me ha inculcado todos aquellos valores que me hacen ser una mejor persona y ha sabido aconsejarme en todo momento; mi padre quien con su sabiduría y conocimiento me ha guiado durante toda mi formación académica.

A mi profesor de quinto grado de escuela, Lcdo. Humberto Bravo, quien me dio el impulso que necesitaba para superarme a mí mismo y saber que soy capaz de todo, además de brindarme sus sabios consejos que me ayudaron a seguir adelante y así cumplir mis metas.

A todos mis seres queridos que me han acompañado en distintas etapas de mi vida y me han brindado todo su apoyo y afecto guiándome por un buen camino.

Gracias a todos.

Bryan Alexander Vallejo Chuchuca

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todos nuestros familiares, personas y amigos que hemos conocido a lo largo de nuestra carrera, por apoyarnos en nuestro desarrollo personal y académico.

De manera especial, a nuestro tutor de tesis Ingeniero Fernando García por el apoyo dado durante todo el desarrollo del trabajo de titulación, así como su tiempo y dedicación para lograr culminar el trabajo con éxito, asociado a su conocimiento y sabiduría impartidos durante la carrera y la realización de la tesis.

A la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas, por su acogida para la realización de este trabajo, y de igual manera, a todo el personal de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Mahuarca, por el conocimiento, apoyo, experiencias y consejos brindados.

Finalmente, agradecemos a nuestra casa de estudios la Universidad de Cuenca, por habernos formado académica y personalmente, estableciéndonos como excelentes Ingenieros Ambientales y como personas con carácter y decisión para el servicio a la sociedad.

CAPITULO I

1. Introducción y objetivos

1.1. Introducción

1.1.1. Antecedentes

La PTAP dirigida por la JAAPRB usa policloruro de aluminio (PAC) como coagulante desde abril de 2020. Anteriormente esta planta usaba sulfato de aluminio (SA) como coagulante, tal como lo hacen la mayoría de las plantas potabilizadoras. Estudios recientes indican que el PAC tiene muchas ventajas sobre el SA, razón por la cual los dirigentes de la JAAPRB optaron por usarlo en la PTAP. Sin embargo, este cambio de tecnología ha conllevado a que los operadores de la PTAP no tengan la certeza de dosificación del PAC. Debido a que, antes de este cambio, los sistemas de dosificación estuvieron adecuados y calibrados para trabajar con SA y no con PAC.

Por tanto, la adición del PAC actualmente no se lo realiza con un criterio técnico de operación. Complementando el problema mencionado, no se cuenta con una curva de dosificación de PAC, para los distintos valores de turbiedad, provocando en algunos casos sobredosificaciones y en otras dosificaciones insuficientes ocasionando deficiencias en la calidad de agua potable.

1.1.2. Problemática

En la actualidad el bienestar de una comunidad depende de un acceso de agua seguro y saludable antes del consumo humano, por tanto, el recurso agua debe ser gestionado de forma integral y eficiente, satisfaciendo las necesidades de consumo de una población, asegurando el cumplimiento de requisitos de calidad expresados en normativas de carácter internacional y nacional, como lo estipulado en la Organización Mundial de la Salud y la Norma Técnica Ecuatoriana para el agua potable INEN 1108.

La potabilización de agua está compuesta de varios procesos, entre los cuáles se señala a la coagulación y floculación, como procesos claves para el resto del sistema de purificación de agua. A través de una correcta dosificación de coagulante y floculante se puede remover partículas que ocasionan deficiencia en la calidad del recurso agua para consumo humano. Las consecuencias de una incorrecta dosificación de químicos pueden afectar el sistema de tratamiento en general, traduciéndose principalmente en incumplimiento de parámetros de calidad y pérdidas económicas (Galindo, 2018).

Un déficit de dosificación afecta la producción de flóculos, haciéndolos muy inestables y pequeños, lo cual reduce la eficiencia de sedimentación, a su vez provoca una rápida colmatación del lecho filtrante, por la llegada de agua con una cantidad significativa de flocs (Andía, 2000). Según Romero (1999), el proceso de coagulación-floculación depende de tres partes claves: la primera es la selección del coagulante, la segunda la dosificación del químico y la tercera hace referencia al control de la eficiencia del proceso.

De manera complementaria a los problemas de una mala dosificación del coagulante, cuando los sólidos suspendidos no han sido removidos, estos pueden actuar como una barrera protectora del desinfectante para los microorganismos presentes en el agua, además reduce la concentración de residuales de cloro necesarias en las redes de distribución (Romero, 2009).

1.1.3. Justificación

El proceso de coagulación-floculación representa un punto importante del sistema de tratamiento, el cual debe ser controlado con mayor atención, debido a que, aparte de la remoción de parámetros como la turbiedad y el color del agua, también ayuda a la eliminación de organismos patógenos que pueden afectar la calidad del recurso (Chulluncuy, 2011). Por lo antes mencionado, fue necesario realizar un estudio que permita determinar la dosis óptima del PAC.

El desarrollo de este trabajo permitió determinar las dosis óptimas de PAC en conjunto con un ayudante de floculación, mejorando el sistema de potabilización de agua, asegurando el cumplimiento de los parámetros de calidad y reduciendo los costos por la adquisición de químico. Adicionalmente, en este estudio se ajustó un modelo de regresión para el establecimiento de una curva de dosificación óptima, así como una modelación de la turbiedad final en función de varios parámetros del agua que ingresa al sistema de potabilización y la dosis aplicada.

Los resultados del estudio ayudarán a los operarios de la planta para una dosificación correcta de PAC, evitando que dicha dosificación siga realizándose bajo criterios empíricos de operación, otorgando un mayor rendimiento del sistema y muchos beneficios a la PTAP. De manera análoga, el desarrollo de los modelos de dosificación (curva de PAC) y predicción de la turbiedad residual puede representar una herramienta para futuras investigaciones y mejoras de sistemas de potabilización.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar la dosificación de Policloruro de Aluminio sobre el rendimiento de la coagulación-floculación en la Planta Potabilizadora de la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas.

1.2.2. Objetivos específicos

Realizar pruebas de jarras usando Policloruro de Aluminio para la remoción de la turbiedad del agua cruda usada para la potabilización en la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas.

Elaborar una curva de dosificación de Policloruro de Aluminio con los resultados de las pruebas de jarras.

Evaluar la eficiencia del proceso de coagulación-floculación aplicando la metodología de superficie de respuesta.

CATIPULO II

2. Marco Teórico

2.1. Tipos de agua

La calidad del agua representa un indicativo del estado del agua en función de las necesidades de una o más especies bióticas y/o con cualquier necesidad humana. De acuerdo a la naturaleza del agua existen dos categorías importantes: agua cruda y agua tratada (Hassan, 2020).

2.1.1. Agua cruda

El agua cruda o agua bruta es aquella que se encuentra directamente en el ambiente como una fuente o reserva de líquido en estado natural. Este tipo de agua no posee ningún tipo de tratamiento o modificación en su estado natural por lo cual contiene una serie de microorganismos patógenos, productos químicos o cualquier otra sustancia contaminante que pueda representar un riesgo para la salud humana (Sierra, 2011). Para garantizar que el agua cruda sea apta para el consumo se somete a un proceso de potabilización que ayuda a eliminar todos aquellos microorganismos dañinos presentes en el agua volviéndola potable.

2.1.2. Agua potable

El agua potable o agua tratada es aquella que se considera sanitariamente segura, agradable en su sabor y color, libre de cualquier sustancia química contaminante como bacterias o virus haciéndola estéticamente aceptable y apta para consumo (OMS, 2011). Potabilizar el agua significa someter agua cruda a una serie de procesos físicos y químicos para eliminar materia orgánica y contaminantes biológicos que pueden existir en el agua y representen un riesgo potencial en la salud humana.

2.2. Parámetros de calidad del agua

La calidad del agua tratada depende del uso que se le quiera asignar, para conocer si el agua es apta para el consumo o está contaminada es necesario controlar ciertos parámetros de calidad divididos en tres clasificaciones: físicos, químicos y microbiológicos (Sierra, 2011).

2.2.1. Parámetros físicos

Los parámetros físicos tienen incidencia directa sobre las condiciones estéticas del agua. Su importancia radica en que el líquido debe ser agradable para los consumidores sin causar molestias o perjuicios asegurando su consumo.

2.2.1.1. Turbiedad

La turbiedad es una propiedad óptica del agua que representa el grado de transparencia o claridad que posee dicho líquido, la cual surge por la dispersión de los rayos lumínicos que pasan a través del mismo (Romero, 2009). Esta propiedad es causada por la presencia de partículas suspendidas (dispersiones coloidales, arcilla, limo, materia orgánica e inorgánica) en el agua que reducen la claridad, mientras mayor cantidad de sólidos en suspensión existan mayor será el grado de turbidez

presente en el agua. La turbidez se expresa en unidades nefelométricas de turbiedad (NTU) y representa un parámetro importante en el tratamiento de agua potable (Crittenden et al., 2012).

2.2.1.2. Color

El color es un parámetro organoléptico del agua que indica la calidad y el estado del recurso. El color también es considerado un indicador de contaminantes como el contenido de materia orgánica (incluyendo los ácidos húmicos y fúlvicos), la existencia de iones metálicos (especialmente de hierro y manganeso) y la turbidez presente en el agua (Crittenden et al., 2012). Existen dos tipos de color reconocibles en el agua: el color verdadero es aquel que permanece en el agua después de haber sido removida la turbiedad y el color aparente es causado por la presencia de partículas disueltas y en suspensión del líquido. El color también se considera un parámetro importante dentro del tratamiento del agua potable debido a que la estética del agua induce la aceptación o el rechazo de los consumidores al momento de consumirla, en general el agua debe presentar un color transparente que indica que el líquido no posee ningún tipo de partícula insoluble en suspensión. El color se expresa en unidades de color Platino-Cobalto (Pt-Co) (Sierra, 2011).

2.2.1.3. Olor y sabor

Los olores y sabores son características organolépticas del agua que están estrechamente ligados entre sí y en general indistinguibles en el líquido. Tanto el olor como el sabor del agua pueden indicar una posible contaminación del mismo a causa de cualquier sustancia química procedente de fuerzas naturales o acciones antropogénicas sobre el medio. Estos parámetros son sumamente útiles para evaluar la calidad del agua garantizando el consumo de la misma, normalmente el agua potable es inodora y además debe presentar un sabor débil y agradable hacia el consumidor evitando causar molestias o rechazo al momento de beberla (Romero, 2009).

2.2.1.4. Temperatura

La temperatura es un parámetro físico importante de controlar en el agua dado que influye en muchos otros parámetros como son: la viscosidad, la densidad, la solubilidad, la tensión superficial y las tasas de actividad química y biológica del agua. Por otro lado, también impacta en el diseño de los procesos de potabilización del agua (mezcla, coagulación-floculación, filtración y sedimentación). La temperatura representa la energía cinética interna de las moléculas del agua que indican sensaciones de calor o frío del mismo (Crittenden et al., 2012).

2.2.1.5. Sólidos

Los sólidos representan las partículas disueltas y en suspensión existentes en el agua que afectan negativamente la calidad del recurso, por ende, es necesario cuantificar la cantidad de material sólido presente en el líquido (Sierra, 2011). Dentro de los sólidos existen diferentes tipos o clases que intervienen en la evaluación de la calidad del agua como son:

- Sólidos totales (ST): representa la cantidad de material disuelto y no disuelto del líquido
- Sólidos disueltos (SD): hace referencia a la cantidad de materia diluida en el agua
- Sólidos suspendidos (SS): aquel material que no se filtra o no disuelve en el líquido
- Sólidos sedimentables: se define como todo material que deja sedimentos o residuos en el agua por acción de la gravedad. La determinación de los sólidos sedimentables es esencial para el diseño de tanques sedimentadores en la potabilización del agua.

2.2.1.6. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la capacidad que tiene el agua para transportar o conducir corriente eléctrica a través de iones disueltos, mientras mayor sea la concentración de iones mayor será la conductividad. Este parámetro representa un indicativo de sales y iones (elementos químicos) presentes en el agua y además de forma indirecta muestra el contenido de sólidos disueltos. La conductividad se expresa en unidades de micro Siemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) (Comisión Nacional del Agua, 2016).

2.2.1.7. pH

El pH representa la concentración de iones de hidrógeno que indica el grado de acidez o alcalinidad de una solución. Este parámetro es importante dentro del proceso de potabilización de agua debido a que influye de manera directa en la concentración de dosis de productos químicos empleados para coagular partículas y reducir la dureza del agua (Crittenden et al., 2012). Para el agua potable se recomienda que el valor del pH oscile entre 6.5 a 8.5 debido a que aguas demasiado ácidas llegan a disolver componentes metálicos que al ser ingeridos afectan a la salud y por el contrario aguas muy alcalinas en consumo excesivo causan problemas al metabolismo humano (Pérez, 2015).

2.2.2. Parámetros químicos

Los parámetros químicos están relacionados con la capacidad del agua para disolver distintas sustancias. Cuando existe desequilibrio de los elementos químicos pueden alterar la calidad del recurso limitando su uso y consumo humano. Dichos parámetros son: alcalinidad, dureza, sulfatos, fosfatos, cloruros, nitritos, nitratos, hierro, manganeso y metales pesados.

2.2.3. Parámetros microbiológicos

Los parámetros microbiológicos son indicativos de contaminación orgánica y biológica a consecuencia de actividades antropogénicas o naturales. El agua cruda contiene diferentes microorganismos que pueden ser patógenos o no patógenos representando un riesgo potencial en su consumo (Sierra, 2011). Los parámetros más importantes de esta clasificación son: coliformes fecales y totales, *cryptosporidium* y *giardia*.

2.2.4. Normativa INEN 1108

A nivel nacional, el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) ha formulado la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108:2020, la cual establece los requisitos que debe cumplir el agua potable con el fin de garantizar su consumo y evitar riesgos a la salud humana y el medio ambiente. La NTE INEN 1108:2020 indica que el agua potable debe cumplir con requisitos físicos, químicos y microbiológicos (Anexo 1). Esta normativa se aplica al agua proveniente de sistemas de abastecimiento, suministrada a través de sistemas de distribución (INEN, 2020).

2.3. Procesos de potabilización convencional del agua

Una planta de potabilización de agua convencional, hace uso de una serie de procesos unitarios apropiados para cumplir con necesidades de tratamiento específicas. Los procesos de una potabilización convencional incluyen coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección (Romero, 1999; Vargas, 2004).

2.3.1. Coagulación

La coagulación es un proceso para combinar pequeñas partículas en agregados más grandes llamados flóculos, y para adsorber materia orgánica disuelta en agregados de partículas para que estas impurezas puedan eliminarse en procesos posteriores de separación sólido-líquido (Jiang, 2015). Generalmente, el término coagulación hace referencia a la “desestabilización” de partículas suspendidas, es decir, anular las fuerzas de repulsión entre estas partículas, con la finalidad de aglomerar las mismas (Arboleda, 2000).

2.3.2. Floculación

La floculación es un proceso unitario que promueve colisiones entre partículas que se unen entre sí al contacto, aumentando de tamaño para aumentar la velocidad de sedimentación. El principio básico de funcionamiento de este proceso, son los contactos inducidos por transporte de gradientes de velocidad, inducidos por flujo laminar o turbulencia, y movimiento browniano, o una secuencia de los dos. Si el tratamiento posterior es la sedimentación y filtración convencional, entonces el objetivo de la floculación es producir grandes flóculos sedimentables (Hendricks, 2011).

2.3.3. Sedimentación de alta tasa

La sedimentación remueve las partículas formadas del proceso de coagulación-floculación, mediante la fuerza de gravedad, dado que la densidad de las partículas excede la densidad del agua. La sedimentación laminar o sedimentación de alta tasa hace uso de configuraciones o dispositivos adicionales que aumentan la superficie efectiva disponible en el sedimentador, los equipos más usados comúnmente corresponden a sedimentadores laminares de placas paralelas inclinadas y sedimentadores tubulares (Hendricks, 2011).

2.3.4. Filtración rápida

Este proceso es posterior a los procesos antes indicados, pues en general con la coagulación-floculación y sedimentación se logra remover cerca del 90% de turbiedad y color, con lo que la filtración permite retirar los sólidos suspendidos no removidos en las etapas anteriores. Generalmente este proceso utiliza filtros con medios porosos como la arena o antracita, y en algunas plantas de potabilización se usan prefiltros de grava (Romero, 1999).

2.3.5. Desinfección

El término desinfección se refiere a la inactivación de microorganismos, generalmente se engloban a los virus (Adenovirus, Hepatitis A, Rotavirus, etc.), bacterias (*Escherichia coli*, *Salmonella serovars*, *Shigella typhi*, *Vibrio cholerae*, etc.) y protozoos (*Cryptosporidium parvum*, *Giardia lamblia*, etc.) que causan enfermedades transmitidas por el agua. Existe una gran variedad de desinfectantes para asegurar el consumo del agua, los más comunes suelen ser cloro (en distintas especies químicas), ozono, dióxido de cloro, yodo, bromo y radiación ultravioleta, así mismo los desinfectantes que producen un residuo necesario en las redes de distribución de agua potable, incluyen cloro, dióxido de cloro y cloraminas (Hendricks, 2011; Wang et al., 2005).

2.4. Teoría de coagulación

El uso tradicional de la coagulación ha sido principalmente para eliminar la turbidez del agua potable. Sin embargo, más recientemente, se ha demostrado que la coagulación es un proceso eficaz para la eliminación de muchos otros contaminantes que pueden ser adsorbidos por coloides como metales, materia orgánica tóxica, virus y radionúclidos. La coagulación se logra mediante la adición de coagulantes inorgánicos, como sales a base de aluminio o hierro, y/o polímeros orgánicos sintéticos comúnmente conocidos como polielectrolitos. Así mismo, en este proceso se suele adicionar ayudantes de coagulación, conocidos como floculantes, para ayudar en la desestabilización y aglomeración de material particulado difícil y lento para sedimentar (Wang et al., 2005).

2.4.1. Coloides

Los coloides son partículas muy pequeñas que tienen un área superficial extremadamente grande, además estas partículas son más grandes que los átomos y los iones, pero son lo suficientemente pequeñas como para que no sea visibles a simple vista. El tamaño varía de 0.001 a 10 μm , por lo tanto, se obtiene una relación masa a área muy pequeña. Debido a su enorme superficie, las partículas coloidales tienen la tendencia de adsorber varios iones del medio circundante que imparten a los coloides una carga electrostática en relación con la mayor parte del agua circundante (Wang et al., 2005).

2.4.1.1. Doble capa eléctrica

Las partículas coloidales que se encuentran en el agua están rodeadas por fuerzas electrostáticas, y forman una doble capa eléctrica, misma que tiene interacción con el agua. El potencial total en la superficie de la partícula primaria cargada se denomina potencial de Nernst. La densa capa de contraiones fijados en la superficie de la partícula primaria se denomina capa de Stern (Figura 1). El límite exterior de esta capa está definido por la superficie de cizallamiento que separa la porción móvil del coloide de la mezcla circundante de iones difusos (Wang et al., 2005).

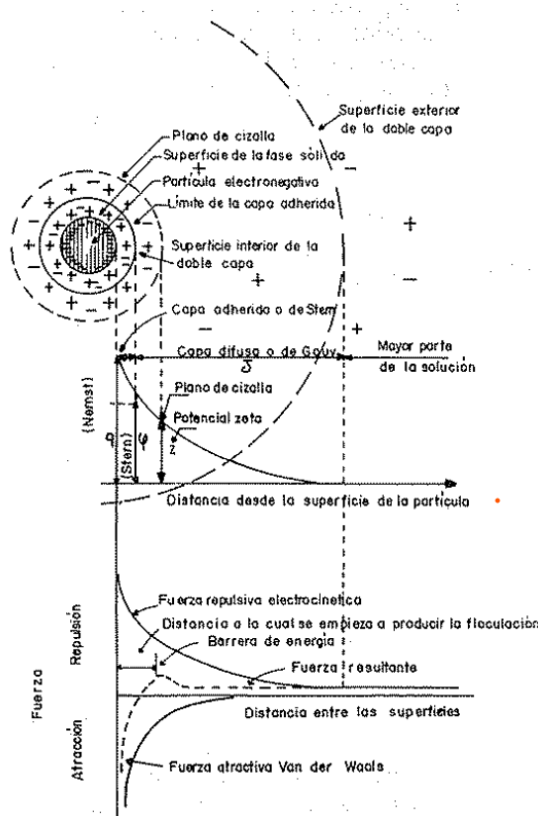


Figura 1. Doble capa eléctrica
Fuente: (Arboleda, 2000)

2.4.1.2. Potencial zeta

Los contraiones concentrados dentro de la superficie de cizallamiento reducen la carga neta de la partícula en una cantidad que generalmente se denomina potencial de Stern. En consecuencia, el potencial es máximo en la superficie de la partícula primaria, el potencial de Nernst, que disminuye rápidamente por medio de la capa de Stern dando como resultado una carga total neta sobre la partícula en la superficie de cizallamiento denominada potencial Zeta. Este potencial determina el grado de repulsión entre partículas cargadas de manera similar y comúnmente se considera que es la principal causa de la estabilidad de un sistema coloidal (Wang et al., 2005).

2.4.1.3. Movimiento browniano

Naturalmente los coloides se rigen por un movimiento browniano debido al bombardeo continuo de las moléculas del agua en el medio de dispersión. Es el movimiento aleatorio que se observa en las partículas que hay en el agua como resultado del choque contra las moléculas del fluido (Wang et al., 2005).

2.4.2. Estabilidad coloidal

La estabilidad de un coloide depende de la doble capa eléctrica, debido a la suma de las fuerzas de atracción de Van der Waals con las fuerzas de repulsión electrostática (Hendricks, 2011). Es decir que para desestabilizar este sistema es necesario comprimir la misma. Esta desestabilización puede realizarse por neutralización de la carga superficial neta de las partículas en suspensión, por lo que a medida que se reduce la carga superficial neta se minimiza la energía requerida para poner las partículas en contacto (American Water Works Association, 2011).

2.4.2.1. Fuerza de atracción de Van der Waals

Las fuerzas de Van der Waals se originan a partir de la resonancia magnética y electrónica que se produce cuando dos partículas se acercan entre sí. Esta resonancia es causada en los átomos en la superficie de la partícula, que desarrollan una fuerte fuerza de atracción entre las partículas cuando estos electrones se orientan de tal forma que inducen campos eléctricos y magnéticos sinérgicos. Estas fuerzas de atracción son lo suficientemente fuertes para superar la repulsión electrostática, pero no pueden hacerlo porque dichas fuerzas y la doble capa eléctrica se extienden más en el agua que las fuerzas de Van der Waals (Crittenden et al., 2012).

2.4.2.2. Fuerzas de repulsión electroestáticas

Debido a que generalmente los coloides tienen carga negativa en su mayoría o positiva en algunas ocasiones, esto provoca que exista una repulsión entre estas partículas por fuerzas de no atracción al tener la misma carga eléctrica. Las fuerzas de repulsión electrostáticas sobrepasan normalmente a las fuerzas de atracción de Van der Waals, provocando que las partículas no se aglomeren y así no puedan ser removidas de la fase acuosa (Acosta, 2006).

2.4.3. Mecanismos de coagulación

Los mecanismos de coagulación hacen referencia al proceso de desestabilización de los coloides, en donde las partículas se modifican para aumentar su tendencia a adherirse entre sí, teniendo en cuenta que las mismas se encuentran en una suspensión estable (American Water Works Association, 2011). En la actualidad se discurren en los siguientes mecanismos de coagulación.

2.4.3.1. Compresión de la doble capa eléctrica

Para comprimir la doble capa se debe usar un electrolito simple, este compuesto otorga a la partícula iones de signo contrario a la carga neta superficial de la partícula coloidal que entran en la capa difusa

(capa de Gouy-Chapman) que rodea la partícula, y al agregarse suficientes contraiones la capa difusa se comprime por la alteración de la configuración de la curvatura (Figura 2) de los potenciales coulómicos (Arboleda, 2000), reduciendo la energía necesaria para provocar un contacto estrecho entre las partículas (American Water Works Association, 2011).

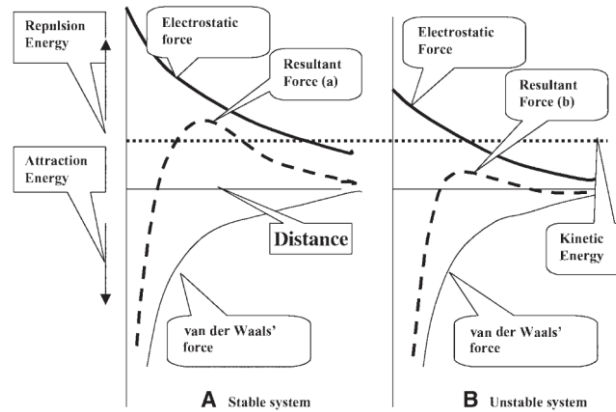


Figura 2. Compresión de la doble capa eléctrica
Fuente: (Wang et al., 2005)

2.4.3.2. Adsorción electrostática o coagulación por neutralización

La carga de las partículas se neutraliza y la repulsión electrostática disminuye o se elimina, lo que da como resultado la desestabilización de los coloides y, por lo tanto, su aglomeración (Wang et al., 2005). Existen dos procesos de neutralización, en el primero los coagulantes polielectrolitos orgánicos sintéticos y naturales, así como sales metálicas que llevan una carga de signo opuesto a la carga neta en la superficie se adsorben (por la mala interacción entre el disolvente y coagulante y la afinidad del mismo por la superficie de las partículas coloidales) en la superficie de la partícula (Figura 3); el segundo proceso corresponde a un ajuste químico con materiales húmicos para reducir la carga positiva y desestabilizar la suspensión (American Water Works Association, 2011).

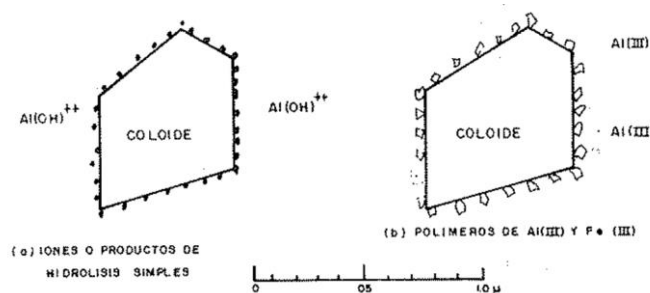


Figura 3. Iones de carga diferente adsorbidos en un coloide
Fuente: (Arboleda, 2000)

2.4.3.3. Adsorción y puente químico

Los polímeros tienen grupos reactivos que se unen a sitios específicos en la zona superficial de las partículas coloidales que las desestabilizan mediante la conformación de puentes químicos que se

extienden entre ellas. Cuando un grupo de una molécula de polímero se une a un coloide (Figura 4), el resto de la molécula de cadena larga se extiende hacia el agua, y cuando el polímero se une a otra partícula coloidal las dos partículas quedan unidas por el polímero (Wang et al., 2005). La molécula de polímero debe ser lo suficientemente larga para extenderse más allá de la doble capa eléctrica y la partícula coloidal que se adhiere debe tener superficie disponible (American Water Works Association, 2011).

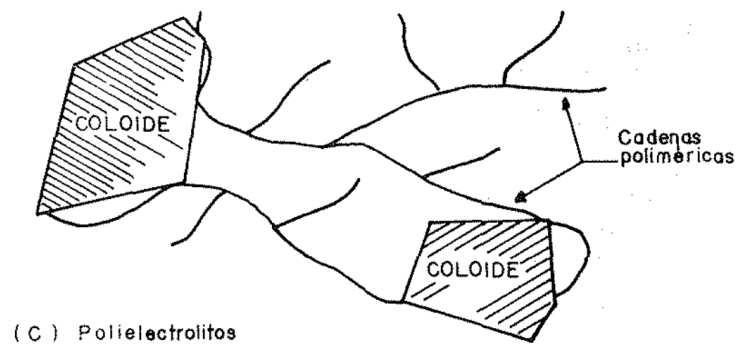


Figura 4. Polímeros adsorbidos en una partícula coloidal
Fuente: (Arboleda, 2000)

2.4.3.4. Coagulación por barrido

También conocida como coagulación por incorporación, se da cuando se dosifica concentraciones elevadas de coagulantes, para precipitar los hidróxidos (formados por reacción entre la alcalinidad y coagulantes), que al sedimentarse atrapan a las partículas coloidales y las fuerzan a ser decantadas. Este tipo de coagulación se puede realizar al mismo tiempo o al inicio del proceso, por mecanismos de coagulación por puente químico y neutralización respectivamente (Arboleda, 2000). En la reacción ($\text{coloide}^- + \text{Al}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{coloide} \cdot [\text{Al}(\text{OH})_3]$), el precipitado de $\text{Al}(\text{OH})_3$ cargado positivamente entra en contacto con los coloides cargados negativamente a través de contactos aleatorios, lo que da como resultado la unión y el enredamiento de las partículas (Hendricks, 2011).

2.4.4. Parámetros influyentes en la coagulación

2.4.4.1. Temperatura

La baja temperatura del agua provoca una baja eficiencia de eliminación de la turbidez y una mala calidad del efluente (Jin, 2005). Cuando la temperatura del agua varía 1°C la coagulación toma más tiempo, debido a que varía la densidad del agua y afecta al movimiento de las partículas coloidales (Andía, 2000)

2.4.4.2. pH

El pH influye de manera directa en la formación de flóculos, debido a que perturba la solubilidad de los precipitados formados por coagulantes a base de hierro o aluminio, además cambia el tiempo de formación de flocs. Generalmente el pH óptimo para la coagulación y remoción de turbiedad está

entre 5.0 y 6.5 (Romero, 2009). Cuando la coagulación se efectúa en rangos de pH fuera del óptimo, es necesario elevar la dosis del coagulante utilizado (Andía, 2000).

2.4.4.3. Alcalinidad, conductividad eléctrica y sales disueltas

Estos factores tienen una influencia directa en todo el proceso de coagulación, ya que pueden alterar los rangos de pH óptimos y por ende la cantidad de coagulantes, así como perturbar las concentraciones que existen en el efluente de una planta de potabilización (Andía, 2000).

2.4.4.4. Concentración coloidal

La concentración coloidal tiene un gran impacto tanto en la dosis requerida como en la eficiencia del proceso de coagulación en sí. La dosificación de coagulantes requerida para la desestabilización de una dispersión coloidal está estequiométricamente relacionada con la cantidad de partículas coloidales presentes en la solución. Sin embargo, para los sistemas coloidales diluidos, la tasa de coagulación es muy lenta debido a la pequeña cantidad de coloides en suspensión y, por lo tanto, no hay suficiente contacto disponible entre las partículas (Wang et al., 2005)

2.4.4.5. Color

Un agua que presente color puede ser ácida, blanda y puede tener una baja concentración de sustancias que provocan alcalinidad. El rango de pH óptimo para remover color no es el mismo que para remover turbiedad (Wang et al., 2005).

2.4.4.6. Turbiedad

Según la turbiedad que se encuentre en el influente a tratar por procesos de coagulación se debe añadir diferentes dosis de coagulante, misma que permite obtener la mejor turbiedad residual (Andía, 2000). Así mismo, cuando la turbiedad es baja el proceso de coagulación no se realiza efectivamente, y se deben añadir dosis tanto altas como bajas para tratar el agua (Andía, 2000).

2.4.5. Coagulantes

Los coagulantes son compuestos químicos con la capacidad de desestabilizar las partículas coloidales y formar flóculos para ser removidos del agua (Romero, 2009). Los coagulantes se dividen en dos agrupaciones principales, la primera son los coagulantes metálicos a base de hierro y aluminio, los segundos son los ayudantes de floculación conocidos como polielectrolitos (Arboleda, 2000; Romero, 2009).

2.4.5.1. Coagulantes convencionales

Los coagulantes sintéticos más utilizados para el tratamiento de aguas son los coagulantes metálicos de aluminio, hierro y compuestos diferentes (Arboleda, 2000). Así mismo, los compuestos más usados son el cloruro poliférrico, cloruro férrico, sulfato férrico, sulfato de aluminio, sulfato de aluminio amoniacal, sulfato ferroso, aluminato de sodio, cloruro polialumínico (Arboleda, 2000; Romero, 2009).

a. Sulfato de aluminio

Es uno de los coagulantes más empleados para tratamientos de agua, su fórmula química es $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ con una masa molar de 594.36392 g/mol, viene empacado en polvo, molido, terrones (terrones duros cuando esta almacenado) y en granos (Arboleda, 2000; Romero, 2009). Este compuesto puede unirse con partículas coloidales de carga negativa para neutralizar la misma y disminuir potencial zeta a fin de provocar contactos con otras partículas coloidales (Figura 5).

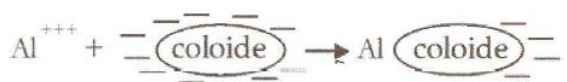


Figura 5. Combinación de Aluminio cargado positivamente con una partícula coloidal de carga negativa
Fuente: (Romero, 2009)

El Al^{3+} también reacciona con los iones OH^- y forma hidróxido de aluminio y a su vez adsorbe iones positivos que neutralizan las cargas coloidales negativas (Figura 6), mediante las siguientes reacciones:

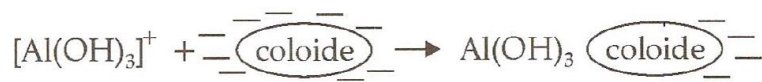
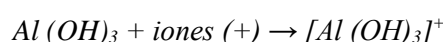
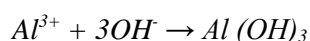


Figura 6. Combinación de Hidróxido de Aluminio (+) con una partícula coloidal negativa
Fuente: (Romero, 2009)

2.4.5.2. Coagulantes alternativos

Uno de los coagulantes que se están implementando en la actualidad es el uso de las especies químicas del Policloruro de Aluminio ($Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$), debido a que tiene muchas ventajas respecto al sulfato de aluminio; forma flóculos con estructuras de esferas pequeñas con estructuras de cadena menores a 25 μm , produciendo una menor turbiedad residual en la matriz acuosa, así mismo requiere menores dosificaciones. La temperatura del agua tiene menores efectos debido a la presencia de formas de aluminio prepolimerizados, el rango de pH es más grande que el rango de pH del sulfato de aluminio y oscila entre 4 a 8 (Torra et al., 1998), se generan menos lodos, casi no se necesitan ayudantes como polielectrolitos, y en general la cinética de formación de flóculos es más rápida (Arboleda, 2000; Cogollo, 2011). Sin embargo una de sus desventajas incurre en los costos de adquisición del producto (Arboleda, 2000).

2.4.5.3. Dosis óptima de coagulante

En general la dosis óptima de coagulante se determina mediante ensayos de laboratorio conocidos como pruebas de jarra o jar test (Hendricks, 2011).

2.4.6. Mezcla rápida

Proceso por el cual se aumenta la probabilidad de colisiones entre partículas coloidales para la formación de flóculos, es un proceso que funciona al mismo tiempo que la coagulación (Romero, 2009). Este proceso también tiene la finalidad de dispersar los productos químicos de forma rápida, uniforme y completa, además es deseable porque la producción de especies coagulantes efectivas depende en gran medida de poder lograr una dispersión uniforme de los productos químicos agregados, las tasas de formación de monohidroxicomplejos y otros polímeros hidroximetálicos son muy rápidas y la tasa de adsorción de los diversos productos coagulantes también es muy rápida (Wang et al., 2005).

2.4.6.1. Parámetros operacionales

Dependiendo del tipo de coagulación que se emplee en la planta de tratamiento los parámetros operacionales cambiarán en su magnitud total, teniendo en cuenta la intensidad de mezcla o agitación, gradiente de velocidad y tiempo de agitación (Vargas, 2004).

a. Intensidad de mezcla o agitación

Este es el parámetro operacional que debe ser controlado, pues el mismo representa la energía o trabajo impartida al agua cruda que se desea tratar con el fin de que el producto químico coagulante se distribuya uniformemente a través del medio líquido; esto permite además generar más interacciones entre el producto químico y las partículas coloidales (Vargas, 2004).

b. Tiempo de mezcla

Los tiempos de mezcla prolongados no son justificables debido a que las reacciones entre las partículas coloidales y los productos químicos coagulantes se completan generalmente en menos de 1 segundo (Wang et al., 2005).

c. Gradiente de velocidad

En el año 1943 los autores Camp y Stein definieron al gradiente de velocidad como la raíz cuadrada de la relación entre la pérdida de potencia por unidad de volumen y viscosidad del fluido (Mhaisalkar et al., 1986). Si la coagulación es por adsorción electrostática/neutralización, entonces es necesario que el producto coagulante se disperse completamente antes que los iones de hierro o aluminio reaccionen con el agua por medio de la hidrólisis, por lo tanto si la unidad de mezcla rápida que se emplee, no produce un gradiente de velocidad apropiado en un tiempo de mezcla instantáneo, no se desestabilizarán las partículas coloidales completamente (Vargas, 2004).

2.4.6.2. Dosificación del coagulante

La importancia de la dosificación del coagulante utilizado radica en que, deben dosificarse y/o añadirse con una solución diluida en agua, es decir una solución verdadera, ya que si se los añade en su forma sólida (polvo), la efectividad se reduce considerablemente y se traduce en despilfarro de los

productos químicos (Arboleda, 2000). Así mismo, la eficiencia de la potabilización depende también de una dosificación exacta u óptima, pues dosis altas de coagulante pueden ocasionar enturbiamiento de agua y dosis muy bajas no remueven la turbiedad, al no formar flóculos suficientes (Romero, 2009).

2.4.6.3. Mezcladores

En la práctica, se encuentran varias formas de diseño de mezcladores rápidos, tal como reactores de mezcla inversa, mezcla instantánea, deflectores, codos, entre otros (Hendricks, 2011). Existen dos grupos principales para realizar la mezcla rápida que corresponden a mezcladores mecánicos y mezcladores hidráulicos (Tabla 1). Los mezcladores mecánicos generan turbulencia para la agitación de fuentes de energía externa y los mezcladores hidráulicos obtienen la energía para la agitación de la potencia disipada en la unidad de mezcla que depende de la pérdida de carga y el caudal (Vargas, 2004).

Tabla 1. Mezcladores Mecánicos y Mezcladores Hidráulicos
Fuente: (Vargas, 2004)

Mecánicas	Retromezclador en línea		
Hidráulicos	Resalto Hidráulico	Canaleta Parshall	
		Canal de fondo inclinado	
		Vertedero rectangular	
	En línea	Difusores	En tuberías En canales
		Inyectores	
		Estáticos	
	Caídas	Orificios	
		Vertederos triangulares	
	Contracciones	Medidor Venturi	
		Reducciones	
		Orificios ahogados	
	Velocidad o cambio de flujo	Línea de bombeo	
		Codos	

2.5. Teoría de la floculación

El propósito del proceso de floculación es la optimización de la tasa de contacto entre las partículas desestabilizadas, elevando su tasa de colisión y ayudando en la unión y agregación de partículas en flóculos más grandes y densos. De esa manera, este proceso permite que las partículas coloidales se unan y formen flocs grandes que son más fáciles de separar por otros procesos como la sedimentación y la filtración (American Water Works Association, 2011). La teoría de la floculación se ha desarrollado a través de dos consideraciones importantes: 1) las partículas pequeñas experimentan un movimiento browniano aleatorio (colisión partícula – partícula) y 2) el movimiento del agua crea gradientes de velocidad que provocan colisiones de partículas (Crittenden et al., 2012).

En la Figura 7 se muestra un esquema que indica los procesos que controlan la tasa de agregación de partículas a lo largo del proceso de coagulación-floculación.

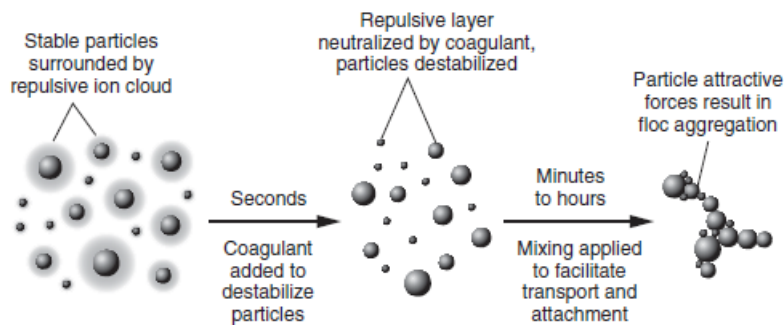


Figura 7. Progresión del proceso de agregación de partículas
Fuente: (Crittenden et al., 2012)

2.5.1. Mezcla Lenta

Una vez producida la dispersión de coagulantes se debe realizar una agitación a velocidades bajas (lenta) en el agua que ayude al crecimiento de flocs. El crecimiento es influenciado por el contacto entre partículas (mayor a 1 μm) originado por el gradiente de velocidad del fluido. El propósito de la aglutinación de partículas (mezcla lenta) es reunir la mayor cantidad de microflóculos formando partículas grandes superando el peso del agua y produciendo una concentración volumétrica baja que aumente la eficiencia de procesos posteriores como la sedimentación o filtración (Rodríguez, 2008).

2.5.2. Mecanismos de floculación

El funcionamiento del proceso de floculación depende de las características de las partículas, así como de las condiciones de mezcla del fluido (agua). La adición de un coagulante en el agua ocasiona que las partículas pequeñas se desestabilicen y comiencen a flocular (Crittenden et al., 2012). En la actualidad se distinguen los siguientes mecanismos de floculación.

2.5.2.1. Pericinética

La Pericinética o floculación a microescala se origina por colisiones inducidas por el movimiento browniano donde la velocidad de floculación de partículas pequeñas (menor de 0.1 μm) es relativa a la velocidad de partículas que se dispersan entre sí. Conforme aumenta la agregación de partículas pequeñas se forman partículas más grandes en lapsos de tiempo corto hasta llegar a formar microflóculos que varían en su tamaño desde 1 a 100 μm (Crittenden et al., 2012).

2.5.2.2. Ortocinética

La Ortocinética o floculación a macro escala es causado por colisiones inducidas por turbulencia donde el movimiento (mecánico o hidráulico) del fluido altera los gradientes de velocidad que provocan choques entre partículas suspendidas (mayor a 0.1 μm) (Hendricks, 2011). Durante el proceso de mezclado en la floculación a macro escala, los flóculos están sujetos a fuerzas de

cizallamiento, lo que ocasiona la ruptura de los flocs. Después del mezclado surge una distribución de flocs (de acuerdo al tamaño) de estado estacionario, aunque esta distribución depende de la hidrodinámica del sistema de tratamiento y de las interacciones químicas entre coagulante – partículas (Crittenden et al., 2012).

2.5.2.3. Asentamiento diferencial

Otra forma de floculación se debe a la sedimentación o asentamiento a distintas velocidades, donde las partículas grandes que se depositan en un recipiente inactivo superan a las partículas pequeñas para formar partículas más grandes. A medida que se forman partículas grandes se comienzan a asentarse en el fondo del recipiente a causa de las fuerzas gravitatorias (J. Howe et al., 2012). Por otra parte, la diferencia de velocidades provoca que las partículas con características diferentes (tamaño, densidad) choquen y floculen en el agua. El asentamiento diferencial ocurre principalmente en suspensiones heterogéneas con partículas de distintos tamaños (Crittenden et al., 2012).

2.5.3. Parámetros influyentes en la floculación

2.5.3.1. Gradiente de velocidad

El gradiente de velocidad es un parámetro dependiente de la tasa de aglomeración de partículas, es decir, al aumentar el gradiente se puede lograr una tasa de aglomeración más rápida. Por otra parte, a mayor tamaño de flóculos más grandes serán las fuerzas de cizallamiento hidrodinámico inducidas por el gradiente. Si la tasa de aglomeración de partículas es demasiado alta puede ocasionar el rompimiento de los flóculos disminuyendo la eficiencia del tratamiento de agua. Los gradientes de velocidad recomendados para el proceso de floculación van de 100 hasta 10 s^{-1} (Vargas, 2004).

2.5.3.2. Tiempo de retención

La tasa de aglomeración de partículas está estrechamente relacionada con el tiempo de retención (lapso que permanece el agua en las unidades de floculación). Si la duración (tiempo) en la cual el agua permanece en el floculador es menor o mayor al tiempo teórico óptimo puede generar deficiencias en el proceso de tratamiento de agua. A través del ensayo de jarras se pueden llegar a determinar el tiempo óptimo de floculación. Los valores estimados del tiempo de retención de partículas se dan en un rango de 20 a 40 minutos (Aliaga, 2010).

2.5.3.3. Concentración y naturaleza de las partículas

La rapidez de agrupamientos de partículas con las que se genera los flocs está estrechamente relacionada con la concentración de partículas coloidales presentes en el fluido (Figura 8) como al tamaño inicial de las mismas (Gómez, 2005).

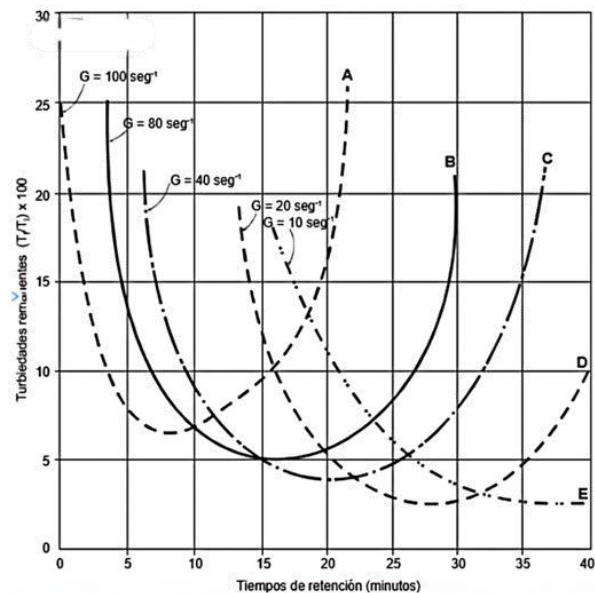


Figura 8. Efecto del tiempo de flocculación
Fuente: (Vargas, 2004)

2.5.3.4. Naturaleza del agua

El proceso de flocculación es influenciado por características fisicoquímicas del agua cruda como el pH, alcalinidad y turbiedad. Estos parámetros pueden provocar cambios en el tiempo de flocculación óptimo donde se generan cadenas poliméricas de hidróxidos que interactúan con las partículas coloidales presentes en el agua disminuyendo la eficiencia del tratamiento de agua y afectando el equilibrio del proceso (Vargas, 2004).

2.5.4. Floculantes

Los floculantes son polímeros o polielectrolitos que tienen pesos moleculares altos, moléculas orgánicas solubles en el agua formadas por monómeros (moléculas simples) repetidos en cadenas largas. Un floculante representa un polímero agregado antes del proceso de flocculación que otorga dureza al flóculo evitando su rompimiento (Hendricks, 2011). Dentro de los floculantes existen algunos tipos que son utilizados con mayor frecuencia en el tratamiento del agua.

2.5.4.1. Floculantes inorgánicos minerales

Primeros floculantes que se emplearon en el tratamiento de agua cruda y que se sigue utilizando en la actualidad, compuesto principalmente por sílice activada. Requiere de una preparación inicial antes de ser usado dentro del tratamiento, sin embargo, su preparación es algo delicada y cuidadosa debido a que el floculante tiende a gelatinizarse al entrar en contacto con el agua neutralizando parcialmente la solución (Vásquez, 2013). Estos floculantes tienden a disminuir las fuerzas de repulsión entre partículas, que a su vez reduce el potencial electrocinético. Los principales floculantes inorgánicos son: sales de aluminio y hierro, sales de magnesio y zinc, ácidos sulfúrico y fosfatos (García Pérez & Rojas Vargas, 2006).

2.5.4.2. Floculantes orgánicos naturales

Son polímeros naturales provenientes de materia animal o vegetal formados por polisacáridos. Se fabrica a partir de alginatos (extractos de algas) que son útiles como ayudantes de floculación de sales férricas, son obtenidos del ácido algínico que se extrae de las plantas marinas. Este tipo de floculante actúa a través de los enlaces de hidrogeno que se forma en la solución. Dentro de este tipo de floculante el más empleado es el almidón (Vásconez, 2013).

2.5.4.3. Floculantes orgánicos sintéticos

Los floculantes orgánicos sintéticos son polímeros lineales de largas cadenas con alto peso molecular, solubles en agua. Este tipo de floculante suele ser efectivo incluso en bajas concentraciones debido a que los grupos activos son capaces de formar puentes de enlaces gracias a su gran afinidad por las superficies sólidas. Se pueden dividir en tres categorías: 1) Aniónicos, 2) Iónicos o polielectrolíticos y 3) Catiónicos o copolímeros (García Pérez & Rojas Vargas, 2006).

2.5.5. Tipos de floculadores

Los floculadores son clasificados de acuerdo a la energía utilizada para producir la agitación en las masas de agua. Partiendo de esta consideración se encuentran los siguientes floculadores.

2.5.5.1. Floculadores hidráulicos

Los floculadores hidráulicos conducen su energía en la agitación del fluido y en la carga de velocidad que el flujo obtiene al escurrir por un conducto o tubería. Estos floculadores se componen de tanques provisto de pantallas, las cuales ayudan en la circulación del agua a una velocidad fija predeterminada ocasionando turbulencia cuando existen cambios en la dirección del flujo promoviendo el crecimiento de los flóculos (Romero, 1999).

a. Floculadores de flujo horizontal

Los floculadores de flujo horizontal dirigen el agua en forma de zigzag (va y viene) alrededor de las pantallas haciendo un giro de 180° al final de cada una (Figura 9). Por lo general, las pantallas son fabricadas de madera o láminas de asbesto-cemento y este tipo de floculadores son aplicados para caudales pequeños. En algunas ocasiones se puede implementar al sistema ranuras de fijación con el fin de ajustar el espacio entre pantallas y regular el gradiente de velocidad (Vargas, 2004).

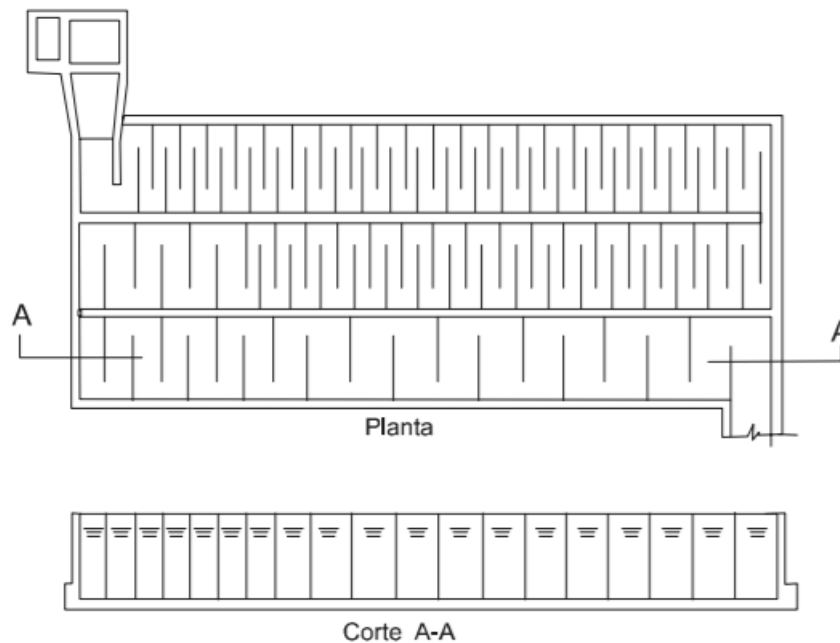


Figura 9. Floculador de pantallas flujo horizontal
Fuente: (Vargas, 2004)

b. Floculadores de flujo vertical

Este tipo de floculadores conducen agua de arriba hacia abajo a través de canales verticales formados por pantallas (Figura 10). Es recomendable su aplicación en plantas que trabajan con caudales medianos o grandes debido a que las unidades verticales requieren grandes profundidades para su funcionamiento, sin embargo, ocupan áreas más pequeñas que los floculadores de flujo horizontal. Es importante que el área de instalación del floculador sea proporcional a los decantadores y filtros con el fin de formar sistemas compactos y más equilibrados (Romero, 1999).

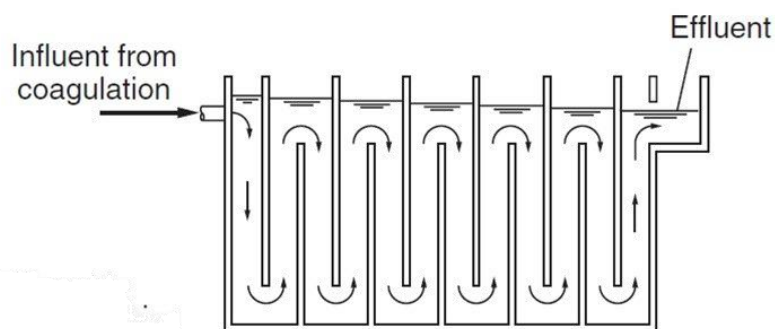


Figura 10. Floculador de pantallas flujo vertical
Fuente: (Crittenden et al., 2012)

2.5.5.2. Floculadores mecánicos

Los floculadores mecánicos (Figura 11) son aquellos que requieren de una fuente de energía externa (motor eléctrico) que sea capaz de mover el agitador de un tanque o serie de tanques, donde el agua permanece en un estado estacionario de acuerdo a su tiempo teórico de floculación (Vargas, 2004).

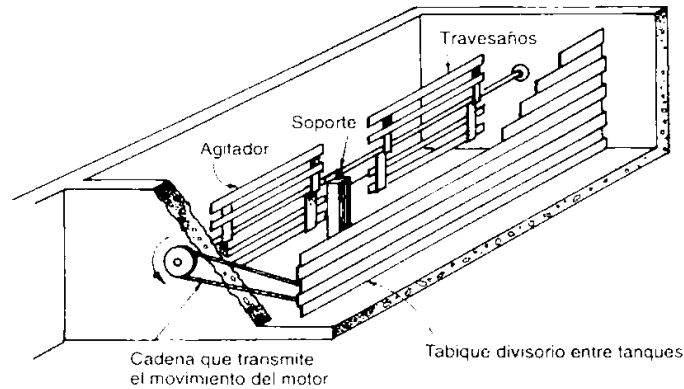


Figura 11. Floculador de paletas de eje horizontal
Fuente: (Romero, 1999)

2.6. Pruebas de jarras

La prueba o ensayo de jarras es un método de laboratorio que simula los procesos de coagulación/floculación, con el fin de replicar lo que sucede en una planta de potabilización de agua (Andía, 2000). Este ensayo tiene varios objetivos y/o propósitos, que según Romero (2009) son: evaluación de la dosis óptima de coagulante, determinación de las dosis de ayudantes de coagulación, determinación de los niveles óptimos de mezcla, gradientes de velocidad y tiempos de mezcla. Y según Acosta (2006) la prueba de jarras es la técnica más utilizada para la determinación de químicos y otros parámetros influyentes en el tratamiento del agua. El equipo de laboratorio que se emplea para el ensayo de jarras se muestra en la Figura 12.

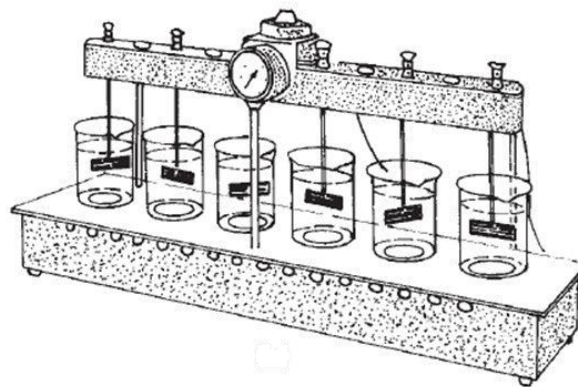


Figura 12. Equipo utilizado en la prueba de jarras
Fuente: (Vargas, 2004)

2.6.1. Condiciones de la prueba de jarras

Dado que el ensayo o pruebas de jarras representa una simulación del proceso de coagulación y floculación, es imprescindible mantener unas condiciones operacionales estables que se ajusten al proceso de potabilización realizado en una planta de tratamiento de agua (Acosta, 2006). Para obtener un ensayo de jarras exitoso se debe regular los tiempos de mezcla rápida y lenta.

2.6.1.1. Mezcla rápida

El tiempo depende del coagulante a utilizar, pero con el uso de polímeros se recomienda que el lapso de agitación sea de 15 a 60 segundos con velocidades entre 200 - 300 rpm (Acosta, 2006).

2.6.1.2. Mezcla lenta

Lo recomendable en la mezcla lenta es que el tiempo de operación no sobrepase los 15 minutos, con velocidades entre 30 – 70 rpm, de esa manera se evita el calentamiento de la muestra de agua que puede producir una sedimentación deficiente o pobre (Acosta, 2006).

2.6.2. Parámetros químicos operacionales

2.6.2.1. pH

El pH juega un papel fundamental en el proceso de coagulación-floculación debido a que la eliminación de materia orgánica existente en el agua funciona mejor en medios ácidos (pH inferior a 7.4), sin embargo, una alta concentración de materia puede inducir a la conformación de sales orgánicas de hierro que quedan retenidos en el agua (Acosta, 2006).

2.6.2.2. Temperatura

La temperatura también es un parámetro influyente en la eficiencia del proceso de coagulación-floculación estrechamente relacionado con la rapidez de formación de flocs. Mientras la temperatura del agua sea menor, la dosificación de coagulantes químicos debe ser mayor con el propósito de asegurar por completo la formación de flóculos y tener una alta efectividad en la remoción de turbiedad del agua cruda (Acosta, 2006).

2.6.2.3. Concentración del coagulante

La concentración del coagulante depende de la turbiedad que presente el agua cruda, para cada nivel de turbiedad existe una dosis óptima de coagulante que debe ser suministrada. A turbiedades altas la dosis puede disminuir por el choque de partículas coloidales, por otro lado, a niveles bajos de turbiedad se estima que la dosis debe ser mayor debido a que existe una menor probabilidad de colisión entre partículas (Fúquene & Yate, 2018).

2.6.3. Parámetros hidráulicos operacionales

2.6.3.1. Gradiente de velocidad

Uno de los factores que afecta o interviene en las pruebas de jarras, es el gradiente de velocidad que básicamente controla el nivel de movimiento del agua en un floculador. El gradiente de velocidad es un parámetro proporcional a la velocidad de aglomeración de partículas, es decir, a mayor gradiente más rápido es el aglutinamiento de partículas (Andía, 2000).

2.6.3.2. Tiempo de retención

Este parámetro operacional es de suma importancia dentro del proceso coagulación-floculación debido a que la velocidad de aglomeración de partículas depende del tiempo de retención, mientras

este tiempo se acerque en mayor medida al tiempo de retención óptimo, más eficiente será el sistema de potabilización de agua (Restrepo, 2009).

2.6.4. Curva de dosificación de coagulante

La curva de dosificación es una representación gráfica de la demanda de coagulante necesaria para tratar un agua de una turbiedad específica, así mismo representa la interpretación de resultados obtenidos en el análisis experimental de laboratorio mediante ensayos de jarras (EPA, 2002). También es definida como una guía de operación para la dosificación de coagulantes por parte de los operarios en una planta de potabilización de agua (Hendricks, 2011).

2.7. Fundamento Estadístico

2.7.1. Modelos de regresión

Un modelo de regresión ayuda en la evaluación que existe entre una variable dependiente y una o más variables independientes, que generalmente se expresa como lo muestra la ecuación 1.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (\text{ecuación 1})$$

Un modelo de regresión puede tener diferentes interpretaciones, como por ejemplo, puede ser usado para explicar cómo influye el cambio de una o más variables independientes sobre la variable dependiente, otra interpretación se refiere a que puede tener un fin de carácter explicativo, o ser utilizado como una predicción en función de los cambios que sufran las variables independientes (Peláez, 2016).

2.7.1.1. Regresión Lineal

Es una herramienta estadística que permite analizar la existencia de posibles relaciones o dependencias entre dos variables de estudio (Gorgas et al., 2011). El modelo resultante en el análisis de regresión se conoce como ecuación de regresión “y” sobre “x” (Quevedo & García, 2011). La recta de regresión es una representación gráfica en un par de ejes coordenados de la ecuación de regresión que se obtiene en el ajuste de la nube de dispersión. Cuando la nube de dispersión este distribuida a lo largo de una línea recta, se tratará del análisis de regresión lineal; en la ecuación 2 se describe la línea de regresión que se obtendrá, teniendo en cuenta que la variable y depende de la variable x , es decir $y = f(x)$ (Gorgas et al., 2011).

$$y = a + bx \quad (\text{ecuación 2})$$

2.7.1.2. Regresión Polinómica

La regresión polinómica o regresión polinomial es un modelo que describe la relación entre una variable dependiente “y”, y una variable independiente “x” dentro de un polinomio de grado n . Es decir, que está regresión puede contener modelos cuadráticos, cúbicos, cuárticos, y de orden o grado

superior en adelante (Quevedo & García, 2011). La ecuación 3 describe el modelo general de la regresión polinómica. La denominación ε representa un error aleatorio no observado.

$$y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x^2 + \dots + \beta_nx^n + \varepsilon \quad (\text{ecuación 3})$$

2.7.1.3. Regresión Logarítmica

Es un modelo posible de aplicar cuando un ajuste de regresión lineal arroja resultados estadísticos no muy buenos para la explicación de una variable dependiente en función de una variable independiente. La regresión logarítmica se ajusta muy bien a fenómenos o comportamientos en donde al inicio se observa un crecimiento rápido de la tendencia y luego las observaciones disminuyen su crecimiento con el transcurso del tiempo, observándose una tendencia lineal horizontal aproximada (Reyes, 2011). Este tipo de ajuste se representa en la ecuación 4.

$$y = a + b * \ln(x) \quad (\text{ecuación 4})$$

2.7.2. Ajuste de un modelo de regresión

2.7.2.1. Error estándar residual RSE

El error estándar residual permite calcular la varianza del error en función de los datos. Este parámetro es muy importante ya que actúa como indicador de la falta de ajuste de un modelo y tiene la misma unidad de medida de la variable dependiente. De manera contraria al coeficiente de determinación mientras el error estándar residual sea lo más pequeño posible, mejor estará el modelo ajustado a los datos (Gil, 2018).

2.7.2.2. Coeficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de determinación, generalmente denominado bajo el símbolo R^2 , explica la porción de la variación total explicada por la recta de regresión y si dicho coeficiente es muy cercano o exactamente igual a +1 o -1, quiere decir que todas las variaciones encontradas en y son explicadas por la recta de regresión (Montgomery & Runger, 2014; Quevedo & García, 2011). En la ecuación 5 se muestra a fórmula para el cálculo de este coeficiente.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{ecuación 5})$$

Donde:

- y_i : i – ésimo valor de respuesta observado
- \bar{y} : respuesta media
- \hat{y}_i : i – ésima respuesta ajustada

2.7.2.3. Coeficientes de regresión

Representan los coeficientes que son generados al aplicar un modelo de regresión con las variables independientes acompañadas de las unidades en las que fueron medidas o recolectadas. Esto quiere decir que son coeficientes de regresión no estandarizados (Montgomery & Runger, 2014).

2.7.2.4. Datos atípicos

Los datos atípicos conocidos en inglés como “outliers” representan a una o más observaciones en una muestra que están alejadas del cuerpo principal de datos que dan lugar a la pregunta de si pueden ser provenientes de otra población (Montgomery & Runger, 2014; Triola, 2019).

2.7.2.5. Datos influyentes

Son observaciones que están relativamente lejos de la vecindad donde se recopilaron el resto de los datos. Si estos puntos influyentes son puntos “malos” o erróneos de alguna manera, deben eliminarse. Por otro lado, puede que no haya nada malo con estas observaciones. En resumen, si una observación influyente controla propiedades importantes del modelo es importante identificar el mismo ya que podría tener un impacto en el uso del modelo de regresión

2.7.2.6. Distancia de Cook

La Distancia de Cook es una medida de la distancia al cuadrado entre la estimación de β por el método de mínimos cuadrados basada en todas las n observaciones y la estimación obtenida cuando se elimina el i -ésimo punto (Montgomery & Runger, 2014). La Distancia de Cook se representa mediante la ecuación 6.

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^n (\hat{y}_j - \hat{y}_{j(i)})^2}{p\sigma^2} \quad (\text{ecuación 6})$$

Donde:

- (i) : estimación de β sin la observación i – ésimas
- p : coeficientes $\beta_{0,1,2,\dots,k}$ del modelo de regresión
- σ^2 : error cuadrático medio del modelo de regresión
- \hat{y}_j : valores predichos por el modelo de regresión
- $\hat{y}_{j(i)}$: valores predichos por el modelo de regresión al eliminar la i – ésimas observación

En el software R es posible determinar la Distancia de Cook por medio de la función “cooks.distance”, obteniéndose un vector de valores de una base de datos que se desee analizar. El criterio general para determinar si una observación es influyente, es cuando el valor obtenido de la Distancia de Cook para una observación específica es superior a uno (Montgomery & Runger, 2014). Sin embargo, este criterio es una referencia general para el análisis y por tal razón algunos autores

recomiendan que los valores que sobrepasen la media de las distancias de cook multiplicada por cuatro son observaciones influyentes en un modelo de regresión.

2.7.2.7. Prueba de Bonferroni

Cuando se analizan los residuos de un modelo, generalmente se trabaja con residuos estudentizados, que son valores obtenidos al dividir cada residuo de un modelo de regresión específico por la desviación estándar de los residuos. Entonces en un modelo de regresión es prioritario analizar también el residuo estudentizado más grande o máximo, pues es un indicativo de que podría tratarse de un dato atípico (Fox, 2016).

La prueba de Bonferroni consiste en un ajuste al *p-value* del residuo estudentizado máximo, por consiguiente, es necesario analizar los *p-values* de valores t muy alejados de la cola de la distribución t. Concluyendo el análisis mediante las ecuaciones 7 y 8.

$$p - \text{value de Bonferroni} = 2np' \quad (\text{ecuación 7})$$

$$p' = P(t_{n-k-2} > \text{residuo estudentizado máximo}) \quad (\text{ecuación 8})$$

El factor 2 refleja el carácter de dos colas de la prueba, es decir que se quiere detectar grandes valores atípicos positivos y negativos. Finalmente, para identificar que alguna observación es atípica al resto del conjunto de datos se analiza el *p-value* mediante las siguientes hipótesis:

- H_0 : la observación *i*-ésima no es un valor atípico, *p-value de Bonferroni* > 0.05
- H_1 : la observación *i*-ésima si es un valor atípico, *p-value de Bonferroni* < 0.05

2.7.3. Metodología de superficie de respuesta

La metodología de superficie de respuesta (MSR) es un conjunto de herramientas matemáticas y estadísticas, aplicables para la obtención de modelos para estudiar la influencia de variables independientes sobre una variable de interés o variable dependiente, es decir que la variable de interés se denotaría como $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon$, en donde ε representa el ruido o error del modelo matemático (Montgomery, 2004).

2.7.3.1. Ajuste de superficie de respuesta o diseño de modelos

La MSR permite analizar diferentes diseños para modelos matemáticos. En la ecuación 9 se muestra el modelo de primer orden, en la ecuación 10 se muestra el modelo de segundo orden incompleto y en la ecuación 11 se muestra el diseño de segundo orden completo (Montgomery, 2004).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (\text{ecuación 9})$$

$$y = \beta_o + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (\text{ecuación 10})$$

$$y = \beta_o + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad (\text{ecuación 11})$$

2.7.3.2. Análisis de varianza

Este procedimiento permite analizar la calidad de un modelo de regresión determinado previamente, en este método la variación de la variable dependiente se subdivide en componentes significativos, que son observados y tratados de forma sistemática. El procedimiento calcula la suma total de los cuadrados corregida de la variable dependiente, la suma de cuadrados de la regresión y suma de cuadrados del error (Walpole et al., 2012).

2.7.3.3. Coeficiente de determinación predictivo (R^2 pred)

El coeficiente de determinación predictivo indica el porcentaje que puede pronosticar un modelo matemático en relación a la variable de respuesta. Este coeficiente ayuda a determinar si un modelo es capaz de ajustarse a los datos u observaciones originales evitando sobreajustes en el mismo. Conforme el coeficiente aumente mejor será la predicción del modelo, sin embargo, este coeficiente no indica si dicho modelo es válido para realizar predicciones en nuevas observaciones (Frost, 2013). En la ecuación 12 se muestra la fórmula para el cálculo de este coeficiente de determinación.

$$R^2_{pred} = 1 - \frac{\sum_1^n \left(\frac{e_i}{1 - h_i} \right)^2}{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{ecuación 12})$$

Donde:

- y_i : i – ésimo valor de respuesta observado
- \bar{y} : respuesta media
- n : número de observaciones
- e_i : i – ésimo residuo
- h_i : i – ésimo elemento diagonal

2.7.3.4. Coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado)

El coeficiente de determinación R^2 ajustado sufre una variación al cálculo del coeficiente de determinación R^2 corriente. Este coeficiente permite ver los cambios que existen al aumentar o disminuir los términos que intervienen en un modelo de regresión, por lo que es un excelente parámetro de comparación entre diferentes modelos matemáticos de regresión (Walpole et al., 2012). En la ecuación 13 se muestra la fórmula para el cálculo de este coeficiente de determinación.

$$R^2 \text{ ajustado} = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} * \frac{n - 1}{n - p - 1} \quad (\text{ecuación 13})$$

Donde:

- y_i : i – ésimo valor de respuesta observado
- \bar{y} : respuesta media
- \hat{y}_i : i – ésima respuesta ajustada
- n : número de observaciones
- p : número de términos en el modelo

2.7.4. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad ayuda a evaluar la perceptibilidad que tiene un modelo respecto a la variación o fluctuación de parámetros y datos empleados para la creación del mismo. Este tipo de análisis influencia en algunos aspectos importantes en el proceso de modelación como: identificación de errores, calibración de parámetros y relación entre las entradas y salidas del modelo. Además, es útil para ganar confianza en los resultados obtenidos por el modelo creado y dar seguridad de su aplicabilidad en futuras investigaciones o estudios de campo (Saliccioli et al., 2016).

2.7.5. Validación de modelos matemáticos

La validación de un modelo implica la comparación de las predicciones otorgadas por un modelo con los resultados medidos en los experimentos de un estudio. Este proceso confirma si un modelo es ideal para alcanzar con éxito su propósito y además determina si los resultados son aceptables para representar la realidad de una o más variables en la generación de datos (García et al., 2021).

2.7.5.1. Validación externa de un modelo

Es un tipo de validación bastante estricta, dado que implica la aplicación del modelo desarrollado en una nueva muestra o población, de ser posible en otra área de estudio y en un período de tiempo distinto al empleado en la obtención de datos (Fernández, 2018).

2.7.6. Normalidad de residuos de un modelo matemático de regresión

El análisis de los residuos suele ser útil para comprobar el supuesto de que los errores se distribuyen aproximadamente de forma normal con varianza constante, y para determinar si sería útil incluir términos adicionales en el modelo (Montgomery & Runger, 2014). Además de esto el análisis de residuos también permite identificar las discrepancias entre los modelos y los datos y evaluar la bondad de ajuste del modelo (Feng et al., 2020).

2.8. Estado del Arte

En el estudio realizado por Adesina et al. (2019) en el Estado de Ekiti Nigeria, se optimizó las variables de proceso de la coagulación del agua, aplicando la metodología de superficie de respuesta

para minimizar la turbidez del agua superficial en conjunto al uso de un coagulante natural denominado *Moringa oleifera*, encontraron que los datos predichos por el modelo resultante se ajustan bien a los datos experimentales.

De manera análoga, en el estudio realizado por Birjandi et al. (2013) a las aguas residuales de un fabricante de reciclaje de papel ubicada en Chamestan Mazadaran, Irán se determinó el mejor tipo de coagulante y floculante, el pH y la dosis óptima de coagulante y floculante, mediante la aplicación de la metodología de superficie de respuesta. Las modelaciones encontradas, mostraron que el sulfato de aluminio es el mejor coagulante y Chemfloc3876 es el mejor floculante, en dosis de 41 y 7.52 mg/L respectivamente, para el tratamiento de las aguas residuales del reciclaje de papel.

En el estudio realizado por Kakoi et al. (2017) se aplicó la metodología de superficie de respuesta para la optimización de la coagulación y la floculación de las aguas residuales de la industria de la pintura utilizando el biocoagulante *Maerua decumbent*. Se encontró que las condiciones óptimas para la eliminación de turbidez, la demanda química de oxígeno, plomo y el cromo fueron con dosificaciones del coagulante de 0.8 a 1.2 kg/m³, pH de 5 a 7 y tiempo de sedimentación de 48 a 60 minutos. En las condiciones óptimas el biocoagulante logró remociones de turbidez, DQO, plomo y cromo de 99.2%, 78.6, 100% y 99.9% respectivamente.

Otro estudio realizado por Gökçek & Özdemir (2020) en el distrito de Nigde Turquía, se optimizó el proceso de coagulación – floculación y se examinó los efectos de factores experimentales (DQO, SS) en la turbidez de aguas residuales procedentes de mataderos en diferentes coagulantes (FeCl₃, alumbre) a través de la metodología de superficie de respuesta. Los resultados experimentales demostraron que el alumbre da mejores resultados en la eliminación del DQO, SS y reducción de turbidez en un 75.25, 90.16 y 91.18 % respectivamente, también se concluyó que un modelo cuadrático es una representación más apropiada para la variable de interés (turbiedad).

CAPÍTULO III

3. Metodología

3.1. Descripción de la Planta Potabilizadora de la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas

La planta potabilizadora de la JAAPRB está situada al noreste de la ciudad de Azogues en las coordenadas $2^{\circ}42'45''\text{S}$ y $78^{\circ}50'05''\text{O}$ a una altura de 2782 msnm, en el sector Mahuarcay de la parroquia Aurelio Bayas, Comunidad Leg Abuga (Figura 13 y 14).

Las comunidades a las que la JAAPRB brinda el servicio de agua potable y son parte de la parroquia Aurelio Bayas son: Leg Abuga, Leg Tabacay, Señor de las Flores, Corazón de María, General Veintimilla, Oriente Alto, Oriente Bajo, Zhirincay, Juguil Abuga Ingapirca. La Junta de Bayas ofrece el servicio a un total de 1425 usuarios.

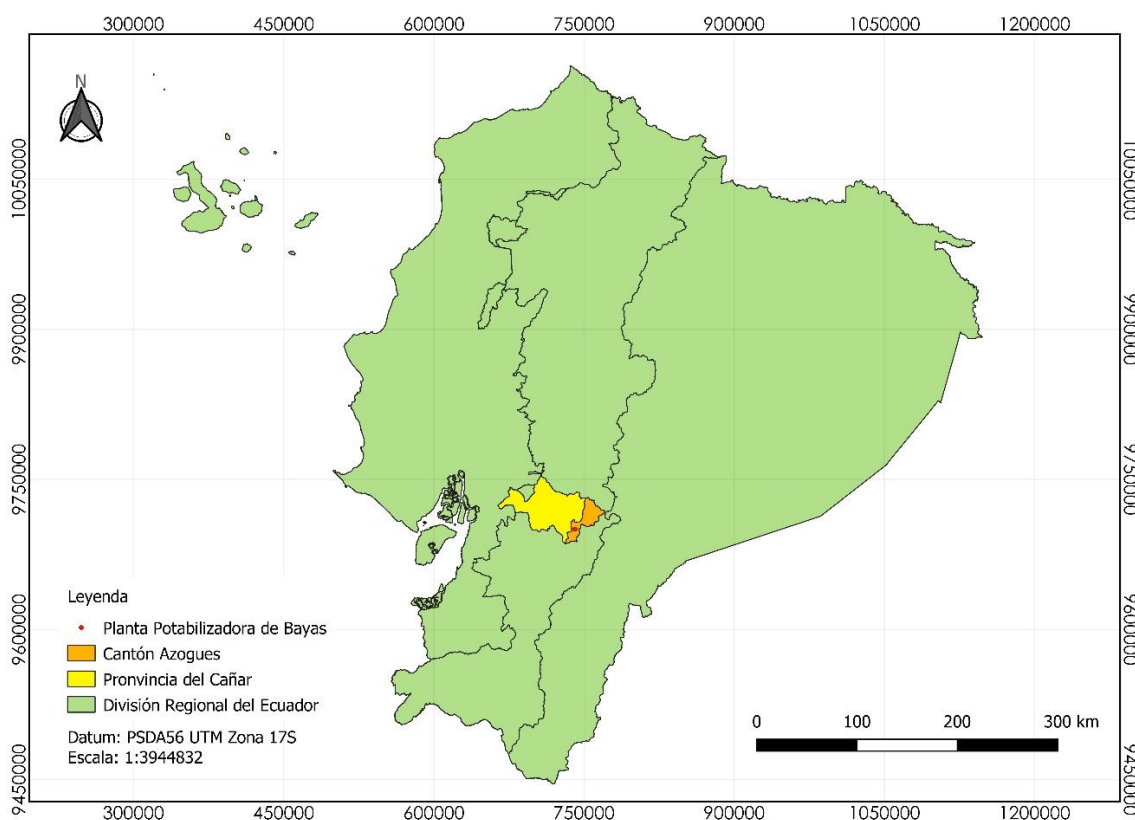


Figura 13. Ubicación de la Planta de Potabilización Bayas en la división geográfica política
Fuente: Autores



Figura 14. Imagen Satelital de la Planta de Potabilización Bayas. Elaboración mediante plugin Quick Map Services para QGIS 3.4
Fuente: Autores

3.1.1. Captación y fuentes de agua de la planta potabilizadora

El sistema de tratamiento cuenta con 5 fuentes de agua cruda: 1. Mahuarcay Alto, 2. Mahuarcay Bajo, 3. Chagracazhca, 4. Santa Ana-Llaucay y 5. Pilzhum (Tabla 2). Como pretratamiento se cuenta con cribado en las zonas de captación y un desarenador en la captación de Santa Ana-Llaucay. El transporte del agua captada se realiza por medio de tubería hasta la JAAPRB. En las Figuras 15 a 19 se observa el ambiente en el que se encuentran dichas captaciones.

Tabla 2. Ubicaciones geográficas de las captaciones
Fuente: Autores

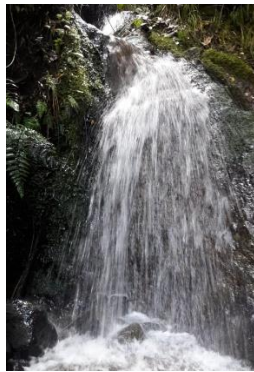
Captación	Latitud	Longitud
Mahuarcay Alto	02° 42' 40.8977" S	78° 49' 54.6230" O
Mahuarcay Bajo	02° 42' 43.7929" S	78° 49' 53.7308" O
Chagracazhca	02° 43' 02.8340" S	78° 48' 52.0700" O
Santa Ana-Llaucay	02° 41' 20.8162" S	78° 48' 42.8400" O
Pilzhum	02° 38' 49.3105" S	78° 46' 39.3125" O



*Figura 15. Captación Mahuarcay Alto
Fuente: Autores*



*Figura 16. Captación Mahuarcay Bajo
Fuente: Autores*



*Figura 17. Captación Chagracazhca
Fuente: Autores*



*Figura 18. Captación Santa Ana Llaucay
Fuente: Autores*



*Figura 19. Captación Pilzhum
Fuente: Autores*

3.1.2. Descripción del proceso de potabilización de la planta de tratamiento

La planta de potabilización es de tipo convencional y está diseñada para un caudal de operación de 20 L/s, mismo que se distribuye en dos módulos de tratamiento con 10 L/s cada uno. Dentro del sistema de potabilización existen diferentes etapas: mezcla rápida a través de un vertedero rectangular donde se produce la coagulación una vez que se añade el coagulante policloruro de aluminio. La floculación se desarrolla en floculadores hidráulicos de pantallas, en donde se adiciona polielectrolito para mejorar la formación de flóculos. La sedimentación se desarrolla en sedimentadores con placas paralelas y sedimentadores tubulares. Posteriormente existe un proceso de prefiltración con grava gruesa y fina de flujo horizontal. En tanto, la filtración rápida de tasa

declinante y lavado mutuo se efectúa en filtros con arena. Finalmente, se realiza la desinfección con hipoclorito de calcio mediante una dosificación por goteo en forma directa. El almacenamiento temporal del agua tratada se realiza en un tanque de 200 m³, desde donde se distribuye el agua potable hacia otros dos tanques situados en el centro de la parroquia Bayas, para finalmente distribuir el agua potable a los usuarios. La descripción de la planta de tratamiento de Bayas fue realizada en base a la información proporcionada por la JAAPRB e indicaciones de los operarios durante la realización del trabajo de titulación.

3.1.2.1. Ingreso de agua cruda

El agua proveniente de las 5 captaciones ingresa a la planta de tratamiento mediante 5 tuberías respectivamente (Figura 20), el agua cruda se receipta en la parte inferior de un cajón de flujo ascendente para el caudal de diseño mencionado anteriormente; el caudal con el que opera la planta normalmente está entre 10 y 15 L/s, y es regulado mediante válvulas ubicadas en la parte exterior del cajón de recepción.

La planta cuenta con un sistema de válvulas para desviar parte del agua cruda que ingresa, si una o más de una de las captaciones lleva consigo agua cruda con turbiedades elevadas o cuando se observa que el caudal ingresante sobrepase el caudal límite de diseño. Este sistema de válvulas tiene la finalidad de no provocar alteraciones durante todo el proceso de tratamiento.

La medición del caudal de operación de la planta se realiza en el vertedero rectangular, con la medida de la altura alcanzada en el agua en ese momento, mediante la observación de una regleta ubicada en la parte interior del cajón de recepción y con la aplicación de la ecuación de Francis (Fernandez et al., 1998).

$$Q = 1.838 L H^{3/2} \quad (\text{ecuación 14})$$



Figura 20. Válvulas de ingreso de agua cruda
Fuente: Autores

3.1.2.2. Mezcla rápida o coagulación

El vertedero rectangular permite el paso del agua hacia las demás unidades de tratamiento, este mismo forma un resalto hidráulico (Figura 21) en la parte inferior del vertedero. En este punto se adiciona policloruro de aluminio como coagulante a una concentración de 2.5% P/V. Esta solución química es preparada por los operadores en dos tanques de PVC de 1000 litros (Figura 22), para obtener esta concentración, se mezcla 25 Kg del coagulante en 1000 litros de agua. La adición del químico se realiza mediante una flauta de dosificación (Figura 23) ubicada en la parte superior del resalto hidráulico, esta flauta cuenta con orificios para permitir la salida del químico. La dosis de coagulante añadido se regula mediante dos válvulas que disponen de un mecanismo de rosca, por tanto, el sistema de dosificación está determinado por el número de vueltas del dosificador.



Figura 21. Vertedero rectangular para resalto hidráulico
Fuente: Autores



Figura 22. Tanque de 1000 litros de capacidad para la preparación del policloruro de aluminio
Fuente: Autores



Figura 23. Flauta de dosificación de coagulante
Fuente: Autores

3.1.2.3. Mezcla lenta o floculación

El proceso de floculación o mezcla lenta se realiza en un floculador hidráulico de tabiques de flujo horizontal con paredes de concreto (Figura 24) y un floculador hidráulico de flujo vertical (Figura 25). El floculador horizontal cuenta con tres zonas de floculación para un caudal de diseño de 10 L/s

y con un tiempo total de retención de 20 minutos, pero generalmente opera con un gasto de 15 L/s (García Altamirano, 2018). En la Tabla 3 y 4 se detallan las características de diseño de la unidad de floculación de flujo horizontal, que es la unidad donde se enfoca el estudio.

Tabla 3. Tiempos de retención y gradiente de velocidad de las zonas de floculación
Fuente: (García Altamirano, 2018)

Zona	Tiempo parcial en minutos	Gradiente medio G (s^{-1})
Inicial	4	60
Media	6	35
Final	10	25
Total	20	-

Tabla 4. Valores de diseño del floculador hidráulico de flujo horizontal
Fuente: (García Altamirano, 2018)

Datos	Floculador Primera Zona		Floculador Segunda Zona		Floculador Tercera Zona	
	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor
Caudal	L/s	15	L/s	15	L/s	15
Tiempo	min	4	min	6	min	10
Velocidad	m/s	0.20	m/s	0.14	m/s	0.10
Calado	m	0.6	m	0.6	m	0.6
Longitud del tabique	m	2.8	m	2.3	m	1.7
Espesor del tabique	m	0.03	m	0.03	m	0.03
Longitud total	m	38	m	55	m	60
Ancho del tanque	m	2.1	m	2.6	m	2.1
Número de canales	N	15	N	17	N	23
Largo del tanque	m	2.7	m	3.7	m	6.4
Número de tabiques	N	14	N	16	N	22



Figura 24. Floculador hidráulico de flujo horizontal
Fuente: Autores



Figura 25. Floculador hidráulico de flujo vertical
Fuente: Autores

En la floculación se emplea como floculante el polímero catiónico-base poliacrilamida, de la empresa SOLENIS™. Para dosificar el floculante en la mezcla lenta, se cuenta con una tubería plástica (Figura 26) conectada a un tanque de 200 litros, en donde se prepara esta solución a una concentración de 0.01875% P/V. Esta solución química es preparada por los operadores en dos tanques de 200 litros (Figura 27), para alcanzar la concentración, se mezcla 37.5 g del polímero catiónico (PC) en 200 litros de agua. La dosis de floculante que se añade se regula mediante una llave conectada al tanque de 200 litros.



Figura 26. Flauta de dosificación del polímero catiónico
Fuente: Autores



Figura 27. Tanque de 200 litros de capacidad para la preparación del polímero catiónico
Fuente: Autores

3.1.2.4. Sedimentación o decantación

La sedimentación remueve los sólidos sedimentables que han sido producidos por el proceso de coagulación-floculación. Se cuenta con un sedimentador laminar de placas paralelas de flujo ascendente proveniente del floculador vertical (Figura 28) y un sedimentador tubular de flujo

ascendente proveniente del floculador horizontal (Figura 29). La sedimentación cuenta con cuatro zonas para el correcto funcionamiento del proceso; la primera zona corresponde a la zona de entrada que permite distribuir de manera uniforme el agua floculada al módulo de placas tubulares; una zona de decantación por medio de placas en el sedimentador y módulos de sedimentación de Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) inclinados a 60 grados en diferentes posiciones en el segundo sedimentador; una zona de salida para la recolección de agua decantada por medio de tuberías recolectoras de PVC perforadas y finalmente una zona de depósito y extracción de lodos.



Figura 28. Sedimentador laminar de placas paralelas
Fuente: Autores



Figura 29. Sedimentador tubular
Fuente: Autores

3.1.2.5. Prefiltración

Luego de la sedimentación se cuenta con un proceso de prefiltrado con flujo horizontal (Figura 30), mismo que tiene la finalidad de reducir la carga de partículas suspendidas que llegan a la filtración rápida; La prefiltración se realiza en dos etapas: la primera consta de un filtrado con grava gruesa y luego un filtrado con grava fina.



Figura 30. Proceso de prefiltración luego de la sedimentación
Fuente: Autores

3.1.2.6. Filtración rápida

El agua que sale de la prefiltración pasa por dos canales de recolección, un canal para el agua prefiltrada proveniente del sedimentador de placas (Figura 31), y un canal para el agua prefiltrada proveniente del sedimentador tubular (Figura 32). La filtración rápida cuenta con una batería de 4 filtros rápidos de tasa declinante y lavado mutuo (Figura 33). El lecho filtrante está constituido por grava en la parte inferior y arena en la parte superior, al finalizar el proceso de filtrado se conduce el agua hacia un canal que recolecta el agua de todos los filtros (Figura 34) y la conduce hasta la etapa de desinfección por medio de una tubería de PVC.



Figura 31. Canal de recolección de agua prefiltrada (floculador de flujo vertical)
Fuente: Autores



Figura 32. Canal de recolección de agua prefiltrada (floculador de flujo horizontal)
Fuente: Autores



Figura 33. Batería de filtros rápidos
Fuente: Autores



Figura 34. Canal de recolección de agua proveniente de la filtración rápida
Fuente: Autores

3.1.2.7. Desinfección

La desinfección del agua purificada permite convertir el agua purificada por los procesos anteriores en agua potable destinada al consumo de la población, para esto se desinfecta el agua mediante el uso de hipoclorito de calcio, inyectado al agua por un sistema de goteo directo (Figura 35). El cuarto de cloración está ubicado luego del proceso de filtración rápida (Figura 36).



Figura 35. Sistema de goteo directo de hipoclorito de calcio
Fuente: Autores



Figura 36. Cuarto de cloración
Fuente: Autores

3.1.2.8. Almacenamiento y distribución de agua tratada

El agua que sale de la desinfección es almacenada temporalmente en un tanque de forma cilíndrica de 200 m³ de capacidad (Figura 37), y por medio de tubería de 160 mm de diámetro que se dirige hasta el centro de la parroquia Aurelio Bayas para ser almacenada nuevamente de forma temporal en dos tanques ubicados en la zona mencionada, para finalmente ser distribuida entre los usuarios conectados a la red.



Figura 37. Tanque de almacenamiento de agua tratada
Fuente: Autores

3.2. Realización de las pruebas de jarras usando Policloruro de Aluminio

Debido a que las pruebas de jarras consisten en una simulación del proceso de coagulación y floculación, se tuvo en cuenta algunas consideraciones previas antes de la realización de las mismas para determinar con éxito la curva de dosificación de PAC. Todas las pruebas de jarras y medición de parámetros de agua cruda fueron realizadas en el laboratorio de la Planta de Tratamiento de Mahuarcaj que es parte del sistema de agua potable de la Empresa Pública Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Ambiental (EMAPAL EP) del cantón Azogues; el permiso para trabajar en el laboratorio se indica el Anexo 2.

3.2.1. Descripción de las características hidráulicas de las unidades de coagulación-floculación

Para simular el proceso de tratamiento de agua cruda, fue necesario conocer cuáles son las características hidráulicas de las unidades de tratamiento, por lo que en esta sección se describirá cuáles son los parámetros hidráulicos con los que funcionan los procesos de coagulación y floculación. Las características hidráulicas de la unidad de mezcla rápida y mezcla lenta fueron tomadas del manual de diseño de la unidad de floculación de flujo horizontal de la planta de tratamiento “Bayas”.

3.2.1.1. Características hidráulicas de la mezcla rápida y mezcla lenta

La planta de tratamiento cuenta con un vertedero rectangular con un resalto hidráulico para la mezcla rápida, por lo que con este se logra la completa mezcla y disolución del PAC en el agua de ingreso al proceso de tratamiento. Además, el proceso trabaja con un floculador de flujo horizontal de tres tramos para la acumulación de partículas o formación de flóculos. Las características más importantes para tener en cuenta fueron el tiempo de retención y el gradiente de velocidad.

El tiempo de retención de coagulación y floculación representa el tiempo que tarda en pasar por la unidad de mezcla rápida y mezcla lenta respectivamente; es decir, el tiempo en el cual las partículas coloidales son desestabilizadas y el tiempo en el cual el agua pasa a través de la unidad de floculación. Cabe recalcar que, si el caudal de operación de toda la planta aumenta, los tiempos de retención disminuirán al aumentar la velocidad de flujo del agua.

El gradiente de velocidad representa la velocidad a la cual circula el agua de entrada por la mezcla rápida y mezcla lenta, a partir del gradiente de velocidad se puede obtener la velocidad de agitación que se usará en las pruebas de jarras. De manera análoga, si el caudal de operación de toda la planta aumenta el gradiente de velocidad también aumentará, pues la velocidad de flujo será mayor.

a. Tiempo de mezcla de la unidad de coagulación

Las recomendaciones realizadas por la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles y la Asociación Estadounidense de Obras Hidráulicas, indican que los tiempos de mezcla en la coagulación deben estar entre 20 a 60 segundos como máximo (Park et al., 2016).

b. Tiempo de retención de la unidad de floculación

El tiempo de retención en la unidad de floculación se tomó de las características de diseño implementadas por García (2018), estos valores se presentan en la Tabla 3 y 4. Romero (1999) y Arboleda (2000) indican que el tiempo de retención debería encontrarse entre 15 a 20 minutos y de manera análoga Vargas (2004) indica que el tiempo necesario para formar flóculos está entre 20 a 40 minutos. Los valores de las referencias bibliográficas coinciden con los valores establecidos en el diseño del floculador.

c. Gradiente de velocidad unidad de coagulación

El gradiente de la unidad de coagulación tuvo un valor de diseño superior a 1000 s^{-1} (García Ávila, 2014), lo cual corrobora con lo recomendado por Park et al. (2016) que indica que el gradiente de velocidad debería encontrarse entre valores de 700 a 1000 s^{-1} . Distintos estudios realizados en esta planta de potabilización utilizaron este valor.

d. Gradiente de velocidad unidad de floculación

Los valores dados en el diseño de la unidad de floculación de flujo horizontal se pueden observar en la Tabla 3 (García Altamirano, 2018). Teniendo en cuenta las citas realizadas por Romero (1999) y Arboleda (2000), indican que los gradientes de velocidad recomendados deben encontrarse en valores de 10 a 100 s^{-1} , estos valores son los mismos que recomienda Vargas (2004); estas recomendaciones se muestran en la Tabla 5.

*Tabla 5. Parámetros operacionales recomendados
Fuente: (Arboleda, 2000; Park et al., 2016; Romero, 1999; Vargas, 2004)*

Característica Hidráulica	Coagulación	Floculación
Tiempo de retención	1 s	20 min
Gradiente de velocidad	1000 s^{-1}	60, 35, 20 s^{-1}

3.2.1.2. Obtención de las velocidades de agitación para el equipo jar test

Una vez descritos los gradientes de velocidad tanto para la mezcla rápida como para la mezcla lenta se procedió a obtener las velocidades de agitación en revoluciones por minuto (rpm) que fueron usadas en el equipo de prueba de jarras. Para la velocidad de agitación de la mezcla rápida se utilizó la máxima capacidad del equipo de jarras utilizado (300 rpm). Para las velocidades de agitación de la mezcla lenta se utilizó un gráfico que representa las velocidades de agitación en RPM versus el gradiente de velocidad, considerando una jarra de 2 litros de capacidad y dos líneas de temperatura de agua (23 y 3 °C), en donde se utilizó una temperatura promedio (Figura 38).

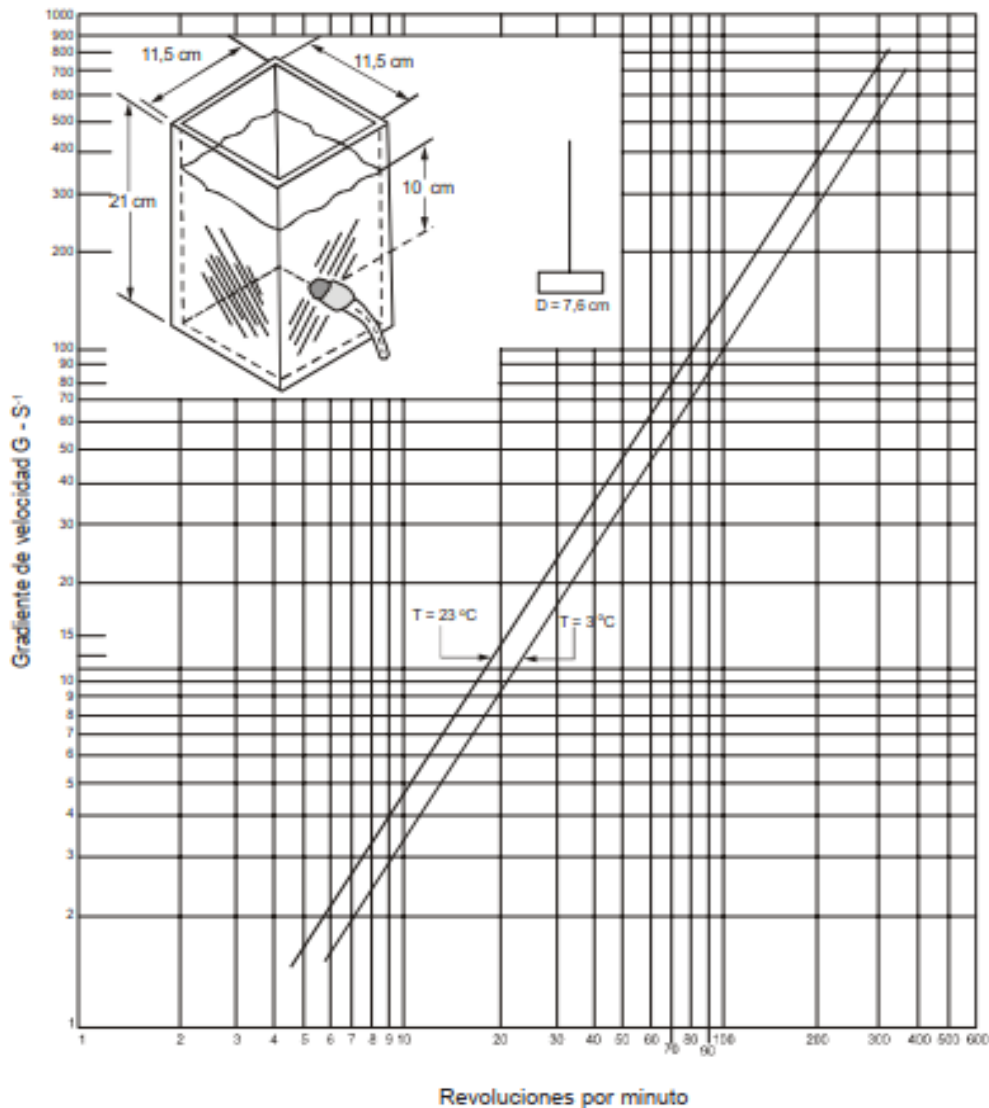


Figura 38. Abaco de gradiente de velocidad vs velocidad de agitación de la paleta
Fuente: (Arboleda, 2000)

3.2.2. Toma de muestras de agua cruda

La toma de muestras de agua cruda para las pruebas de jarras se realizó al ingreso de la planta de tratamiento, antes del ingreso del agua cruda a la mezcla rápida. Todas las muestras fueron muestras simples y tomadas manualmente durante las épocas de invierno y verano con el fin de obtener turbiedades altas y bajas respectivamente. Las muestras tomadas en la época de verano fueron en los meses de agosto y septiembre de 2021 y así mismo las muestras de la época de invierno fueron tomadas en los meses de febrero y marzo de 2022. Se tomó un total de 84 muestras simples abarcando turbiedades de agua cruda desde 6.23 a 6030 NTU, incluyendo un amplio rango de turbidez, lo cual permitió obtener una mejor curva de dosificación. La toma de muestras estuvo altamente influenciada por las condiciones climáticas, es decir, los días con altas precipitaciones fueron los días en donde se obtuvo la mayor cantidad de muestras con turbiedades elevadas y de manera contraria cuando no existía precipitación, las muestras de agua tuvieron las turbiedades más bajas.

3.2.3. Preparación de soluciones químicas de laboratorio

Para la realización de las pruebas de jarras se preparó soluciones químicas en el laboratorio. En cada ensayo de jarras se preparó una nueva solución química de policloruro de aluminio y polímero catiónico, siguiendo el procedimiento explicado en la siguiente sección.

3.2.3.1. Preparación de Policloruro de Aluminio – coagulante

Para la preparación de la solución de policloruro de aluminio se trabajó con la concentración que se utiliza en planta, la cual corresponde al 2.5% P/V. La solución de policloruro de aluminio se preparó cada vez que se realizó una prueba de jarras.

El procedimiento para preparar esta solución inicia con la toma de una pequeña muestra del policloruro de aluminio en polvo en un recipiente esterilizado plástico para el almacenamiento del químico (Figura 39). En una balanza analítica se pesó 2.5 gramos de PAC; una vez conseguido este peso se colocó unas gotas de agua para diluir inicialmente el químico y poder traspasarlo a un balón de aforo; una vez colocada la solución en el balón de aforo se agitó y homogenizó el mismo hasta que no exista presencia de algún grumo no disuelto, posterior a esto se aforó el balón hasta los 100 mililitros. La verificación de la concentración utilizada en planta se observa en los siguientes cálculos.

$$\frac{25 \text{ kg}}{1000 \text{ L}} \rightarrow \frac{g}{100 \text{ mL}}$$
$$\frac{25 \text{ kg}}{1000 \text{ L}} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} * \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} = 0.025 \frac{g}{\text{mL}} = \frac{2.5 \text{ g}}{100 \text{ mL}} = 2.5\% \text{ P/V}$$

3.2.3.2. Preparación del polímero catiónico – floculante

Para la preparación de la solución de polímero catiónico se trabajó con la concentración que se utiliza en planta, la cual corresponde al 0.01875% P/V. La solución de polímero se preparó cada vez que se realizó una prueba de jarras.

El procedimiento para preparar esta solución inicia con la toma de una pequeña muestra del polímero en polvo en un recipiente esterilizado plástico para el almacenamiento del químico (Figura 39). En una balanza analítica se pesó 37.5 gramos de polímero; una vez conseguido este peso se colocó unas gotas de agua para diluir inicialmente el químico y poder traspasarlo a un balón de aforo; una vez colocada la solución en el balón de aforo se agitó y homogenizó el mismo hasta que no exista presencia de algún grumo no disuelto, posterior a esto se aforó el balón hasta los 100 mililitros. La verificación de la concentración utilizada en planta se observa en los siguientes cálculos.

$$\frac{37.5 \text{ g}}{200 \text{ L}} \rightarrow \frac{g}{100 \text{ mL}}$$

$$\frac{37.5 \text{ g}}{200 \cancel{\text{ L}}} * \frac{1 \cancel{\text{ L}}}{1000 \text{ mL}} = 0.0001875 \frac{\text{g}}{\text{mL}} = \frac{0.01875 \text{ g}}{100 \text{ mL}} = 0.01875\% \text{ P/V}$$



Figura 39. Policloruro de aluminio (izquierda), polímero catiónico (derecha)
Fuente: Autores

3.2.4. Determinación del volumen de alícuotas

La ecuación que rige la dosificación de un químico en el tratamiento de agua, involucra la concentración del químico, el caudal de entrada y el caudal de dosificación, representado en la ecuación 15.

$$QD = qC \quad (\text{ecuación 15})$$

Donde:

- **Q:** caudal de entrada del agua cruda (L/s)
- **D:** dosis de químico (mg/L)
- **q:** caudal del químico (L/s)
- **C:** concentración del químico (mg/L)

Para realizar la prueba de jarras es necesario simular los procesos que ocurren en planta, por lo que la ecuación 15 necesitó una modificación para ser aplicada en las pruebas y así obtener los volúmenes de las alícuotas que fueron añadidas en cada jarra del equipo.

$$VD = vC \quad (\text{ecuación 16})$$

Donde:

- **V:** volumen de la jarra (L)
- **D:** dosis de químico (mg/L)
- **v:** volumen de la alícuota del químico (mL)
- **C:** concentración del químico (mg/L)




Para el desarrollo de las pruebas de jarras se trabajó con las muestras de agua cruda obtenidas en ese momento, por lo que cada muestra de agua cruda fue diferente y registró distintos valores de turbiedad, por lo tanto, fue necesario variar las dosis de PAC en cada prueba de jarras realizada, esto se evidencia en el registro presentado en el Anexo 3.



3.2.5. Materiales, equipos y reactivos

Los materiales utilizados para la realización de las pruebas de jarras fueron: jeringas hipodérmicas desechables de 1 mL, 3 mL y 5 mL, 2 balones de aforo de 100 mL, 2 vasos de precipitación de 250 mL, una jarra de plástico para homogenizar las muestras de agua y baldes plásticos con capacidad para 15 litros para la recolección de las muestras de agua. Los únicos reactivos utilizados para la realización de las pruebas de jarras consistieron en policloruro de aluminio en polvo (Anexo 4), polímero catiónico en polvo (Anexo 4) y una solución buffer para la calibración del equipo que mide pH y temperatura. Los equipos utilizados se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6. Equipos utilizados para la medición de parámetros y prueba de jarras

Fuente: Autores

Equipo	Marca	Finalidad
<p>Equipo de jarras</p>  <p>Figura 40. Equipo de Jarras Fuente: Autores</p>	<p>Phipps & Bird Modelo PB-700</p>	<p>Realización de las pruebas de jarras con una capacidad de agitación de paleta de 0 a 300 rpm en incrementos de 1 rpm.</p>
<p>Turbidímetro</p>  <p>Figura 41. Turbidímetro Fuente: Autores</p>	<p>HACH – Turbidímetro LED TL2310</p>	<p>Medición de Turbiedad (NTU) con un error del $\pm 2\%$ equivalente a 0.01 NTU en un rango de medición de turbiedad de 0 a 1000 NTU.</p>
<p>Colorímetro</p>  <p>Figura 42. Colorímetro Fuente: Autores</p>	<p>HACH – Colorímetro portátil DR/890</p>	<p>Medición de Color (UC Pt-Co) en un rango de medición de 0 a 500 UC Pt-Co.</p>

<p>Medidor de pH y Temperatura</p>  <p>Figura 43. Equipo de pH y Temperatura Fuente: Autores</p>	<p>OAKTON – Medidor de pH 510</p>	<p>Medición de pH y Temperatura (°C) con una exactitud de ± 0.01 pH y ± 0.3 °C.</p>
<p>Balanza Analítica</p>  <p>Figura 44. Balanza Analítica Fuente: Autores</p>	<p>OHAUS Modelo Adventurer “AV-130”</p>	<p>Pesaje de reactivos químicos (policloruro de aluminio y polímero catiónico) con una capacidad máxima de 310 g y una sensibilidad de 0.001 g.</p>

Nota: Las fichas técnicas de todos los equipos utilizados se muestran en el Anexo 5

3.2.6. Procedimiento para las pruebas de jarras

El procedimiento que se utiliza para realizar los ensayos o pruebas de jarras consiste en la simulación del proceso de coagulación-floculación mediante el uso de un equipo denominado “Equipo de Jarras”. El uso de este equipo permitió trabajar con seis dosis diferentes de coagulante y floculante con el fin de ampliar el rango de búsqueda y definir las dosis óptimas teóricas para el policloruro de aluminio y una única dosis óptima teórica para el polímero catiónico, para distintos niveles de turbiedad del agua cruda usada en el proceso de tratamiento. El procedimiento realizado para las pruebas de jarras se explica en el Anexo 6.

3.3. Elaboración de la curva de dosificación de Policloruro de Aluminio

3.3.1. Recopilación de datos

La recopilación de datos se realizó durante todo el tiempo que se hicieron las pruebas de jarras en las épocas de invierno y verano, con el fin de abarcar rangos de turbiedad elevados y bajos, pues es importante contar con un rango amplio de turbidez para poder elaborar la curva de dosificación.

3.3.2. Selección de datos

La selección de datos se hizo de tal forma que permitió determinar las dosis óptimas de PAC para los distintos valores de turbiedad registrados en las pruebas de jarras. Esta selección de la dosis se realizó en base al porcentaje de remoción de turbiedad y color en comparación con los valores iniciales de estos parámetros, priorizando a la turbiedad como parámetro más representativo, es decir, se seleccionó la jarra con la menor turbiedad residual de cada ensayo y por ende esta jarra representó a la mejor dosis para el nivel de turbiedad y color de ese ensayo. El porcentaje de remoción se determinó según la ecuación 17 (Arboleda, 2000).

$$\% \text{ remoción} = \left[1 - \left(\frac{\text{Turbiedad Final}}{\text{Turbiedad Inicial}} \right) \right] * 100 \quad (\text{ecuación 17})$$

La dosis óptima de polímero aplicada en planta debe estar en función de la turbidez del agua cruda, pero debido a que las dosis son pequeñas en la mayoría de las plantas se usa una sola dosificación para cualquier valor de turbiedad. Las pruebas de jarras realizadas en el tiempo del estudio, permitió obtener la dosis óptima de polímero catiónico (Anexo 7), misma que se tomó como la dosis que más se repitió en todos los ensayos de jarras realizados con floculante.

3.3.3. Construcción de una base de datos

Una vez obtenida la dosis óptima para cada turbiedad, se procedió a construir una base de datos para el registro de las pruebas de jarras realizadas (Anexo 3), estos datos fueron necesarios para la construcción de la curva de dosificación de PAC. La base de datos para la construcción de la curva de dosificación del PAC constó de dos columnas; donde la primera representó la turbiedad inicial (NTU), es decir la turbiedad del agua cruda en orden creciente y la segunda representó la dosis (mg/L) correspondiente a ese valor de turbiedad.

3.3.4. Análisis del comportamiento del pH

Con los resultados obtenidos en las pruebas de jarras (Anexo 3) se analizó el comportamiento del pH antes de los ensayos (pH agua cruda) y después de los ensayos, para identificar el efecto de las distintas dosis de PAC aplicadas en el pH final del agua. Se comparó los resultados obtenidos con estudios que aplicaron SA o PAC como coagulante.

3.3.5. Creación de la curva de dosificación de policloruro de aluminio

La elaboración de la curva de dosificación de PAC tuvo como fundamento el análisis de varios modelos de regresión que permitieron determinar cuál es la función de regresión que más se ajustó a los datos obtenidos en las pruebas de jarras (Anexo 3). Cada modelo que se generó se comparó a través del parámetro del coeficiente de determinación (R^2) y el error estándar residual (RSE) de cada modelo. Además, se tomó en cuenta un criterio técnico relacionado a lo que sucede en planta y las pruebas de jarras al momento de realizar la dosificación de PAC.

El análisis estadístico y la construcción de la curva de dosificación se realizó en el software de código abierto RStudio versión 1.4.1106. Para la construcción de la curva de dosificación se utilizó 3 criterios de análisis:

- **Primer criterio:** empleo de todos los datos incluyendo la turbiedad más baja y alta obtenida en las pruebas de jarras (rango completo).
- **Segundo criterio:** empleo de una sección de los datos con turbiedades menores a 500 NTU, debido a que la planta de potabilización suele tratar más frecuentemente agua cruda con estos valores de turbiedad como máximo.
- **Tercer criterio:** empleo de una sección de los datos con turbiedades mayores a 500 NTU, debido a que estos rangos de turbiedad no son tan frecuentes ya que dependen de la ocurrencia de altas precipitaciones, pero representan un riesgo si se desea tratarlos y no se conoce la dosis que debe emplearse.

3.3.5.1. Significancia de los coeficientes de regresión

El análisis estadístico de un modelo de regresión permite determinar si los coeficientes de regresión incluido el intercepto son estadísticamente significativos, esto quiere decir si son influyentes en la explicación del modelo, para esto se analizó el *p-value* con un nivel de significancia del 5% (0.05) para cada coeficiente, teniendo en cuenta las siguientes hipótesis:

- **H₀:** $B_o = 0$ → el coeficiente de regresión es igual a cero, por lo tanto, es estadísticamente no significativo, $p\text{-value} > 0.05$
- **H₁:** $B_o \neq 0$ → el coeficiente de regresión es distinto de cero, por lo tanto, es estadísticamente significativo, $p\text{-value} < 0.05$

Una vez analizada la significancia de los coeficientes de cada modelo generado, se procedió a decidir si el modelo obtenido necesita de un ajuste o no, con el fin de aumentar el R^2 y disminuir el RSE.

3.3.6. Identificación de datos atípicos y datos influyentes - criterio estadístico

Una vez determinado el mejor modelo de regresión de cada criterio de análisis, se procedió a identificar la posible existencia de outliers y datos influyentes que puedan afectar en el ajuste del modelo. En el caso de que se identifiquen datos atípicos o datos influyentes se procedió a eliminarlos de la base de datos y generar un nuevo modelo de regresión que permita un mejor ajuste.

Para la identificación de datos influyentes se utilizó la distancia de Cook y la Prueba de Bonferroni para la detección de datos atípicos.

3.3.6.1. Detección de datos influyentes

En el software R se utilizó la función “*cooks.distance*”, obteniendo un vector de valores para cada observación de la base de datos analizada. Para identificar si una observación era influyente se

determinó que observación sobrepasaba el valor correspondiente al multiplicar por cuatro el promedio de las distancias de Cook.

3.3.6.2. Detección de datos atípicos

En el software R se aplicó la función “outlierTest” para la detección de datos atípicos. Los resultados de la aplicación se analizaron en función de las hipótesis planteadas y se tuvo en cuenta que cuando no se rechazó la hipótesis nula, el resultado indicó que únicamente se trataba del residuo estudentizado más grande.

- **H₀**: la observación *i*-ésima no es un valor atípico, *p-value de Bonferroni* > 0.05
- **H₁**: la observación *i*-ésima si es un valor atípico, *p-value de Bonferroni* < 0.05

3.3.7. Identificación de datos con eventualidades - criterio técnico

Además del criterio estadístico, se analizó los datos obtenidos en las pruebas de jarras y se determinó si provienen de ensayos en donde se registró alguna eventualidad que provocó que la dosis de PAC no esté acorde a una turbiedad específica. La eventualidad más importante, consistió en considerar cuando la muestra de agua cruda presentó alguna coloración amarilla y al final del ensayo de jarras tampoco se obtuvo un buen porcentaje de remoción y color. Los datos que presentaron esta característica no fueron considerados para la construcción de la curva de dosificación de PAC, debido a que muestras de agua cruda con coloraciones amarillas pueden representar episodios de contaminación de agua ocasionales.

3.3.8. Análisis de costos

Se obtuvo los kilogramos de PAC utilizados por la PTAP para los meses de agosto y septiembre de 2021 y los meses de febrero y marzo de 2022, que representan los meses en los que se obtuvieron todos los datos para la realización del estudio. En base al costo del Kg de PAC se determinó la inversión realizada para el tiempo mencionado.

Posterior a esto se calculó las dosis promedio utilizadas para cada mes y se estimó los kg de PAC que se deberían utilizar en función del caudal base (15 L/s) y el costo del kg de PAC. Finalmente, con los costos realizados por la JAAPRB y los costos estimados según los datos del estudio, se estimó si se obtiene un beneficio económico para el tiempo analizado.

Con la finalidad de estimar los datos calculados para un mayor margen de tiempo se proyectó los cálculos a un año y se obtuvo los resultados.

3.4. Evaluación de la eficiencia del proceso de coagulación-floculación

La evaluación de la eficiencia del proceso de coagulación-floculación se realizó aplicando la metodología de superficie de respuesta (MSR).

3.4.1. Selección de factores

Los factores utilizados en la evaluación de la eficiencia del proceso de coagulación-floculación, fueron tomados de los resultados obtenidos en las pruebas de jarras. Los datos utilizados en el análisis fueron los correspondientes a los parámetros iniciales medidos (turbiedad, color, pH y temperatura) del agua cruda (Anexo 8). Además, se consideró la mejor dosificación de PAC que permitió obtener la turbiedad residual más baja (y) que representó el factor o variable dependiente a modelar.

Las variables independientes correspondieron a la turbiedad inicial (x_1), color inicial (x_2), pH inicial (x_3), temperatura inicial (x_4) y dosis de PAC (x_5). Las variables tomadas para la modelación fueron elegidas con el fin de analizar el efecto que tienen sobre la turbiedad final luego del proceso de coagulación-floculación (Apostol et al., 2011). Con fines prácticos y de redacción las variables independientes se denominaron de la siguiente manera:

- x_1 : turbiedad
- x_2 : color
- x_3 : pH
- x_4 : temperatura
- x_5 : dosis

3.4.1.1. Combinación de factores

Se analizó cuatro combinaciones iniciales diferentes de los factores elegidos para la modelación, teniendo en cuenta que la variable dosis de PAC (x_5) fue una variable fija, en todas las combinaciones realizadas, ya que representa la única variable controlable para la modelación y, además, es una variable de campo que influye en el tratamiento de agua cruda para la remoción de turbiedad.

- **Primera combinación:** x_1, x_2, x_3, x_5
- **Segunda combinación:** x_1, x_2, x_4, x_5
- **Tercera combinación:** x_1, x_3, x_4, x_5
- **Cuarta combinación:** x_2, x_3, x_4, x_5

3.4.2. Creación de modelos matemáticos

La creación de los primeros cuatro modelos matemáticos fue realizada en el software Minitab 20.3 que permite aplicar de manera más sencilla la MSR. Dentro del programa se obtuvo los modelos aplicando los cuatro diseños diferentes posibles. Estos diseños corresponden al análisis de un modelo cuadrático completo o de segundo orden, modelo lineal más interacciones, modelo lineal más cuadrados y un modelo lineal o de primer orden (Montgomery & Runger, 2014).

3.4.2.1. Ajuste de modelos matemáticos

De los resultados obtenidos para los primeros cuatro modelos, se observó los *p-values* y se determinó si los términos del modelo son estadísticamente significativos, en base a las siguientes hipótesis:

- $H_0: B_0 = 0 \rightarrow$ el término del modelo es igual a cero, por lo tanto, es estadísticamente no significativo, $p\text{-value} > 0.05$

- **H₁:** $B_o \neq 0 \rightarrow$ el término del modelo es distinto de cero, por lo tanto, es estadísticamente significativo, $p\text{-value} < 0.05$

Una vez analizada la significancia estadística de los términos de cada modelo generado, se procedió a retirarlos del modelo para intentar corregir la falta de ajuste del mismo y observar cuáles son los nuevos resultados obtenidos. Cada modelo generado se comparó mediante el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado), coeficiente de determinación de predicción (R^2 pred) y la desviación estándar muestral, finalmente de los resultados obtenidos se escogió los mejores modelos.

3.4.2.2. Análisis de sensibilidad

Con los mejores modelos obtenidos del análisis anterior, se realizó un análisis de sensibilidad retirando factores de los mejores modelos y realizando nuevas combinaciones de variables, observando si se obtienen mejores resultados.

- **Primera combinación:** x_1, x_3, x_4
- **Segunda combinación:** x_1, x_3, x_5
- **Tercera combinación:** x_1, x_4, x_5
- **Cuarta combinación:** x_3, x_4, x_5
- **Quinta combinación:** x_2, x_3, x_4
- **Sexta combinación:** x_2, x_3, x_5
- **Séptima combinación:** x_2, x_4, x_5

3.4.3. Análisis de modelos matemáticos

Una vez realizado el análisis de todas las combinaciones de variables descritas en los apartados anteriores, se eligió el mejor modelo matemático predictivo de la turbiedad final luego del proceso de coagulación-floculación simulado en las pruebas de jarras. El mejor modelo fue el que obtuvo mejores resultados en cuanto al R^2 pred y R^2 ajustado como orden de prioridad (Frost, 2013).

3.4.3.1. Elección del mejor modelo

Una vez obtenido el mejor modelo de la primera fase de modelación se procedió a realizar nuevas corridas de modelos, identificando observaciones atípicas en los resultados y retirando términos estadísticamente no significativos. Esta forma de modelar permitió encontrar el mejor modelo de predicción de la turbiedad residual. Del mejor modelo matemático elegido se determinó la raíz del error medio cuadrático (RMSE) y el error medio cuadrático (MSE), finalmente se comparó estos resultados del modelo calibrado con los resultados de la validación del modelo.

3.4.3.2. Análisis de residuos

En el software RStudio se creó el mejor modelo predictivo encontrado anteriormente y se procedió a calcular los residuos generados por el modelo. Posterior a esto se exploró de forma gráfica la distribución de los residuos y finalmente se utilizó dos pruebas estadísticas (prueba de Kolmogorov-Smirnov y prueba de Kolmogorov-Smirnov con la corrección de Lilliefors debido a que el tamaño de la muestra fue superior a 50), para determinar si los residuos provienen de una distribución normal en base a las siguientes hipótesis:

- **H₀**: los residuos del modelo siguen una distribución normal, $p\text{-value} > 0.05$
- **H₁**: los residuos del modelo no siguen una distribución normal, $p\text{-value} < 0.05$

3.4.3.3. Gráficas de superficie de respuesta y contorno del modelo matemático

Las gráficas de superficie de respuesta y gráficas de contorno fueron generadas en el software Minitab 20.3, considerando como base el mejor modelo matemático encontrado en los apartados descritos anteriormente.

3.4.3.4. Validación externa del modelo matemático

Para validar el modelo se recolectó 23 nuevas muestras de agua cruda a la entrada del proceso de tratamiento y en la salida del proceso de sedimentación durante dos días, con el fin de obtener nuevos datos para las variables implicadas en el mejor modelo matemático. Se reemplazó estos datos en la ecuación que describe al modelo y se determinó si los residuos del modelo están distribuidos normalmente, para lo cual se aplicó la prueba estadística de Shapiro Wilks debido a que la nueva base de datos fue menor a 50. Así mismo, se determinó la raíz del error medio cuadrático (RMSE) y el error medio cuadrático (MSE).

4. Resultados

4.1. Realización de las pruebas de jarras usando policloruro de aluminio

Los resultados de la realización de las pruebas de jarras durante las épocas de invierno y verano se detallan en el Anexo 3. En la Tabla 7 se muestran las velocidades de agitación en rpm utilizadas en el equipo de jarras, estas velocidades tienen relación con el gradiente de velocidad del diseño de la unidad de floculación de flujo horizontal.

*Tabla 7. Parámetros para la simulación en los ensayos de jarras
Fuente: Autores basado en (Arboleda, 2000; García Altamirano, 2018)*

Zona	Tiempo de retención (minutos)	Gradiente de velocidad (s^{-1})	Velocidad de agitación (rpm)
Inicial	4	60	65
Intermedia	6	35	42
Final	10	25	35

4.1.1. Remoción de turbiedad del agua cruda

A continuación, se presenta la remoción de la turbiedad del agua cruda de la mejor jarra de cada ensayo realizado durante el desarrollo experimental. Estos resultados permitieron construir la base de datos utilizada para la creación de la curva de dosificación de PAC. Los resultados de la remoción de turbiedad se muestran en la Tabla 8.

Si se analiza el porcentaje de remoción general el promedio indica que durante todas las pruebas de jarras realizadas se alcanzó un porcentaje de remoción del 93.73%. Además de aquello, es necesario indicar que este es el primer estudio en donde se obtuvieron datos de policloruro de aluminio para el agua cruda que trata la Planta de Potabilización de Bayas.

Si se analiza la normativa de calidad del agua potable establecida en la NTE INEN 1108, se indica que el valor máximo de turbiedad para agua de consumo humano no debe ser superior a 5 NTU. Se debe tener en cuenta que la Planta de Potabilización opta por no tratar agua cruda con valores de turbiedad superior a 1000 NTU, sin embargo, con este estudio ya existe una referencia de cuál debería ser las dosis para elevados niveles de turbiedad. Entonces se puede decir que el 96.83% de los ensayos si cumplen con la normativa de calidad del agua y además este proceso representa únicamente a la floculación, coagulación y sedimentación, entendiéndose que con los procesos posteriores de prefiltración y filtración rápida se lograría reducir aún más la turbiedad final del agua.

Tabla 8. Resultados de la remoción de turbiedad de la mejor jarra de cada ensayo

Fuente: Autores

N° de Ensayo	Turbiedad Inicial (NTU)	Turbiedad Final (NTU)	% Remoción	N° de Ensayo	Turbiedad Inicial (NTU)	Turbiedad Final (NTU)	% Remoción
1	6.23	1.67	73.19%	33	142	2.32	98.37%
2	8.16	1.22	85.05%	34	142	3.82	97.31%
3	10.8	1.23	88.61%	35	144	2.45	98.30%
4	10.8	1.5	86.11%	36	150	4.5	97.00%
5	11	2.18	80.18%	37	150	1.44	99.04%
6	11.2	2.61	76.70%	38	164	0.808	99.51%
7	11.2	2.88	74.29%	39	204	2.27	98.89%
8	11.2	1.42	87.32%	40	248	2.09	99.16%
9	11.9	2.05	82.77%	41	248	2.26	99.09%
10	12.1	2.77	77.11%	42	293	4.3	98.53%
11	12.1	3.66	69.75%	43	293	0.642	99.78%
12	13	1.97	84.85%	44	293	0.351	99.88%
13	13.4	1.98	85.22%	45	300	1.29	99.57%
14	15	2.87	80.87%	46	300	1.4	99.53%
15	15	3.17	78.87%	47	350	1.58	99.55%
16	30.1	3.7	87.71%	48	350	1.69	99.52%
17	46.1	10.1	78.09%	49	492	0.658	99.87%
18	46.1	3.82	91.71%	50	521	0.606	99.88%
19	47.1	1.9	95.97%	51	585	0.967	99.83%
20	50	2.19	95.62%	52	617	0.755	99.88%
21	50	1.51	96.98%	53	685	3.24	99.53%
22	50.3	2.9	94.23%	54	900	2.6	99.71%
23	50.3	3.13	93.78%	55	1410	2.13	99.85%
24	61.8	1.2	98.06%	56	2210	2.88	99.87%
25	61.8	1.25	97.98%	57	2580	1.59	99.94%
26	81.4	3.37	95.86%	58	3010	0.987	99.97%
27	107	1.23	98.85%	59	3520	2.19	99.94%
28	107	1.28	98.80%	60	4150	9.14	99.78%
29	110	3.29	97.01%	61	4150	8.17	99.80%
30	111	4.07	96.33%	62	4830	0.766	99.98%
31	131	2.15	98.36%	63	6030	3.11	99.95%
32	131	2.49	98.10%	Promedio		2.472	93.73%

En las figuras 45 a 49 se muestra el comportamiento de la turbiedad del agua cruda y agua tratada en cada ensayo de jarras.

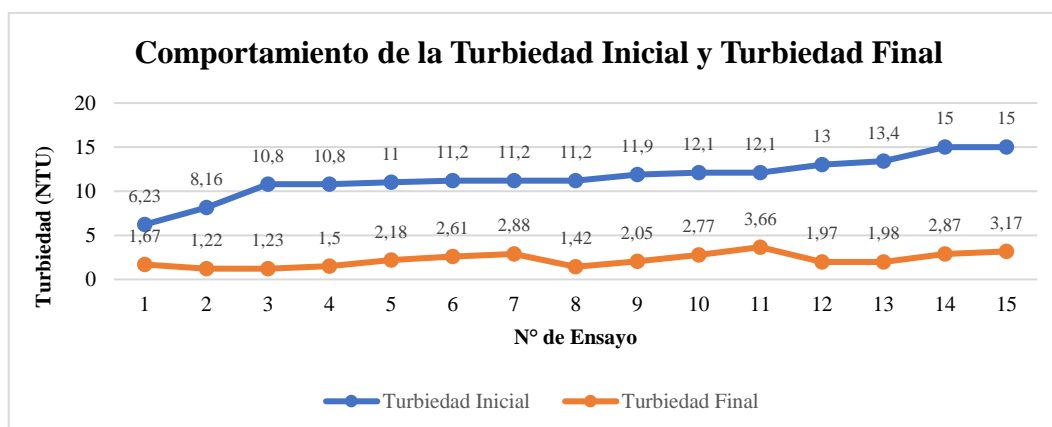


Figura 45. Comportamiento de la Turbiedad Inicial y Turbiedad Final. Ensayo 1 al 15

Fuente: Autores

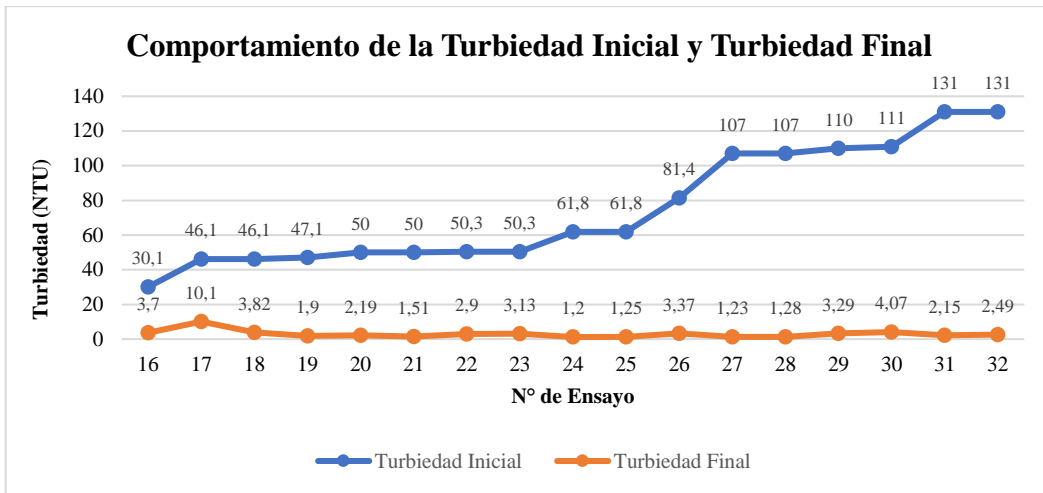


Figura 46. Comportamiento de la Turbiedad Inicial y Turbiedad Final. Ensayo 16 al 32
Fuente: Autores

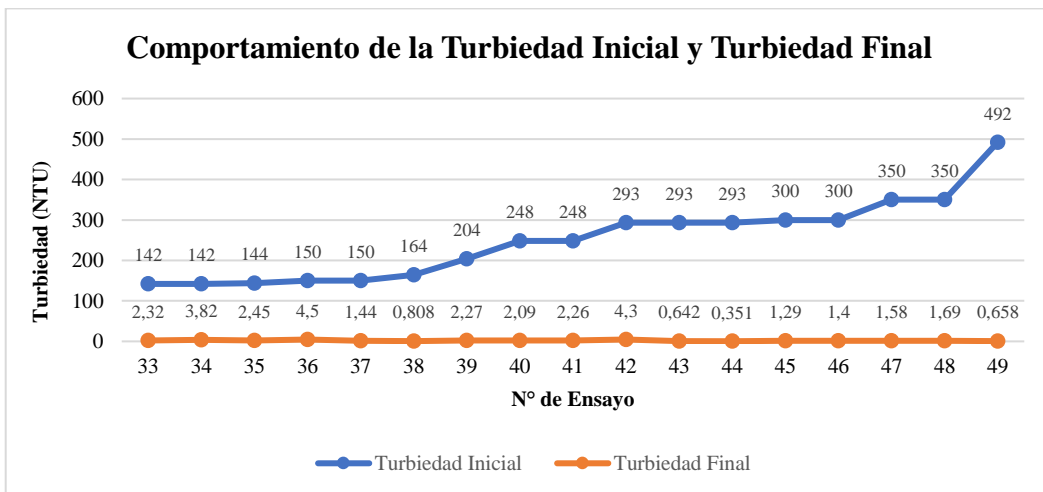


Figura 47. Comportamiento de la Turbiedad Inicial y Turbiedad Final. Ensayo 33 al 49
Fuente: Autores

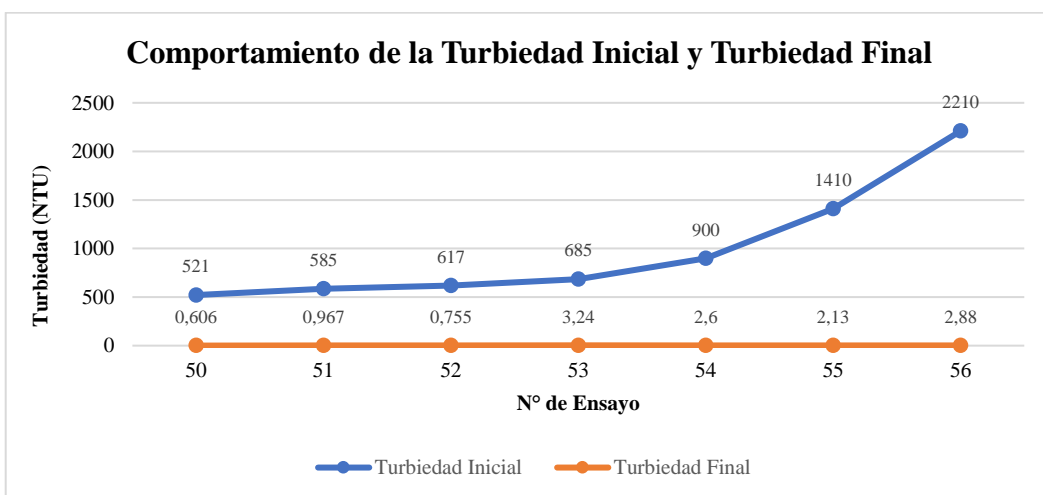


Figura 48. Comportamiento de la Turbiedad Inicial y Turbiedad Final. Ensayo 50 al 56
Fuente: Autores

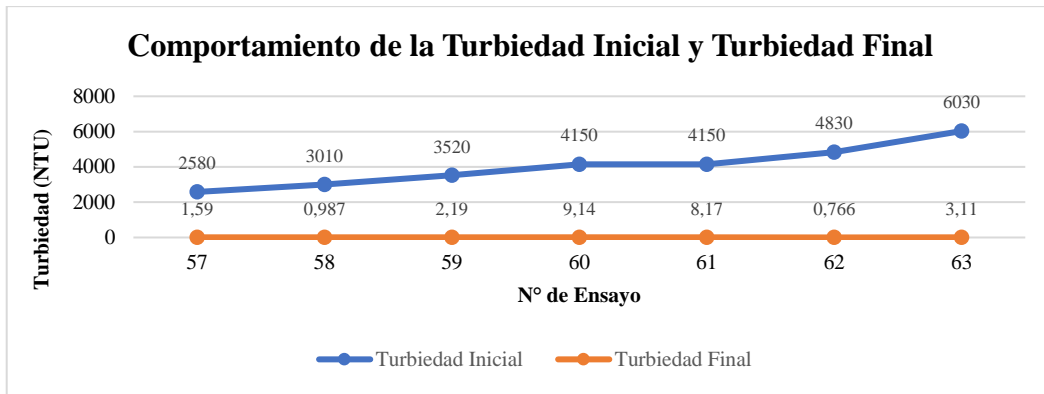


Figura 49. Comportamiento de la Turbiedad Inicial y Turbiedad Final. Ensayo 57 al 63
Fuente: Autores

4.1.2. Comportamiento de pH

Los resultados del análisis del pH antes y después de las pruebas de jarras su muestran en la Figura 50. Se observa el diagrama de dispersión entre el pH vs la dosis de PAC (mg/L) aplicada; este resultado indicó que conforme la dosis de coagulante aumenta el pH final disminuye, sin embargo, las dosificaciones de PAC aplicadas estabilizan el pH del agua hasta una dosis máxima de 40 mg/L. Se observa también que existen pocos puntos cercanos a un pH de 6.5.

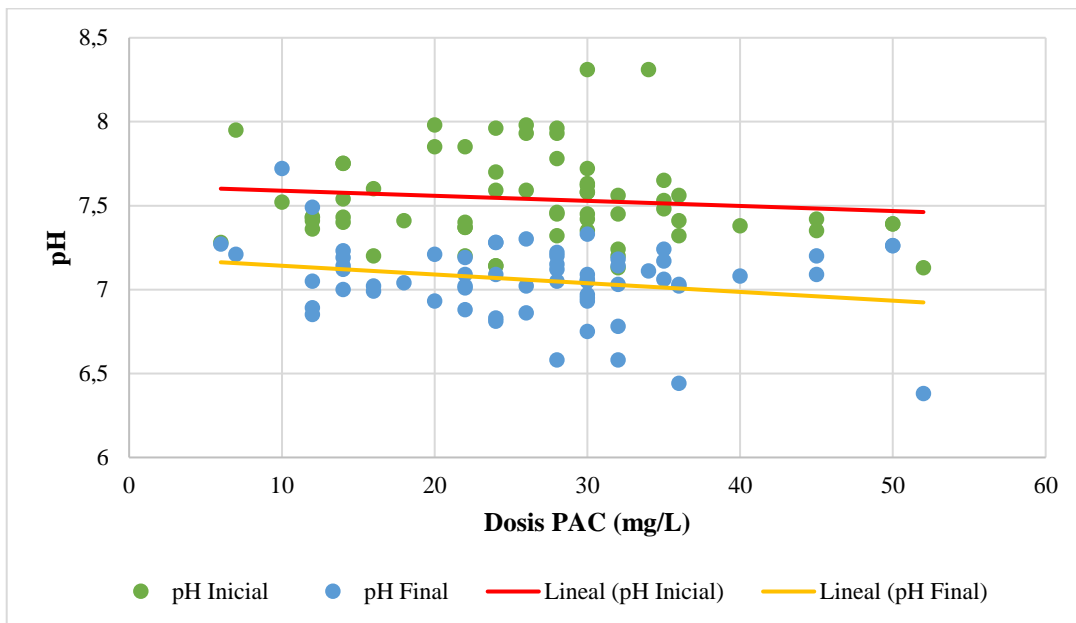


Figura 50. Comportamiento del pH inicial y final en función de la dosis de PAC utilizada
Fuente: Autores

Los resultados indicaron que la variación de pH fue de 0.48, en relación a que el promedio del pH del agua cruda fue de 7.54, mientras que luego de los ensayos de jarras el promedio del pH equivalió a 7.06 acercándose al pH neutro, esto se muestra en la Figura 51.

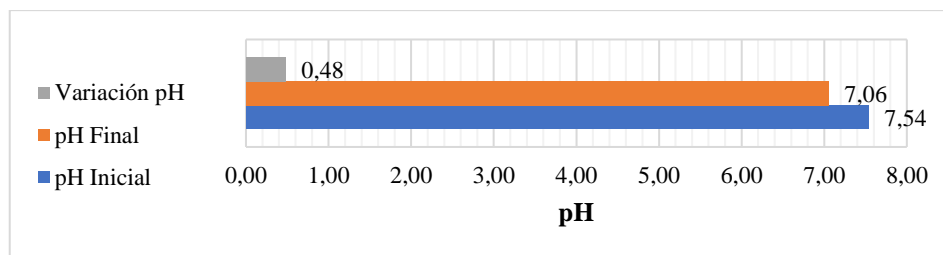


Figura 51. Variación de pH

Fuente: Autores

En la Tabla 9 se muestra la comparación del comportamiento del pH con otros estudios en donde se utilizó sulfato de aluminio como coagulante. Se puede observar que dependiendo del rango de turbiedad del estudio se empleó diferentes rangos de dosis de SA, de tal modo que los valores de pH iniciales y finales también son diferentes. Los resultados obtenidos por Pérez (2015) mostraron que se dio una disminución del pH de 0.68, mientras que los resultados de Galindo (2018) aumentaron el pH del agua en 0.17. Así mismo, los resultados obtenidos por Mora & Sagal (2019) indicaron que el pH disminuyó 1.16 unidades y finalmente los resultados obtenidos por Izquierdo (2015) indicaron que el pH disminuyó 0.31 unidades.

Los resultados obtenidos por Restrepo (2009) indicaron que al aplicar SA como coagulante el pH de agua disminuyó 1.16 unidades, mientras que cuando se aplicó PAC el pH disminuyó solo 0.17 unidades para un agua cruda de 87 NTU. Con los datos mostrados en la Tabla 9, se evidencia que, al utilizar coagulantes convencionales como el sulfato de aluminio, las variaciones de pH están en valores de 0.31 a 1.16, mientras que al utilizar coagulantes alternativos como PAC las variaciones de pH disminuyen en rango de 0.17 a 0.48 unidades.

Tabla 9. Comparación del comportamiento del pH con otros estudios

Fuente: Autores de los estudios

Autor	Rango de Turbiedad (NTU)	Rango de dosis de SA (mg/L)	pH Inicial	pH Final	Variación pH
(Restrepo, 2009)	87	40 - 50	7.37	6.21	1.16
(Izquierdo, 2015)	12.9 - 835	20 - 60	7.36	7.04	0.31
(Pérez Garay, 2015)	8.2 - 894.2	16 - 62	8.14	7.46	0.68
(Galindo, 2018)	4 - 11.2	25 - 34	8.00	8.17	0.17
(Mora & Sagal, 2019)	15 - 690	25 - 130	7.78	6.62	1.16
Autor	Rango de Turbiedad (NTU)	Rango de dosis de PAC (mg/L)	pH Inicial	pH Final	Variación pH
(Restrepo, 2009)	87	20 - 35	7.37	7.2	0.17
(Patiño & Vallejo, 2022)	6.23 - 6030	6 - 52	7.54	7.06	0.48

En el estudio realizado por Wei et al. (2015) se utilizó PAC como coagulante y se aplicó un rango de dosificación de 0.125 a 275 mg/L aproximadamente para dos muestras de agua diferentes con un valor inicial de pH de 7.6 y 9.3 respectivamente. Los resultados obtenidos indicaron que para el

primer caso la variación de pH fue de 1 unidad en un rango de dosificación de 0.125 hasta 32 mg/L aproximadamente y al aplicar dosis superiores hasta 275 mg/L los valores finales de pH disminuyen considerablemente de 6 a 4.5 unidades de pH (Wei et al., 2015). Para el segundo caso con un pH inicial de 9.3, los resultados indicaron que el pH disminuyó hasta un valor de 7 (pH neutro), y al aplicar dosis de PAC más elevadas hasta 275 mg/L, los valores finales de pH se redujeron considerablemente al igual que en el primer caso con valores de 7 a 4.5 unidades de pH. Los resultados del presente estudio (Figura 51) se asemejan a lo obtenido por Wei et al. (2015).

4.1.3. Determinación de la dosis óptima de policloruro de aluminio

Para obtener la dosis óptima de PAC se priorizó usar dosificaciones menores a 30 mg/L para el segundo criterio de análisis y dosis mayores a 30 mg/L para el tercer criterio de análisis, esto fue debido a que los resultados de las pruebas de jarras indicaban que aplicar dosis mayores o menores a 30 mg/L para el segundo y tercer criterio de análisis respectivamente no se obtenían buenos resultados para la remoción de turbiedad. La determinación de la dosis óptima de PAC abarcó ensayos de jarras con muestras de agua en un rango de turbiedad de 6.23 a 6030 NTU con dosificaciones del coagulante desde 6 hasta 52 mg/L. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 12.

4.1.4. Determinación de la dosis óptima de polímero catiónico

Tal como se mencionó en la metodología se determinó una única dosis de PC para tratar agua cruda en cualquier nivel de turbiedad. Los resultados de los ensayos de jarras realizados con PAC y PC se muestran en la Tabla 10; las dosis de 0.055 y 0.075 mg/L aparecieron en mayor proporción.

Tabla 10. Base de datos obtenida para la selección de la dosis óptima de polímero catiónico
Fuente: Autores

Nº de Ensayo	Turbiedad del agua cruda (NTU)	Dosis de PAC (mg/L)	Dosis de polímero (mg/L)	Nº de Ensayo	Turbiedad del agua cruda (NTU)	Dosis de PAC (mg/L)	Dosis de polímero (mg/L)
1	11.9	16	0.055	11	900	28	0.075
2	31.7	20	0.025	12	1600	35	0.035
3	47.1	30	0.055	13	2240	35	0.075
4	144	22	0.075	14	2330	38	0.055
5	164	24	0.055	15	2580	30	0.055
6	248	28	0.030	16	3010	35	0.075
7	248	20	0.040	17	3520	40	0.075
8	521	32	0.075	18	4150	40	0.055
9	617	30	0.035	19	4830	45	0.065
10	685	30	0.035	20	6030	45	0.045

Se determinó que la dosis de 0.075 mg/L es la dosis óptima de polímero ya que al aplicar esta dosis de 0.075 mg/L se obtuvieron mejores resultados en base al porcentaje de remoción. Cuando se aplicó una dosis de 0.055 mg/L se obtuvo que el porcentaje promedio de remoción fue 97.30%, mientras que el porcentaje promedio de remoción cuando se aplicó 0.075 mg/L fue 98.23%; además de esto se observa que la dosis de 0.075 mg/L (Tabla 11) funcionó mejor en turbiedades superiores a 1000

NTU. Por lo tanto, se determinó que 0.075 mg/L fue la dosis óptima de polímero catiónico. Estos resultados fueron similares a los encontrados por Calle & Zambrano (2015).

Tabla 11. Resultados de la remoción de la turbiedad de la mejor jarra en cada ensayo con polímero
Fuente: Autores

N° de Ensayo	Turbiedad Inicial (NTU)	Turbiedad Final (NTU)	% Remoción	N° de Ensayo	Turbiedad Inicial (NTU)	Turbiedad Final (NTU)	% Remoción
1	11.9	2.51	97.49%	11	900	4.00	96.00%
2	31.7	8.73	91.27%	12	1600	0.56	99.44%
3	47.1	1.93	98.07%	13	2240	1.40	98.60%
4	144	2.43	97.57%	14	2330	2.25	97.75%
5	164	1.50	98.50%	15	2580	7.04	92.96%
6	248	1.42	98.58%	16	3010	1.52	98.48%
7	248	0.90	99.10%	17	3520	0.71	99.29%
8	521	0.58	99.42%	18	4150	0.99	99.01%
9	617	1.03	98.97%	19	4830	0.34	99.66%
10	685	0.87	99.13%	20	6030	0.98	99.00%

4.1.5. Construcción de la base de datos para la dosis óptima de PAC

A partir de los datos obtenidos de todos los ensayos de jarras (Anexo 3), tal como se indicó en el análisis del porcentaje de remoción, se determinó cuál es la mejor dosis para cada nivel de turbiedad del agua cruda. En la Tabla 12 se muestra la base de datos utilizada para la construcción de la curva de dosificación de policloruro de aluminio.

Tabla 12. Base de datos obtenida para la construcción de la curva de dosificación de PAC
Fuente: Autores

N° Ensayo	Turbiedad (NTU)	Dosis (mg/L)	N° Ensayo	Turbiedad (NTU)	Dosis (mg/L)	N° Ensayo	Turbiedad (NTU)	Dosis (mg/L)
1	6.23	10	22	50.3	26	43	293	22
2	8.16	6	23	50.3	26	44	293	32
3	10.8	14	24	61.8	20	45	300	24
4	10.8	22	25	61.8	22	46	300	26
5	11	10	26	81.4	28	47	350	36
6	11.2	12	27	107	24	48	350	32
7	11.2	12	28	107	24	49	492	30
8	11.2	14	29	110	32	50	521	32
9	11.9	16	30	111	36	51	585	26
10	12.1	18	31	131	20	52	617	30
11	12.1	12	32	131	28	53	685	28
12	13	7	33	142	28	54	900	28
13	13.4	10	34	142	24	55	1410	35
14	15	14	35	144	20	56	2210	35
15	15	14	36	150	32	57	2580	30
16	30.1	30	37	150	52	58	3010	35
17	46.1	30	38	164	24	59	3520	40
18	46.1	30	39	204	22	60	4150	50
19	47.1	28	40	248	20	61	4150	50
20	50	28	41	248	28	62	4830	45
21	50	36	42	293	16	63	6030	45

Nota: Todas las turbiedades representan los valores medidos de las muestras de agua cruda y sus respectivas dosis óptimas de policloruro de aluminio

4.2. Elaboración de la curva de dosificación de Policloruro de Aluminio

4.2.1. Creación de la curva de dosificación de policloruro de aluminio

En la Figura 52 se muestra el diagrama de dispersión creado a partir de la base de datos mostrada en la Tabla 12. Se puede observar que no existen muchos datos para el análisis de turbiedades elevadas, esto debido a que no se logró obtener más de 15 muestras con turbiedades superiores a 1000 NTU. Sin embargo, la recolección de estas muestras de agua con turbiedades elevadas permitió analizar también cómo se comportan el coagulante PAC en rangos elevados de turbiedad.

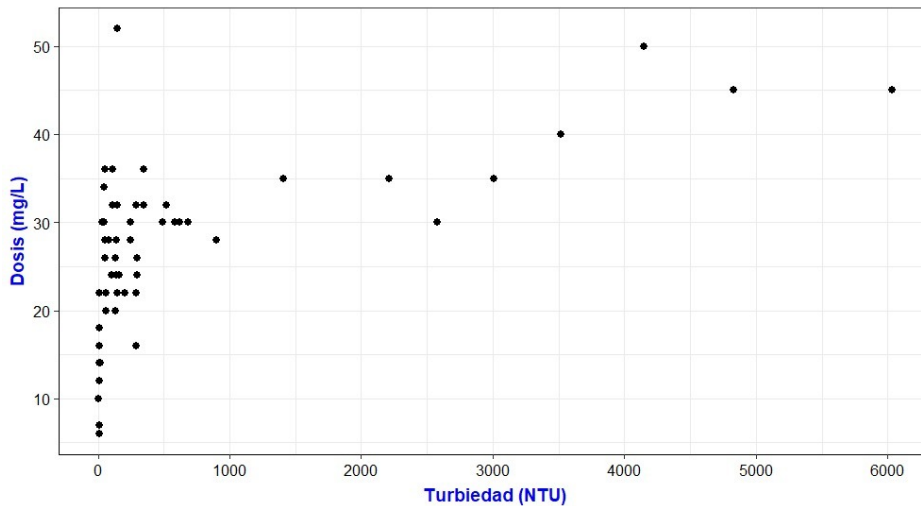


Figura 52. Gráfico de dispersión - Rango de turbiedad completa (6.23 - 6030 NTU)
Fuente: Autores

Se aplicó tres modelos de regresión (lineal, polinómico y logarítmico) para determinar cuál es el modelo que mejor se ajusta a los datos de las pruebas de jarras, con el fin de construir la curva de dosificación de PAC en función de los 3 criterios mencionados en la metodología. El resultado de este análisis para los distintos modelos de regresión se muestra en las Figuras 53 a la 55.

La Figura 53 representa el ajuste de un modelo de regresión lineal para el primer criterio de análisis, mismo que representa la construcción de la curva de dosificación de PAC con el rango de turbiedad completo obtenido. Se puede observar que existen datos muy agrupados en turbiedades inferiores y, por lo tanto, el modelo de regresión lineal no logra ajustarse adecuadamente. Esto se evidencia con el resultado del coeficiente de determinación, mismo que tiene un valor de 0.3948, informando que este ajuste solo explica el 39.48% de los datos y varianza, y existe un 60.52% de datos y varianza que no son explicados por el modelo de regresión lineal.

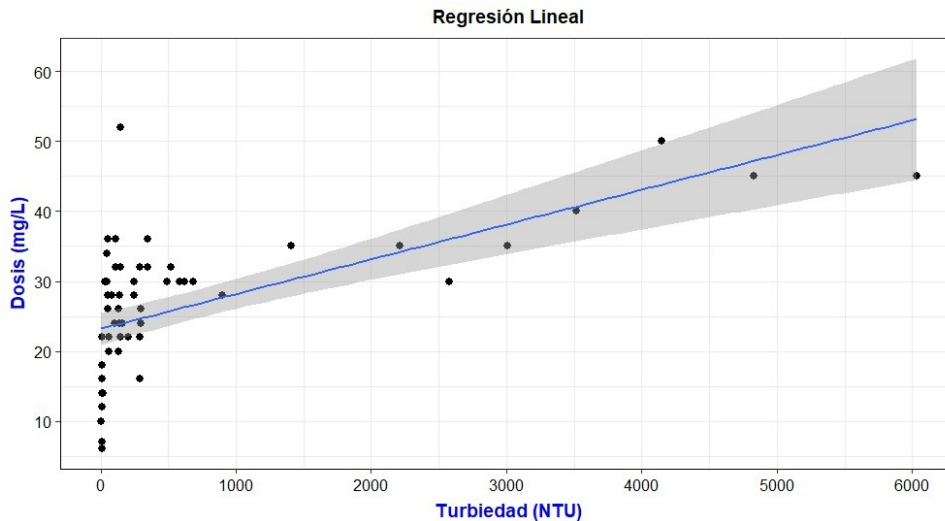


Figura 53. Ajuste de regresión lineal - Rango de turbiedad completa (6.23 - 6030 NTU)
Fuente: Autores

El resultado de la desviación estándar de los residuos del modelo lineal es igual a 8.12, este valor sirvió para comparar este modelo con los otros dos tipos de ajuste. Debido a que el coeficiente de determinación de este modelo es muy bajo se descarta este ajuste para la construcción de la curva de dosificación de PAC, además de que es necesario tener en cuenta que en turbiedades bajas las dosificaciones de PAC son muy variables y por lo tanto un ajuste lineal crearía deficiencias en el tratamiento del agua cruda.

La Figura 54 muestra el ajuste de un modelo polinómico de sexto grado para el primer criterio de análisis. Los resultados de este ajuste mostraron que el coeficiente de determinación fue superior a cuando se realizó un ajuste lineal, alcanzando un valor de 0.5366 indicando que este modelo explica el 53.66% de los datos y varianza, por otro lado, existe un 46.34% de datos y varianza que no es explicada por el modelo. De manera análoga el error estándar residual es igual a 7.415, y por lo tanto es menor al error estándar residual del ajuste lineal catalogándose estadísticamente como un mejor modelo de regresión. Cabe recalcar que se optó por utilizar un modelo polinómico de grado 6 debido a que cuando se aumentaba o disminuía el grado del modelo se obtenían peores resultados de ajuste.

Si bien este modelo de regresión tiene mejores resultados estadísticos que el modelo lineal, no es posible aceptarlo como la curva de dosificación de PAC para el primer criterio de análisis, debido a que se observa que la dosis del coagulante no se ajusta gráficamente a los datos obtenidos y mantiene una forma ondulada en su trayectoria, la cual indica que la dosis es muy variable para turbiedades altas y esto no representa la realidad de lo que sucede en las pruebas de jarras. Razón por la cual se aplicó la regresión logarítmica, misma que se aceptó como el mejor ajuste para la construcción de la curva de dosificación de PAC.

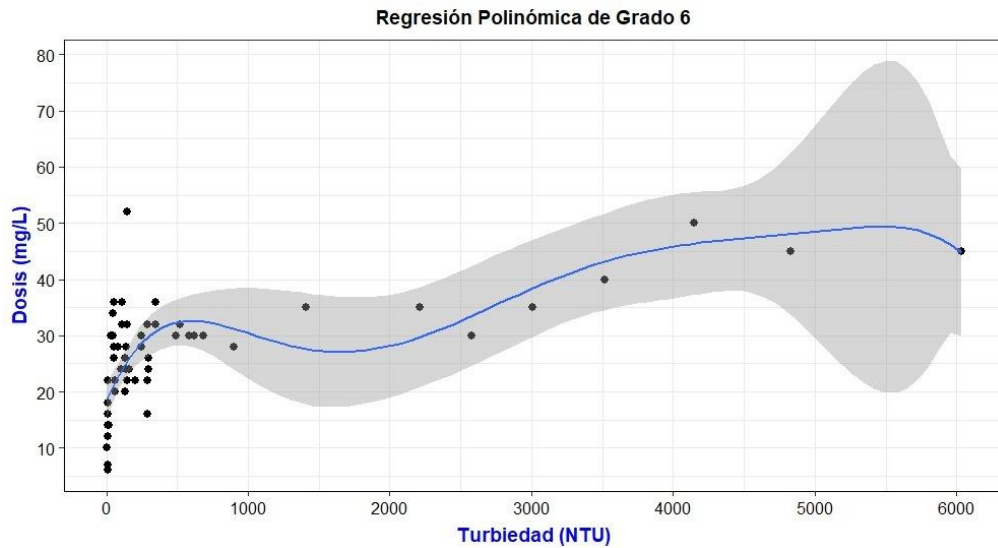


Figura 54. Ajuste de regresión polinómica de grado 5 - Rango de turbiedad completa (6.23 - 6030 NTU)
Fuente: Autores

La Figura 55 muestra el ajuste de un modelo de regresión logarítmica para el primer criterio de análisis. Los resultados de este modelo indicaron que el coeficiente de determinación fue igual a 0.6067 por lo tanto, este ajuste explica el 60.67% de los datos y varianza, en contra de un 39.33% de datos y varianza que no son explicados por el mismo. De igual manera, el error estándar residual corresponde al menor valor obtenido de los tres modelos de regresión, mismo que tiene un valor de 6.546. Se observa que el ajuste del modelo logarítmico se acopla muy bien a los datos obtenidos y además para turbiedades elevadas mayores a 1000 NTU las dosis ya no son tan variables como en el modelo polinómico de grado 6, categorizando al ajuste logarítmico como el mejor de los tres modelos de regresión.

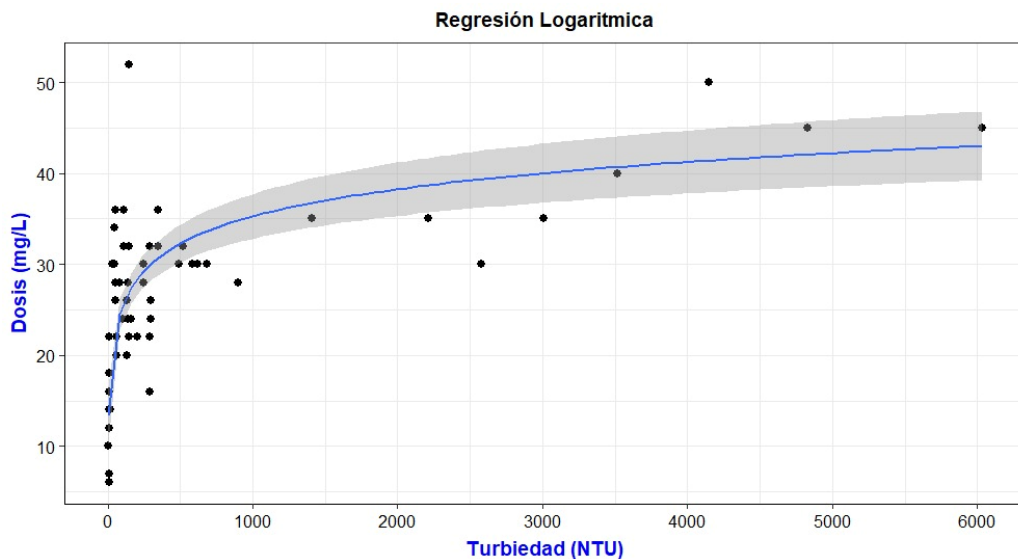


Figura 55. Ajuste de regresión logarítmica - Rango de turbiedad completa (6.23 - 6030 NTU)
Fuente: Autores

Así mismo, este tipo de ajuste suele ser empleado en la mayoría de las plantas de potabilización debido a que guarda relación con lo que sucede en campo. El resumen de los resultados obtenidos para el primer criterio de análisis se presenta en la Tabla 13, donde se aprecia que una regresión logarítmica se ajusta mejor a los datos obtenidos de las pruebas de jarras.

Tabla 13. Resultados del ajuste de modelos de regresión para el primer criterio de análisis
Fuente: Autores

Modelo	Coefficiente de determinación R^2	Error Estándar Residual RSE
Regresión Lineal	39.48%	8.12
Regresión Polinómica grado 6	53.66%	7.42
Regresión Logarítmica	60.67%	6.55

Una vez analizado el rango de turbiedad completo se procedió a obtener los resultados del ajuste del mejor modelo para un rango de turbiedad menor a 500 NTU (segundo criterio de análisis). En las Figuras 56 a 59 se observa los resultados del análisis del segundo criterio.

La Figura 56 muestra la dispersión de los datos cuando se trabaja con un rango de turbiedad menor a 500 NTU, se observa que existe un dato alejado del grupo de puntos que se encuentran agrupados.

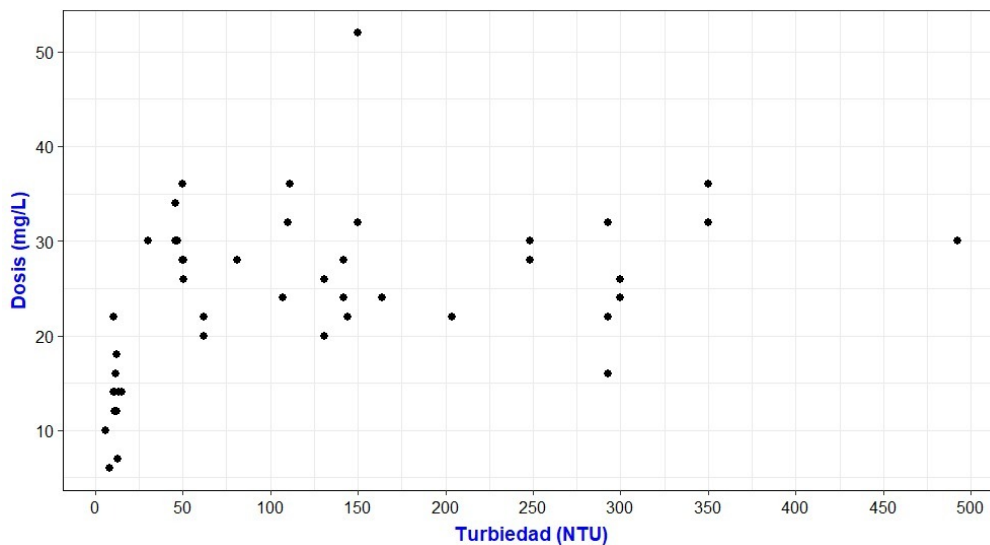


Figura 56. Gráfico de dispersión - Rango de turbiedad < 500 NTU
Fuente: Autores

La Figura 57 muestra el ajuste de regresión lineal implementado para el rango de turbiedad menor a 500 NTU. Se observa que el rango que cubre el ajuste lineal deja muchos puntos muy alejados de la recta de regresión. Desde el punto de vista estadístico, este ajuste tiene un error residual estándar de 8.182 y coeficiente de determinación de 0.1999, lo que quiere decir que este modelo no explica ni el 20% de los datos y varianza, catalogándose como un ajuste muy pobre estadísticamente. Desde el punto de vista técnico este ajuste indica que la dosis de PAC aumenta linealmente, lo cual es una

característica que no ocurre en planta, además de que para turbiedades inferiores a 50 NTU, se suele trabajar con dosis variables de PAC y este modelo no permite realizar esto.

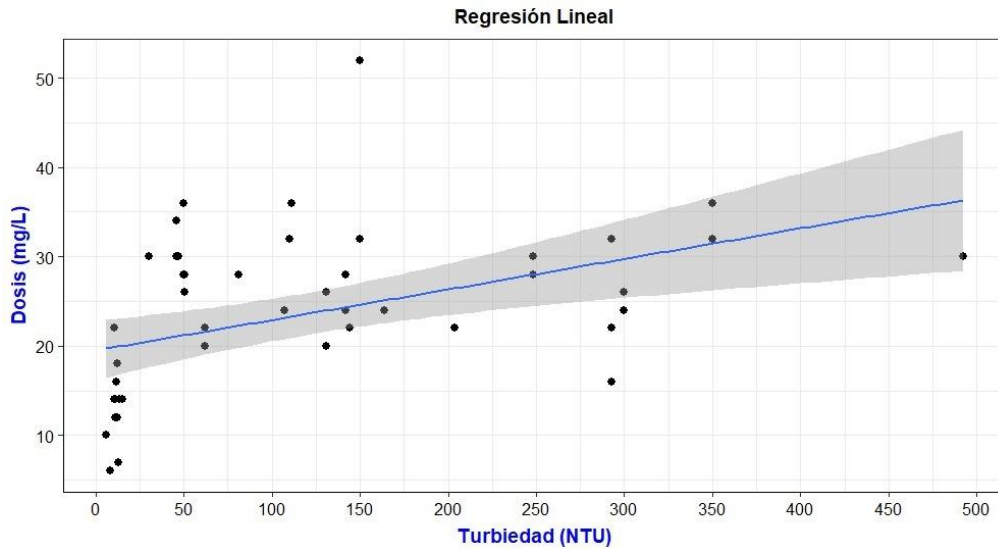


Figura 57. Ajuste de regresión lineal - Rango de turbiedad < 500 NTU
Fuente: Autores

La Figura 58 muestra el ajuste de un modelo polinómico de grado 6 para el segundo criterio de análisis. De manera análoga a lo que sucedía en el primer criterio de análisis, se probó distintos grados del modelo polinómico, sin embargo, los resultados estadísticos fueron malos, por lo tanto, se escogió un modelo polinómico de grado seis para ser analizado.

Se observa que la trayectoria del ajuste permite que la tendencia de regresión no provoque que los puntos se encuentren muy alejados de la misma; sin embargo, a partir de 350 NTU se crea un pico que dispara la dosis de PAC que debe emplearse entre 350 y 500 NTU, lo cual desde el punto de vista técnico no tiene sentido de ser implementado pues afectaría el proceso de tratamiento.

Estadísticamente este modelo tiene mejores resultados que el ajuste lineal, con valores de 0.6155 y 6 como coeficiente de determinación y error estándar residual respectivamente. El aumento del R^2 de este modelo es significativo en contra del modelo lineal, pero debido al análisis desde el punto de vista técnico no puede ser elegido como ajuste de regresión para la curva de dosificación de PAC.

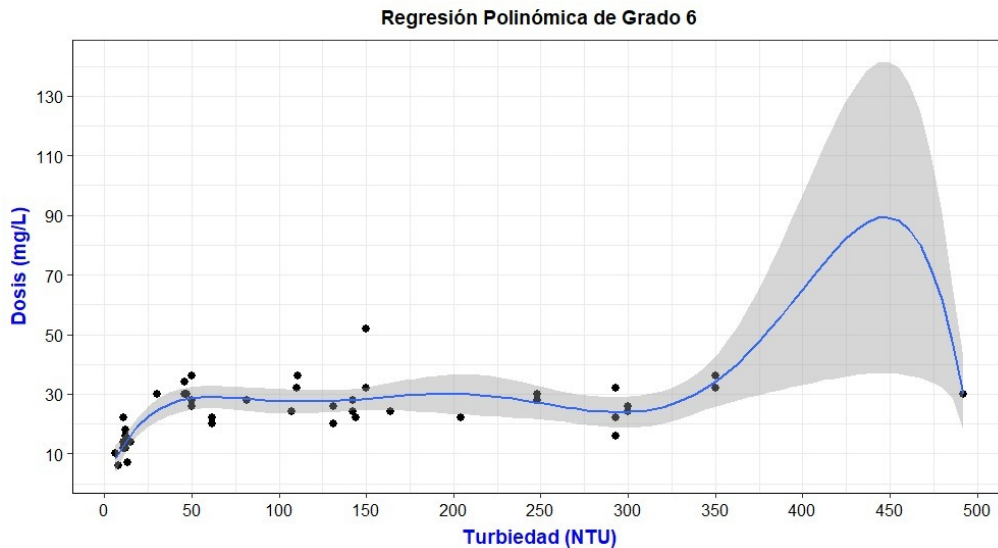


Figura 58. Ajuste de regresión polinómica de grado 6 - Rango de turbiedad < 500 NTU
Fuente: Autores

La Figura 59 muestra el ajuste de un modelo logarítmico para el segundo criterio de análisis. Se observa que existen puntos alejados de la tendencia de regresión. Los resultados estadísticos de este ajuste revelaron que el error estándar residual tiene un valor de 6.891 y el coeficiente de determinación equivale a 0.4324, lo cual indica que este modelo no explica ni siquiera el 50% de los datos y varianza.

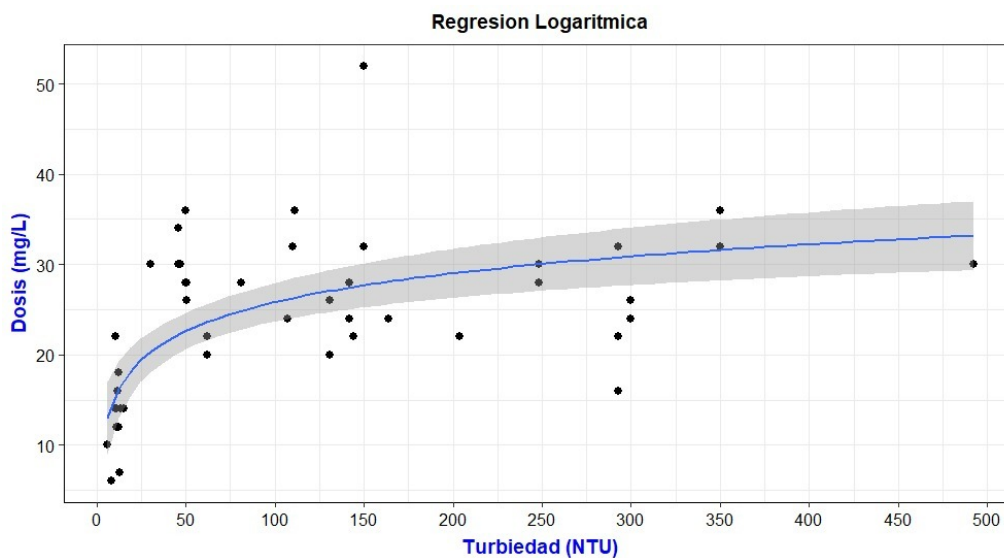


Figura 59. Ajuste de regresión logarítmica - Rango de turbiedad < 500 NTU
Fuente: Autores

Desde el punto de vista técnico se observa que, para turbiedades bajas, las dosis varían correctamente, considerando que turbiedades inferiores a 10 NTU pueden representar un problema en la dosificación de PAC, dado que poca dosificación puede no remover la turbidez del agua cruda y una sobredosificación puede aumentar el nivel de turbiedad inicial.

En el análisis del segundo criterio se realizó 3 ajustes de regresión al igual que el primer criterio, resultando que el mejor modelo es el ajuste polinómico de grado 6, sin embargo, no representa la realidad de lo que sucede en planta, debido a que mantiene una dosis constante (30 mg/L) desde 50 hasta 300 NTU, y al llegar a 350 NTU se crea un pico de dosificación que alcanzó un valor de 90 mg/L. Por lo tanto, se tomó el ajuste logarítmico como modelo base para la creación de la curva de dosificación de PAC. En la Tabla 14 se muestra el resumen de los resultados del ajuste de cada modelo.

Tabla 14. Resultados del ajuste de modelos de regresión para el segundo criterio de análisis
Fuente: Autores

Modelo	Coefficiente de determinación R^2	Error Estándar Residual RSE
Regresión Lineal	19.99%	8.18
Regresión Polinómica grado 6	61.55%	6.00
Regresión Logarítmica	43.24%	6.89

Finalmente se analizó el tercer criterio de análisis para trabajar con un rango de turbiedad superior a 500 NTU. Al igual que los otros dos criterios analizados, aquí también se trabajó con los tres modelos de regresión empleados anteriormente.

En la Figura 60 se muestra el gráfico de dispersión para el tercer criterio de análisis. Se observa que los datos corresponden únicamente a turbiedades superiores a 500 NTU alcanzado incluso un valor de más de 6000 NTU.

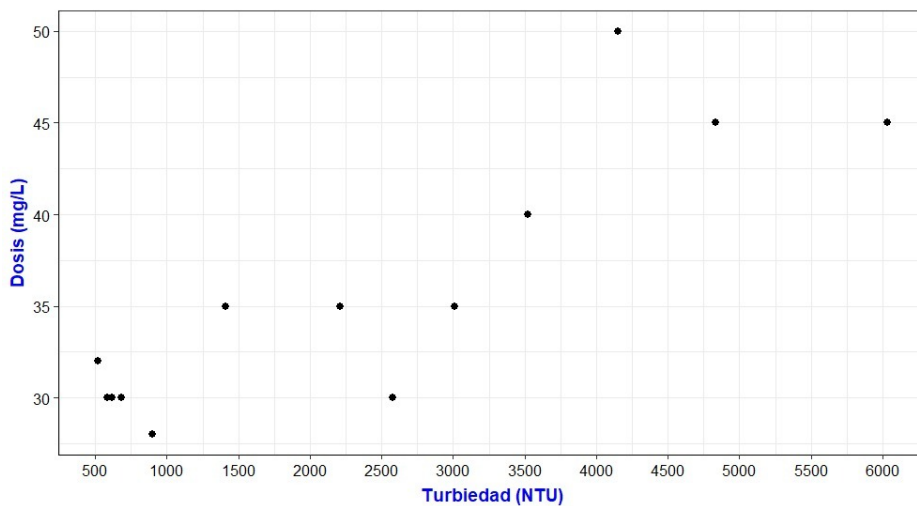


Figura 60. Gráfico de dispersión - Rango de turbiedad > 500 NTU
Fuente: Autores

La Figura 61 muestra el ajuste de regresión lineal para el tercer criterio de análisis. Se observa que la mayoría de los puntos están dentro del límite de confianza de la recta de regresión y solo tres puntos se encuentran fuera. Estadísticamente se obtuvo que la desviación estándar de los residuos

del modelo (RSE) tiene un valor de 4.173 y un coeficiente de determinación de 0.7349, lo cual indica que es un buen ajuste ya que el modelo explica el 73.49% de los datos y la varianza y hay un 26.51% de valores y varianza que no explicado por el modelo.

Desde el punto de vista técnico se observa en la Figura 61 que, por ejemplo, para tratar un agua cruda con 4000 NTU se necesita aproximadamente 43 mg/L de PAC y para 6000 NTU se necesita 48 mg/L. Este ejemplo permite observar que el ajuste lineal no trabaja muy bien ya que cuando se tratan aguas con turbiedades en el rango de miles la dosis ya no debe variar mucho, debido a que los resultados de las pruebas de jarras mostraron que la variación de la dosis desde los 1000 NTU hasta el máximo valor de turbiedad fue de 10 mg/L aproximadamente.

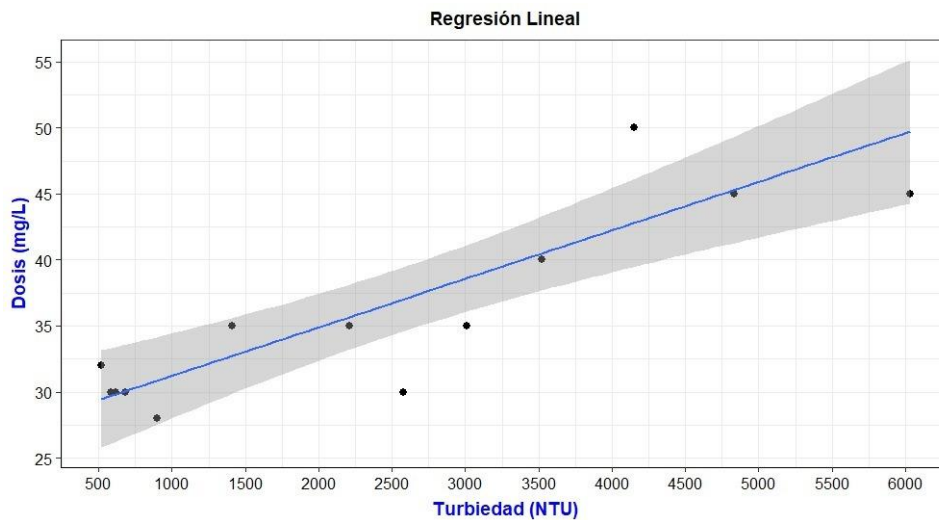


Figura 61. Ajuste de regresión lineal – Rango de turbiedad > 500 NTU
Fuente: Autores

En la Figura 62 se muestra un ajuste de regresión polinómica de grado seis. Se observa que la tendencia de regresión se ajusta a todos los puntos del diagrama de dispersión, mejorando los resultados estadísticos con un error estándar residual de 1.292 y R^2 igual a 0.9852, lo que indica que este modelo explica casi el 100% de los datos y varianza, por otro lado, solo quedaría un 1.48% que no está siendo explicado, catalogándose como un resultado estadístico muy bueno.

Además, en la Figura 62, técnicamente el modelo describe una situación que no sucedió al realizar las pruebas de jarras, pues se observa que para el rango de 3000 a 4000 NTU la dosis se eleva de 34 mg/L hasta 48 mg/L, variando mucho la dosis, y para el rango superior a 4000 NTU hasta 6000 NTU la dosis varía desde 51 mg/L hasta un pico inferior de 24 mg/L para una turbiedad de 5500 NTU aproximadamente. Estas drásticas variaciones de dosificación no permiten tratar el agua cruda correctamente, por tal razón y al igual que el segundo criterio de análisis, se descarta a la regresión polinómica como un ajuste para la curva de dosificación de PAC.

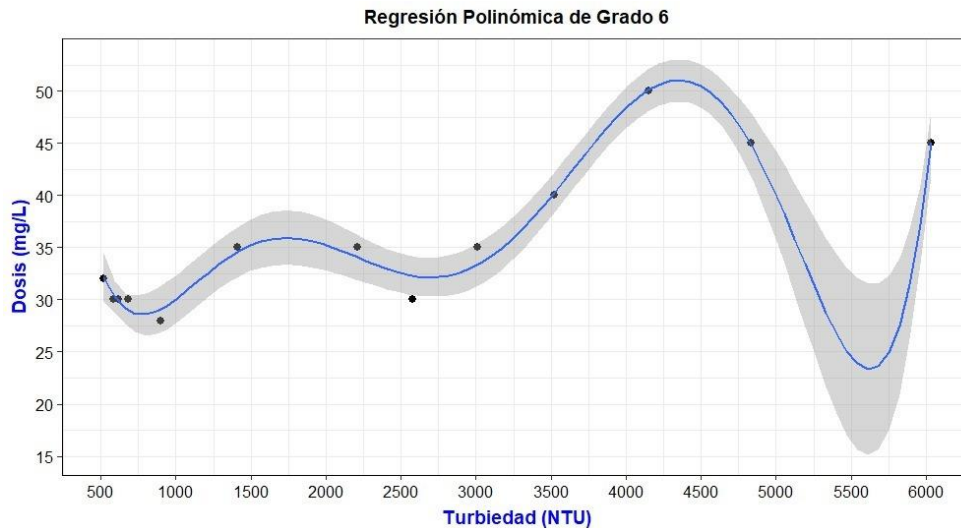


Figura 62. Ajuste de regresión polinómica de grado 6 - Rango de turbiedad > 500 NTU
Fuente: Autores

En la Figura 63 se muestra el ajuste de un modelo logarítmico para el tercer criterio de análisis. Se observa que existen 4 puntos que se encuentran fuera de la región de tendencia de regresión. Sin embargo, este ajuste si mantiene una tendencia lineal horizontal, ya que en una turbiedad de 4000 NTU se explica que debería dosificarse 43 mg/L y para 6000 NTU la dosis de PAC correspondería a 45 mg/L, estableciendo que la dosificación no está variando y se podría aplicar tanto para 4000 NTU como 6000 NTU una misma dosis de 43 mg/L. Estadísticamente los resultados indican que este modelo obtuvo un error estándar residual de 4.746 y un coeficiente de determinación de 0.6572, con lo que el modelo solo explica el 65.72% de los datos y la varianza.

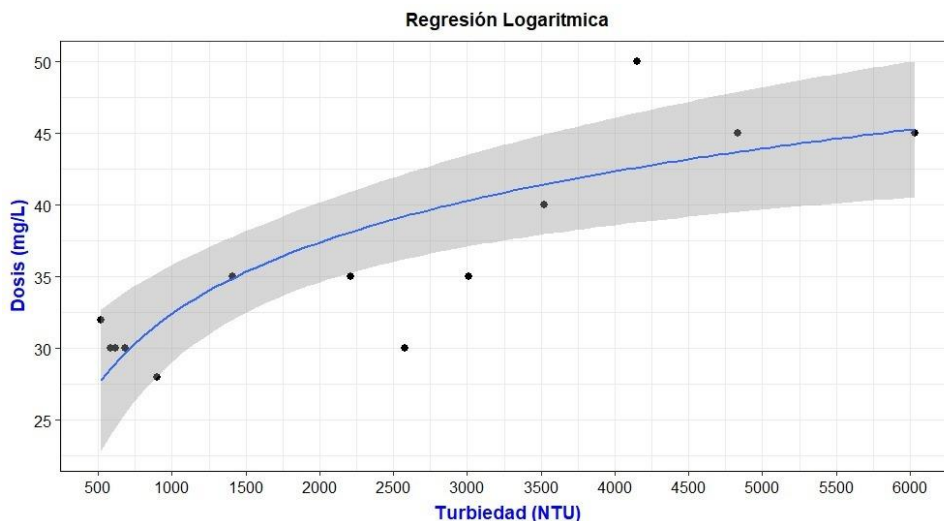


Figura 63. Ajuste de regresión logarítmica - Rango de turbiedad > 500 NTU
Fuente: Autores

Pese a que este ajuste tiene bajos resultados estadísticos, si refleja lo que sucedió en las pruebas de jarras y se lo escogió para el posterior análisis y creación de la curva de dosificación de PAC. En la Tabla 15 se muestra el resumen del análisis del tercer criterio.

Tabla 15. Resultados del ajuste de modelos de regresión para el tercer criterio de análisis

Fuente: Autores

Modelo	Coefficiente de determinación R^2	Error Estándar Residual RSE
Regresión Lineal	73.49%	4.173
Regresión Polinómica grado 6	98.52%	1.292
Regresión Logarítmica	65.72%	4.746

Con los modelos de regresión analizados según los parámetros estadísticos y técnicos se escogió que para los tres criterios de análisis el ajuste logarítmico representa más fielmente a los datos y lo que sucedió en las pruebas de jarras.

4.2.1.1. Significancia de los coeficientes de regresión

Los resultados mostrados en la Tabla 16 indicaron que en el primer criterio no fue necesario realizar un ajuste del modelo de regresión, teniendo en cuenta que ambos coeficientes de regresión son estadísticamente significativos, por lo tanto, existe evidencia suficiente para rechazar la H_0 . Los resultados del segundo criterio indican que el intercepto no es significativo en la explicación del modelo, por lo tanto, se realizó un ajuste del mismo retirando el intercepto. Así mismo, los resultados del tercer criterio indicaron que el intercepto no es estadísticamente significativo, por lo tanto, se lo retiró del modelo.

Tabla 16. Significancia de los coeficientes de regresión para el mejor ajuste de cada criterio de análisis

Fuente: Autores

Criterio	Modelo	Coefficiente de regresión	p -value
Rango de turbiedad completa	Regresión logarítmica	Intercepto	0.0201
		ln (Turbiedad)	5.64 expo (-14)
Rango de turbiedad menor a 500 NTU	Regresión logarítmica	Intercepto	0.173
		ln (Turbiedad)	2.85 expo (-7)
Rango de turbiedad mayor a 500 NTU	Regresión logarítmica	Intercepto	0.158552
		ln (Turbiedad)	0.000437

En la Figura 64 se muestra el ajuste de un modelo logarítmico luego de retirar el intercepto para el segundo criterio de análisis. El análisis estadístico de este modelo indica que el coeficiente de determinación subió a 0.925, teniendo una mejora considerable ya que anteriormente el R^2 fue de 0.4324 y además superó también al R^2 del modelo polinómico de grado 6 con un valor de 0.6155. Con este ajuste se demostró que el modelo logarítmico explica mucho mejor los datos y lo que sucede en planta.

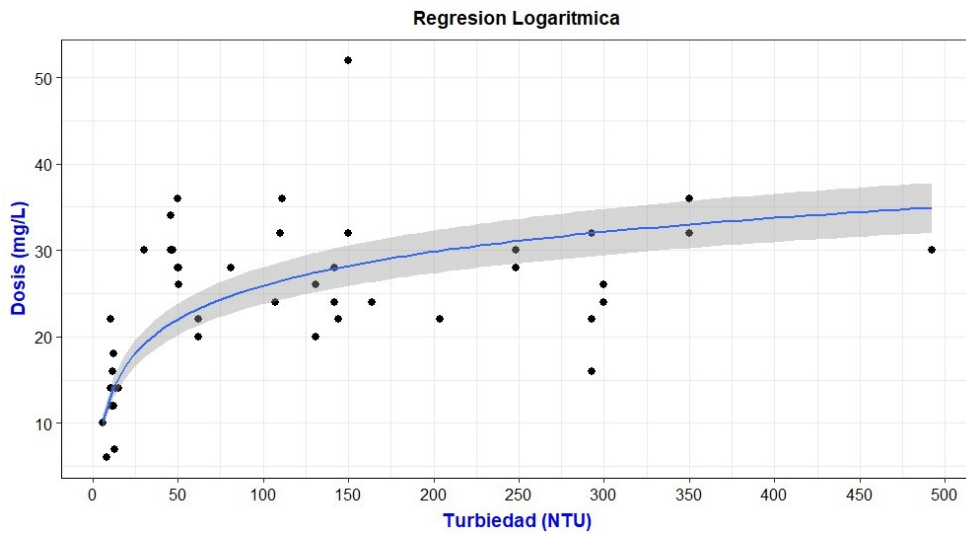


Figura 64. Regresión logarítmica con la eliminación del intercepto – Rango de turbiedad < 500 NTU
Fuente: Autores

En la Figura 65 se muestra el ajuste de un modelo logarítmico luego del retirar el intercepto para el tercer criterio de análisis. Los resultados estadísticos de este ajuste indican que este modelo explica el 98.37% de los datos y varianza ya que su R^2 es igual a 0.9837. Si se compara este resultado con el coeficiente de determinación del modelo polinómico de grado 6 se tiene que es ligeramente inferior ya que el R^2 de este modelo mencionado es igual a 0.9852, sin embargo, si se observa una mejora del modelo logarítmico, ya que cuando el intercepto estuvo presente el R^2 fue igual a 0.6572, existiendo por lo tanto una mejora considerable. Al igual que el segundo criterio de análisis, este ajuste representa muy bien a los datos obtenidos y a lo que sucede en planta.

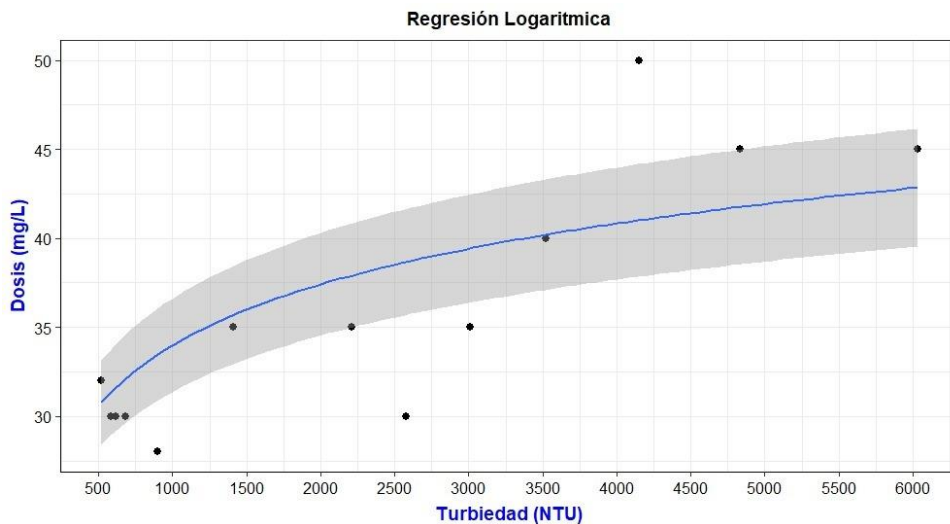


Figura 65. Regresión logarítmica de la eliminación del coeficiente intercepto (Turbiedad > 500 NTU)
Fuente: Autores

En la Tabla 17 se presenta una actualización de los mejores modelos luego de analizar la significancia de los coeficientes de regresión y se observa que todos los coeficientes de regresión son estadísticamente significativos.

Tabla 17. Resultados del análisis de significancia de coeficientes de regresión
Fuente: Autores

Criterio	Modelo	Coefficiente de regresión	p-value
Rango de turbiedad completa	Regresión logarítmica	Intercepto	0.0201
		ln (Turbiedad)	5.64 expo (-14)
Rango de turbiedad menor a 500 NTU	Regresión logarítmica	ln (Turbiedad)	2 expo (-16)
Rango de turbiedad mayor a 500 NTU	Regresión logarítmica	ln (Turbiedad)	5.19 expo (-13)

4.2.2. Identificación de datos atípicos y datos influyentes – criterio estadístico

Los resultados obtenidos de la distancia de Cook indican que, para el primer criterio de análisis deberían eliminarse 4 puntos influyentes en el ajuste del modelo (Figura 66). Así mismo, se indica que para el segundo criterio de análisis deberían eliminarse 2 puntos influyentes (Figura 67). De forma contraria, el tercer criterio de análisis muestra que no existen datos influyentes para el ajuste de ese modelo (Figura 68).

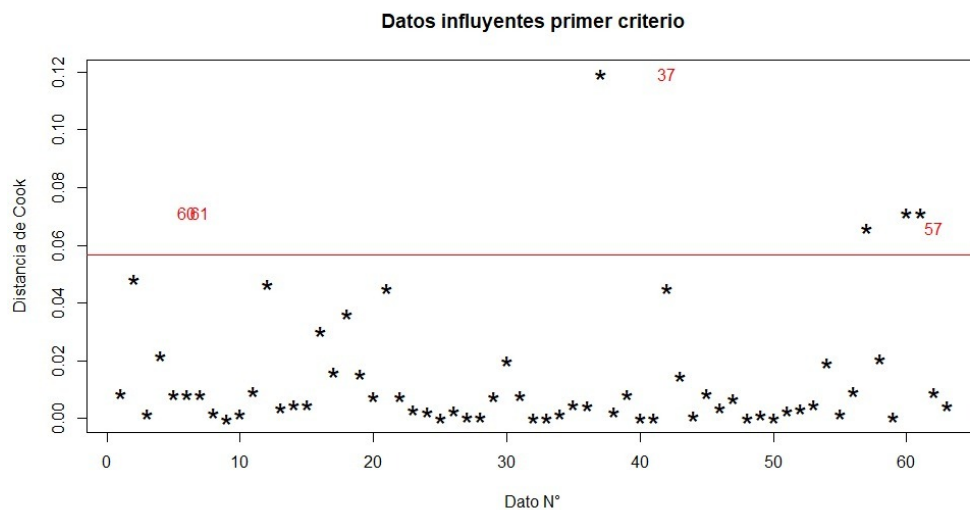


Figura 66. Datos influyentes - Rango de Turbiedad completa (6.23 - 6030 NTU)
Fuente: Autores

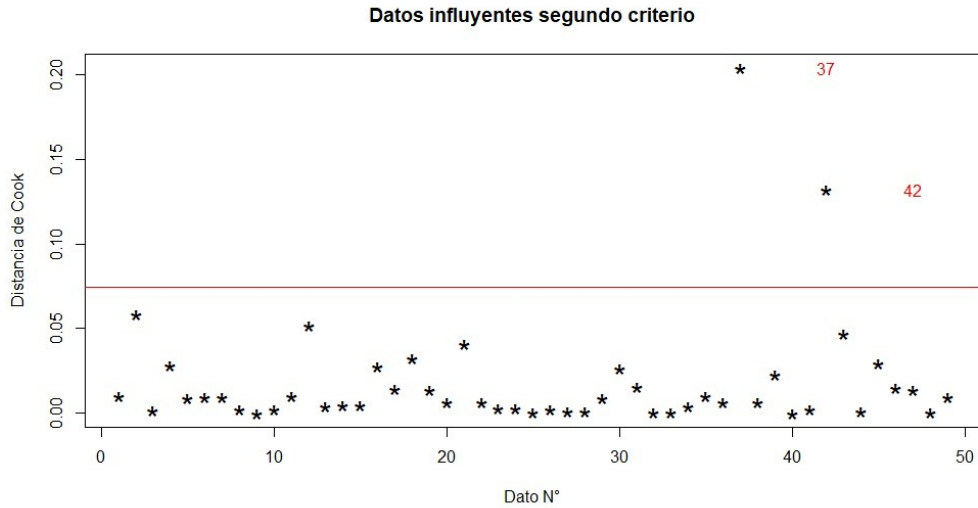


Figura 67. Datos influyentes – Rango de Turbiedad < 500 NTU
Fuente: Autores

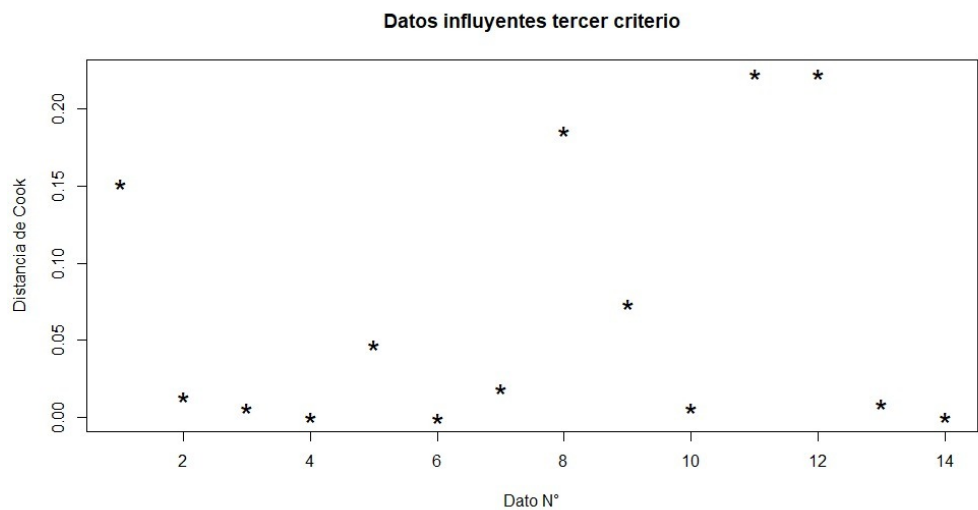


Figura 68. Datos influyentes - Rango de Turbiedad > 500 NTU
Fuente: Autores

La prueba de Bonferroni indicó que tanto para el primer y segundo criterio existe un dato compartido catalogado como valor atípico, debido a que el p -value de esta prueba es menor al nivel de significancia del 5% y por lo tanto se tuvo evidencia suficiente para rechazar la H_0 . Para el tercer criterio de análisis no se rechazó la H_0 del valor mostrado en la tabla, debido a que este no es un valor atípico, sino que fue el residuo estudentizado más grande encontrado y por tanto no es recomendable eliminarlo para el ajuste del modelo.

Los resultados también indicaron que el dato con una turbiedad de 150 NTU y una dosis de 52 mg/L es un valor atípico e influyente tanto para el primer y segundo criterio de análisis. En la Tabla 18 se detalla los resultados del análisis de datos atípicos y datos influyentes de cada criterio.

Tabla 18. Resumen análisis de datos atípicos e influyentes
Fuente: Autores

Criterio	Distancia de Cook		Prueba de Bonferroni		p-value de Bonferroni
	Turbiedad	Dosis	Turbiedad	Dosis	
Rango de turbiedad completa	150 2580 4150 4150	52 30 50 50	150	52	0.0032134
Rango de turbiedad menor a 500 NTU	150 293	52 16	150	52	0.0068286
Rango de turbiedad mayor a 500 NTU	-	-	2580	30	0.49758

4.2.3. Identificación de datos con eventualidades – criterio técnico

En la Tabla 19 se muestran los datos que fueron identificados cuando existieron eventualidades al realizar los ensayos de jarras. Estos puntos no se incluyeron para la construcción de la curva de dosificación de PAC, ya que tanto el agua cruda como agua tratada presentaron coloraciones amarillas y en consecuencia los valores finales de la UC Pt-Co fueron en su mayoría mayores a 30. Además, se observa que hay registros de color final menores a 30 UC Pt-Co, sin embargo, estos puntos les correspondieron una dosis elevada de coagulante para niveles bajos de turbiedad. Posiblemente la coloración amarilla del agua cruda estuvo influenciada por la presencia de materia orgánica y arcillas en los lugares de captación.

Tabla 19. Identificación de datos con eventualidades – criterio técnico
Fuente: Autores

Turbiedad del agua cruda (NTU)	Color del agua cruda (UC Pt-Co)	Dosis de PAC (mg/L)	Turbiedad final (NTU)	Color final (UC Pt-Co)
46.1	468	30	10.1	142
46.1	468	34	3.06	30
47.1	461	30	1.90	0
50	598	28	2.19	53
50	598	36	1.51	18
50.3	514	28	2.90	36
50.3	514	26	3.13	34
111	1048	36	4.07	35

4.2.4. Curvas de dosificación para los criterios de análisis

Luego del análisis estadístico y técnico se obtuvo las curvas de dosificación de PAC para cada criterio de análisis, recalando que se eliminaron valores atípicos, valores influyentes, coeficientes de

regresión estadísticamente no significativos y datos con eventualidades. En las Figuras 66 a la 68 se muestran los resultados finales de las curvas de dosificación de PAC.

En la Figura 69 se muestra la curva de dosificación de PAC para el primer criterio de análisis. Se observa un crecimiento elevado de la dosis de coagulante hasta los 500 NTU abarcando un rango de dosificación de 12 a 30 mg/L. Una de las deficiencias gráficas de abarcar el rango completo de turbiedad consiste en que las dosis de PAC aplicables en turbiedades inferiores a 1000 NTU son difícilmente apreciables. Por el contrario, este resultado permite apreciar que en rangos elevados de turbiedad no existe una gran variación en la dosificación del PAC.

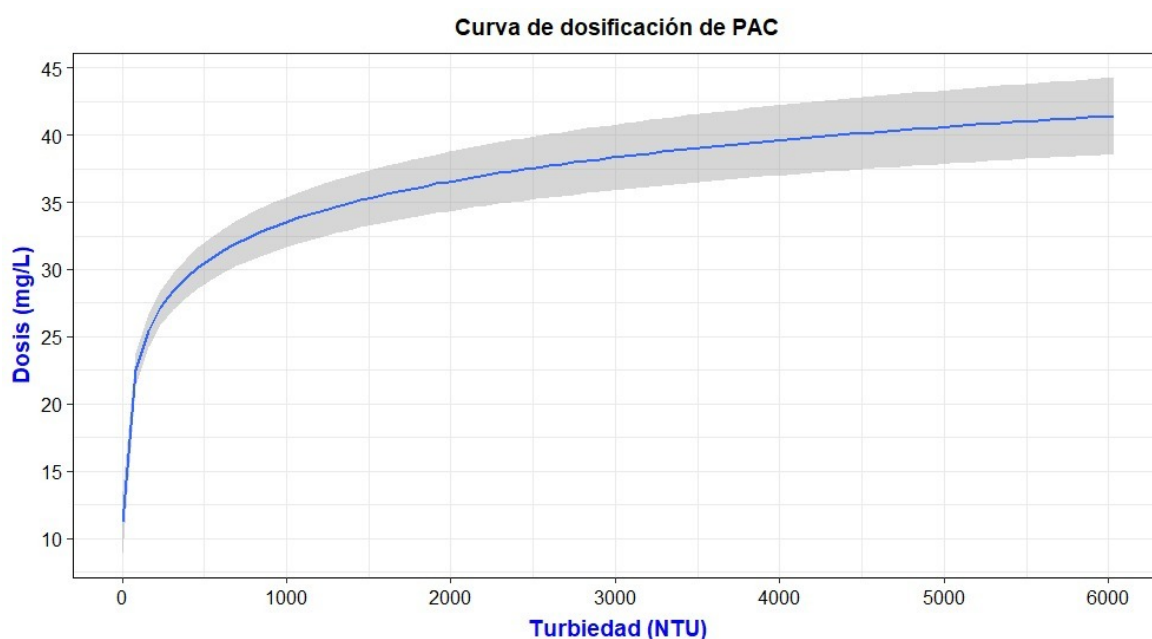


Figura 69. Curva de dosificación de PAC del primer criterio de análisis
Fuente: Autores

En la Figura 70 se muestra la curva de dosificación de PAC para el segundo criterio de análisis. Este resultado permite apreciar de una mejor manera la dosis de coagulante para un nivel de turbiedad menor a 500 NTU, es decir, las dosificaciones resultan más precisas y exactas (32 mg/L para 500 NTU) en comparación con la curva de dosificación del primer criterio de análisis (30 mg/L para 500 NTU). Debido a que el segundo criterio de análisis tiene relación con el tratamiento realizado en la PTAP, ya no se observa una linealidad o estabilización en la parte superior de la curva de dosificación.

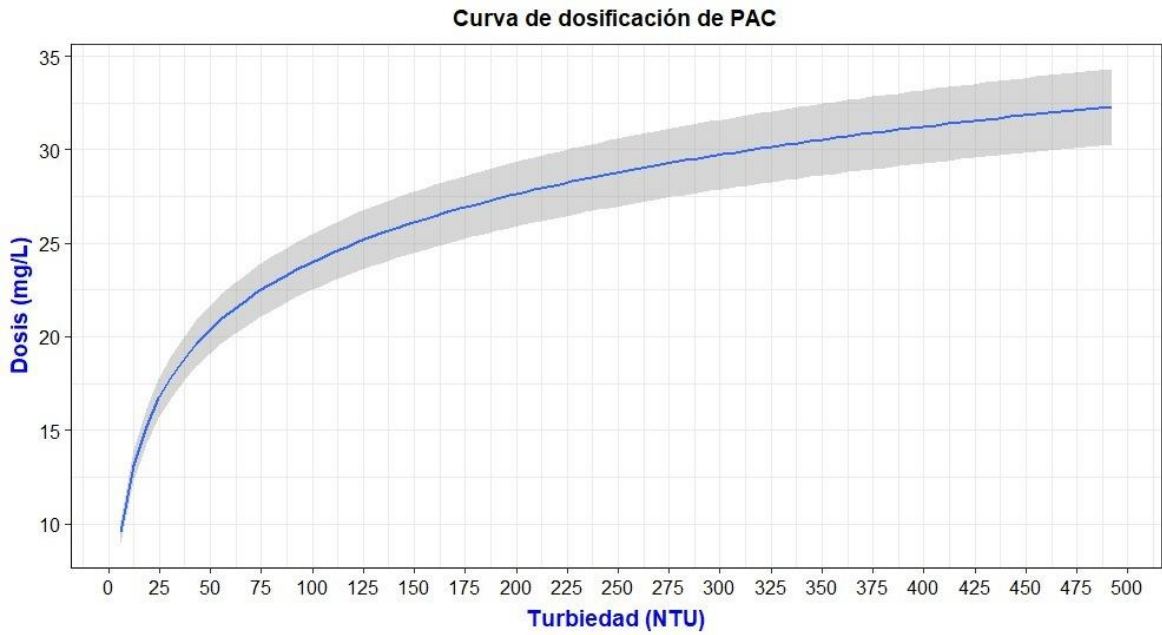


Figura 70. Curva de dosificación de PAC del segundo criterio de análisis
Fuente: Autores

En la Figura 71 se muestra la curva de dosificación del tercer criterio de análisis. Se observa que las dosificaciones para rangos altos de turbiedad no varían en gran medida, dado que en una turbiedad de 500 NTU se aplica 32 mg/L y en una turbiedad de 6000 NTU se aplica 42 mg/L, abarcando únicamente un rango de dosificación de 10 mg/L acorde a los resultados obtenidos en las pruebas de jarras.

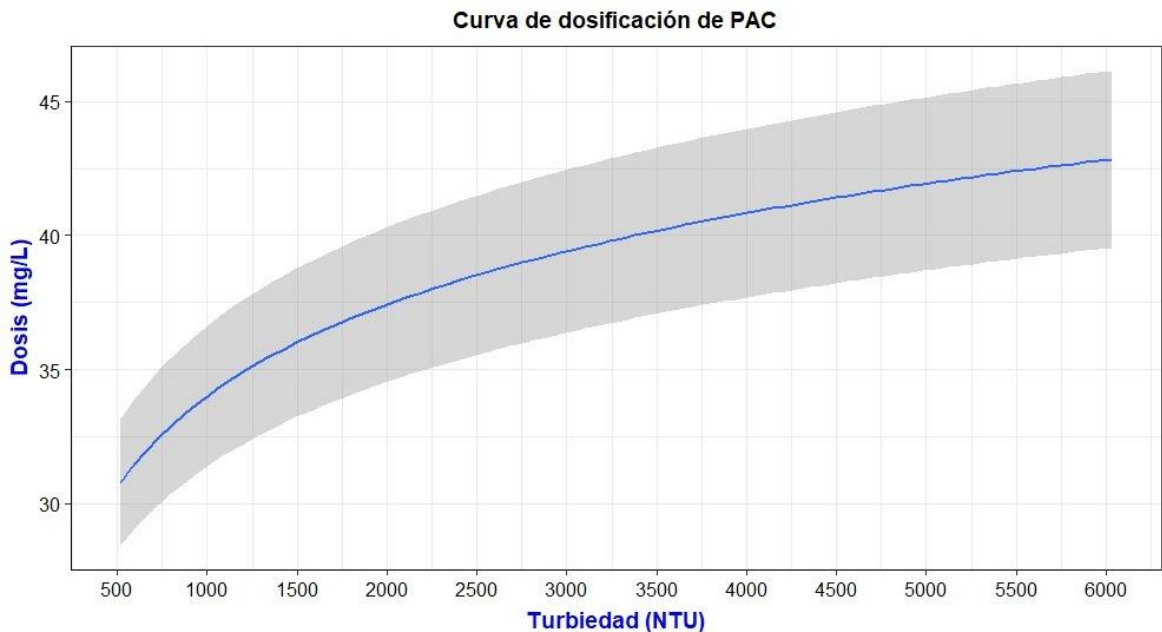


Figura 71. Curva de dosificación de PAC del tercer criterio de análisis
Fuente: Autores

En la Tabla 20 se compara las dosis de PAC aplicadas por otros autores en distintos niveles de turbiedad. El estudio realizado por Zand & Hoveidi (2015) (Tabla 20) aplicó una serie de experimentos de pruebas de jarras para encontrar el pH óptimo y la dosis de coagulante en seis niveles de turbiedad. Al comparar los resultados de Zand & Hoveidi (2015) se obtiene que hasta los 200 NTU es factible aplicar una dosis de 10 mg/L de PAC ya que se alcanza más del 90% de remoción de turbiedad, sin embargo, los resultados del presente estudio con turbiedades de 100 y 200 NTU alcanzan mayores porcentajes de remoción al aumentar las dosis de PAC entre 20 y 30 mg/L. Además, se observa que en turbiedades de 500 y 1000 NTU las dosificaciones no varían mucho entre ambos estudios, sin embargo, los resultados de este trabajo obtienen mayores porcentajes de remoción.

Al observar los resultados de Jowa & Mguni (2015) (Tabla 20), se evidencia que aplicar dosis mayores o iguales a 20 mg/L para turbiedades menores a 50 NTU no se logra remover la turbiedad del agua cruda lo que provoca no alcanzar buenos porcentajes de remoción. Cabe destacar que el presente estudio no aplicó ninguna dosis elevada para turbiedades bajas de agua cruda.

Finalmente, al observar los resultados obtenidos por Kumar & Balasundaram (2017) (Tabla 20) se pudo identificar que las dosis de PAC determinadas para distintos niveles de turbiedad no estuvieron optimizadas. Para turbiedades del agua cruda entre 150 a 250 NTU no se alcanzaron buenos porcentajes de remoción de turbiedad, los valores finales (7.95 y 11.25 NTU) a los que se llegó al aplicar una dosis de 20 mg/L no alcanzaron al menos 5 NTU. Esta característica también se observó para turbiedades de 512 y 950 NTU ya que al aplicar 40 y 70 mg/L respectivamente tampoco se alcanzaron valores finales de turbiedad (8.7 y 8.55 NTU) menores a 5 NTU. Al comparar estos resultados con el presente estudio, se observa que al aumentar la dosis entre 8 a 10 mg/L para valores de 150 y 250 NTU se obtuvo una mejor remoción de la turbiedad, asegurando que el agua luego de la etapa de coagulación-floculación y sedimentación tenga valores de turbiedad (4.5 y 2.26 NTU) menores a 5 NTU, pudiendo aún más disminuir la turbiedad residual en el proceso de filtración.

*Tabla 20. Comparación de otros estudios en las dosis de PAC para distintos valores de turbiedad
Fuente: Autores de los estudios*

Autor	Turbiedad del agua cruda (NTU)	Dosis óptima de PAC (mg/L)	Eficiencia
(Zand & Hoveidi, 2015)	10	10	99.0 %
	50	10	99.6 %
	100	10	98.8 %
	200	10	93.8 %
	500	30	94.1 %
	1000	30	94.6 %
(Jowa & Mguni, 2015)	3.44	20	54.0 %
	22	60	82.0 %
	39.8	20	83.0 %

Continuación de la Tabla 20

(Kumar & Balasundaram, 2017)	150	20	94.7%
	250	20	95.5 %
	512	40	98.3 %
	712	60	99.0 %
	950	70	99.1 %
(Patiño & Vallejo, 2022)	10	14	88.6 %
	50	28	96.9 %
	100	24	98.9 %
	150	32	97.0 %
	200	22	98.8 %
	250	28	99.2 %
	500	30	99.9 %
	950	28	99.7 %
1000	35	99.8 %	

En la Tabla 21 se muestran los resultados de las ecuaciones matemáticas que pueden ser utilizadas para determinar la dosis de PAC requerida para un valor de turbiedad de agua cruda específico que desee tratarse en planta.

De los resultados obtenidos para el objetivo 2 se puede observar que la curva de dosificación de PAC del primer criterio representa fielmente como se debería dosificar para rangos de turbiedad elevados, pues no existe mucha diferencia entre las dosis de 1000 NTU (34 mg/L) y 6000 NTU (42 mg/L) dado que si está acorde a los resultados de las pruebas de jarras donde la variación fue de 10 mg/L. Esto es un buen resultado de ajuste ya que podría usarse una dosis de 38 mg/L para tratar estos rangos de turbiedad elevados. Cabe recalcar que si bien el coeficiente de determinación R^2 es del 78.65%, no significa que sea un mal ajuste, ya que el análisis se realizó por pasos hasta conseguir los mejores resultados.

Tabla 21. Ecuaciones de regresión para las curvas de dosificación de los criterios analizados
Fuente: Autores

Criterio	Ecuación de regresión	Coefficiente de determinación R^2
Rango de turbiedad completa	$y = 3.1528 + 4.39540 \ln(x)$	78.65%
Rango de turbiedad menor a 500 NTU	$y = 5.2130 \ln(x)$	96.49%
Rango de turbiedad mayor a 500 NTU	$y = 4.9232 \ln(x)$	98.37%

Nota: La variable "y" representa la dosis de PAC en mg/L y la variable "x" representa la turbiedad del agua cruda en NTU

El resultado del primer criterio en comparación con el resultado del segundo criterio indicó que la curva de dosificación de PAC esta estadísticamente mejor ajustada y explica casi la totalidad de los datos. De manera análoga, se puede observar que la dosificación en este rango analizado trabaja correctamente variando las dosis que se deben usar para valores de turbiedad inferiores a 500 NTU.

Finalmente, la curva de dosificación para rangos de turbiedad superiores a 500 NTU (tercer criterio), indicó que la región del intervalo de confianza permite asegurar que por ejemplo para la turbiedad

de 1500 NTU se debería aplicar 36 mg/L y para una turbiedad de 3000 NTU se podría aplicar la misma dosis, debido a que el intervalo de confianza abarca esa dosificación.

Del trabajo realizado por Calle & Zambrano (2015) en donde se determinó la curva de dosificación de sulfato de aluminio para la PTAP de la JAAPRB por medio de pruebas de jarras, se puede destacar los siguientes puntos de dosificación, especificados en la Tabla 22.

De las relaciones obtenidas se puede observar que si existe una reducción en las dosis empleadas para esos niveles de turbiedad. La teoría indica que normalmente las dosis de policloruro de aluminio son menores que las dosis de sulfato de aluminio (Arboleda, 2000; Cogollo, 2011), en este caso se obtuvo una relación promedio de 1.85, es decir que, por cada unidad de policloruro de aluminio usado, anteriormente se utilizaban 1.85 veces más sulfato de aluminio.

Tabla 22. Comparación de resultados con estudio de Calle & Zambrano (2015)
Fuente: (Calle & Zambrano, 2015)

Curva de Sulfato de Aluminio		Curva de Policloruro de aluminio de los autores del estudio		Relación entre la dosis de Sulfato de aluminio y policloruro de aluminio
Turbiedad (NTU)	Dosis (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Dosis (mg/L)	
10	22	10	13	1.69
30	32	30	18	1.78
50	36	50	20	1.80
100	43	100	23	1.86
200	50	200	26	1.92
300	53	300	28	1.89
500	58	500	30	1.93
800	62	800	33	1.87
1000	65	1000	34	1.91

En un estudio desarrollado por Alvarado et al. (2014) se evaluó la implementación de PAC en conjunto a SA para la optimización del proceso de coagulación de una PTAP. El desarrollo experimental de este estudio arrojó que las dosificaciones probadas entre ambos coagulantes obtuvieron una relación de 4.76 unidades de SA por cada unidad de PAC. Con estos resultados es claro apreciar que las dosificaciones de PAC son menores en al menos una unidad en comparación con otros coagulantes (Alvarado et al., 2014). Por lo tanto, es posible optimizar mucho más las dosis de PAC aplicando los resultados de este estudio dentro de la PTAP de la JAAPRB, con el fin de ajustar mucho más la dosis óptima de coagulante.

4.2.4.1. Interpretación de curvas de dosificación para los operarios de la Planta de Potabilización

Desde el punto de vista práctico sería recomendable que los operarios actúen utilizando la ecuación generada para cada modelo y la gráfica de la curva de dosificación. Además de aquello no es recomendable solo aplicar lo obtenido por experimentación, que en este caso son las curvas de dosificación, sino también tener un control estricto y riguroso de los parámetros básicos como son la turbiedad y el color del agua cruda y tratada en la planta. Es decir, los operarios deberían actuar con

procesos técnicos de toma de muestras, regulación en la dosificación del coagulante y medición de los parámetros del agua.

La curva que debería ser usada por los operarios corresponde a la curva del segundo criterio de análisis, pues esta comprende los rangos de turbiedad del agua cruda que más frecuentemente se presentan en la mayor parte del tiempo. Aplicando lo obtenido en este estudio se lograría una buena clarificación del agua cruda, ya que a nivel gráfico es fácilmente apreciable identificar la dosis que se debería aplicar para una turbiedad específica menor a 500 NTU según este criterio.

Finalmente, cuando se presentan turbiedades mayores a 1000 NTU, los operarios deberían usar la curva del tercer criterio de análisis. Durante la realización de las pruebas de jarras usando muestras de agua cruda con turbiedades mayores a 1000 NTU se logró porcentajes de remoción de más del 99.5%, reduciendo la turbiedad hasta valores menores a 1 NTU. Por lo tanto, este ajuste representa una buena descripción de cómo actuar cuando se presente agua cruda con valores elevados de turbiedad.

La importancia del estudio radica en el análisis de las dosificaciones para altas turbiedades en rangos de miles de NTU; resultados que no han sido obtenidos en otros estudios como por ejemplo el estudio realizado en la central termoeléctrica “El Descanso” en donde se abarco un rango de turbiedad de 12.9 a 835 NTU (Izquierdo, 2015), o el estudio realizado en la PTAP del cantón Sucúa donde se logró obtener un rango de turbiedad menor desde 2.23 a 572 NTU (Chele, 2019). Por lo tanto, este estudio representa una línea base del comportamiento de la dosificación de PAC para turbiedades elevadas.

4.2.5. Análisis de costos

Los resultados de los datos obtenidos acerca de la adquisición de policloruro de aluminio por la JAAPRB se muestran en la Tabla 23. Según estos datos se observa que para los cuatro meses seleccionados se ha invertido \$3675 para la adquisición del coagulante en un total de 120 días para la potabilización del agua.

Tabla 23. Cantidad de PAC adquirido por la JAAPRB
Fuente: JAAPRB

Año	Mes	Kg/mes	Días	Costo (\$)
2021	Agosto	1000	31	1050
	Septiembre	1000	30	1050
2022	Febrero	500	28	525
	Marzo	1000	31	1050
TOTAL				3675

Nota: el costo del kg de PAC corresponde a \$ 1.03 y \$1.05 para los meses agosto-septiembre y febrero-marzo respectivamente

En la Tabla 24 se muestran el costo de PAC en los cuatro meses de realización del estudio, para lo cual se consideró los valores promedio de las dosis. Se observa que la inversión para la adquisición del químico corresponde a un valor de \$3384.30.

Tabla 24. Cantidad de PAC estimado por el estudio en cuatro meses
Fuente: Autores

Año	Mes	Dosis promedio (mg/L)	Consumo (kg/mes)	Costo (\$/mes)
2021	Agosto	23	924.048	970.25
	Septiembre	20	777.600	816.48
2022	Febrero	24	870.912	914.46
	Marzo	17	682.992	717.14
TOTAL				3384.30

Con los resultados obtenidos se puede apreciar que existe un ahorro total de \$290.70 en los cuatro meses analizados. Si se proyecta para un año el ahorro sería de \$872.10, evidenciándose que existiría un beneficio económico para la JAAPRB.

4.3. Evaluación de la eficiencia del proceso de coagulación-floculación

4.3.1. Exploración gráfica de las variables pH y temperatura del agua cruda

En la Figura 72 se muestra los histogramas de la exploración gráfica de las variables x_3 y x_4 ; este resultado permite observar que, para el caso del pH la mayor frecuencia indica que el pH estuvo en un rango de 7.4 a 7.6 y muy pocos datos registran valores entre 7.0 y 7.2. De manera análoga, la frecuencia de temperatura fue mayor en un rango de 12 a 14 °C, seguido de 15 datos con un rango de 14 a 16 °C y finalmente 12 datos con un rango de 16 a 18 °C.

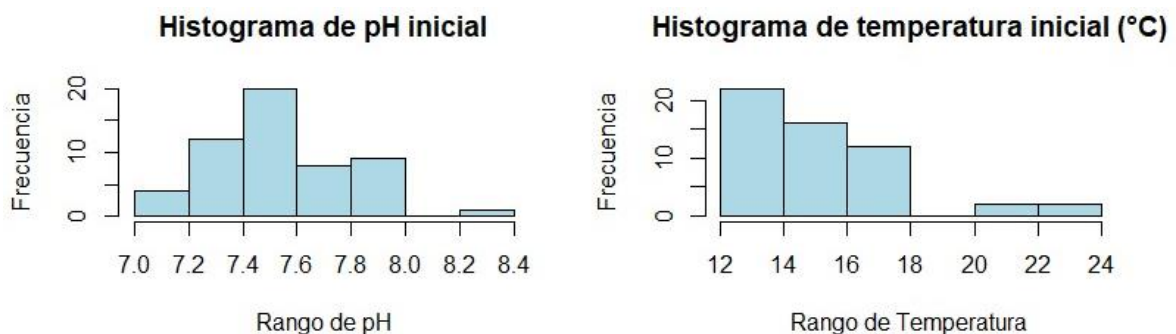


Figura 72. Histograma de las variables x_3 y x_4
Fuente: Autores

4.3.2. Creación de modelos

Los resultados del análisis de las cuatro primeras combinaciones de factores se muestran en las Tablas 25 a la 28. En todos los resultados se resalta el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) y el coeficiente de determinación predictivo (R^2 pred), la desviación estándar del diseño del modelo (S), todos con un nivel de confianza del 95%.

Con los resultados obtenidos se puede observar que, en las cuatro combinaciones iniciales de factores, existe al menos un diseño en donde el R^2 pred no es igual al 0.00%, lo que significa que al

menos un diseño de modelo es capaz de predecir una fracción del porcentaje de los datos. Además, se observa que cuando la combinación de factores no incluye a la turbiedad o color y es reemplazado por el factor temperatura (Tabla 27 y 28), hay una mejora significativa de todos los resultados estadísticos del modelo, es decir, ambos coeficientes de determinación (R^2) aumentan un 15% en comparación a las dos primeras combinaciones de factores, y la desviación estándar del modelo disminuye.

Tal como se observa en la Tabla 25, dicha combinación de factores expresa que no es la adecuada para ser utilizada en un modelo de predicción debido a que en tres diseños de modelación ningún término es significativo y además el R^2 pred no alcanza ni el 10% como coeficiente. De manera análoga, en la Tabla 26, si bien se analizaron todos los diseños de modelación solo uno de ellos es diferente del 0.00% en su R^2 pred, sin embargo, al igual que la primera combinación de factores tampoco se alcanza el 10% de predicción. Por lo tanto, estas dos combinaciones se descartan como modelos de predicción de la turbiedad final del agua, y la tercera y cuarta combinación de factores se catalogan inicialmente como las mejores para la creación de un modelo predictivo.

Tabla 25. Resultados de modelación primera combinación de factores
Fuente: Autores

Factores: x_1, x_2, x_3, x_5 Nivel de confianza: 95%				
Diseño	S	R^2 ajustado	R^2 pred	Términos significativos
Cuadrático completo	1.32444	47.24%	0.00%	pH^2
Cuadrático completo ajustado	1.69772	13.32%	0.00%	intercepto, pH, pH^2
Lineal más interacciones	1.38746	42.10%	0.00%	intercepto, dosis, pH^* dosis, turbiedad, color
Lineal más interacciones ajustado	1.74091	8.85%	0.00%	pH
Lineal más cuadrados	1.41653	39.96%	0.00%	pH, dosis, pH^2 , dosis ²
Lineal más cuadrados ajustado	1.42000	38.96%	9.32%	intercepto, pH, dosis, pH^2 , dosis ²
Lineal	1.72539	10.47%	0.00%	intercepto, pH
Lineal ajustado	1.78917	3.72%	0.00%	intercepto

Tabla 26. Resultados de modelación segunda combinación de factores
Fuente: Autores

Factores: x_1, x_2, x_4, x_5 Nivel de confianza: 95%				
Diseño	S	R^2 ajustado	R^2 pred	Términos significativos
Cuadrático completo	1.43503	38.07%	0.00%	Ninguno
Lineal más interacciones	1.39688	41.31%	0.00%	Ninguno
Lineal más cuadrados	1.59673	23.32%	0.00%	dosis, dosis ²
Lineal más cuadrados ajustado	1.64403	18.71%	6.57%	intercepto, dosis, dosis ²
Lineal	1.79317	3.29%	0.00%	intercepto

Los resultados de la Tabla 27 y 28 indican que hubo una mejora de los resultados estadísticos para los diseños de modelación de las combinaciones de factores realizadas. Se observa que en el diseño cuadrático completo se obtuvo un R^2 pred y R^2 ajustado mayor a 35% y 55% respectivamente para la combinación de factores x_1, x_3, x_4, x_5 . Así mismo, en la combinación de factores x_2, x_3, x_4, x_5 se

obtuvo resultados ligeramente debajo de la combinación anterior con un R^2 pred y R^2 ajustado igual a 38.68% y 57.25% respectivamente.

Tabla 27. Resultados de modelación tercera combinación de factores
Fuente: Autores

Factores: x_1, x_3, x_4, x_5 Nivel de confianza: 95%				
Diseño	S	R^2 ajustado	R^2 pred	Términos significativos
Cuadrático completo	1.22604	54.79%	25.87%	temperatura, turbiedad*temperatura, pH ²
Cuadrático completo ajustado	1.18162	58.01%	38.74%	intercepto, temperatura, turbiedad, pH, turbiedad*temperatura, pH ²
Lineal más interacciones	1.30098	49.10%	29.76%	temperatura, turbiedad*temperatura
Lineal más interacciones ajustado	1.41651	39.65%	35.59%	intercepto, turbiedad, temperatura, turbiedad*temperatura
Lineal más cuadrados	1.38369	42.42%	8.91%	pH, dosis, pH ² , dosis ²
Lineal más cuadrados ajustado	1.42465	38.96%	9.32%	intercepto, pH, dosis, pH ² , dosis ²
Lineal	1.71763	11.27%	0.00%	intercepto, pH
Lineal ajustado	1.78917	3.72%	0.00%	intercepto

Tabla 28. Resultados de modelación cuarta combinación de factores
Fuente: Autores

Factores: x_2, x_3, x_4, x_5 Nivel de confianza: 95%				
Diseño	S	R^2 ajustado	R^2 pred	Términos significativos
Cuadrático completo	1.23426	54.18%	0.00%	temperatura, color*temperatura, pH ²
Cuadrático completo ajustado	1.17824	57.25%	38.68%	intercepto, temperatura, color, pH, color*temperatura, pH ²
Lineal más interacciones	1.29612	49.48%	26.99%	temperatura, color*temperatura
Lineal más interacciones ajustado	1.42633	38.81%	18.20%	intercepto, color, temperatura, color*temperatura
Lineal más cuadrados	1.39803	41.22%	0.00%	pH, dosis, pH ² , dosis ²
Lineal más cuadrados ajustado	1.42465	38.96%	9.32%	intercepto, pH, dosis, pH ² , dosis ²
Lineal	1.72000	11.03%	0.00%	intercepto, pH
Lineal ajustado	1.78917	3.72%	0.00%	intercepto

4.3.3. Análisis de sensibilidad

En las Tablas 29 a 35 se observan los resultados del análisis de sensibilidad realizado con nuevas combinaciones de factores en base a los resultados del apartado anterior.

Con estos resultados obtenidos es claro observar que, cuando el diseño de modelación es más simple (menor cantidad de términos), los resultados estadísticos de los coeficientes de determinación disminuyen y la desviación estándar de los modelos aumenta. De manera análoga, se observa que cuando el factor temperatura se incluye dentro de las combinaciones aparecen los valores más altos de R^2 pred, y de forma contraria cuando el factor dosis está dentro de las combinaciones el valor de este coeficiente disminuye hasta un valor cercano al 0.00%.

De este análisis de sensibilidad la combinación de los factores x_1, x_3 y x_4 (Tabla 29) tiene los mejores resultados estadísticos con una desviación estándar de 1.18162, un R^2 ajustado de 58.01% y un R^2 pred de 38.74% para el diseño cuadrático completo ajustado.

Tabla 29. Resultados de modelación quinta combinación de factores

Fuente: Autores

Factores: x_1, x_3, x_4 Nivel de confianza: 95%				
Diseño	S	R ² ajusted	R ² pred	Términos significativos
Cuadrático completo	1.18770	57.57%	38.75%	temperatura, pH ² , turbiedad*temperatura
Cuadrático completo ajustado	1.18162	58.01%	38.74%	intercepto, temperatura, pH, turbiedad, pH ² , turbiedad*temperatura
Lineal más interacciones	1.28589	50.27%	36.59%	temperatura, turbiedad*temperatura
Lineal más interacciones ajustado	1.41651	39.65%	35.59%	intercepto, temperatura, turbiedad*temperatura
Lineal más cuadrados	1.55914	26.89%	0.00%	pH, pH ²
Lineal más cuadrados ajustado	1.69772	13.32%	0.00%	intercepto, pH, pH ²
Lineal	1.72675	10.33%	0.00%	pH
Lineal ajustado	1.78917	3.72%	0.00%	intercepto

La combinación de factores x_1, x_3 y x_5 (Tabla 30) no tiene buenos resultados estadísticos ya que el diseño de modelación cuadrático completo ajustado tiene un valor máximo de 46.82% de R² ajusted y un 12.79% de R² pred para un modelo lineal con interacciones ajustado.

Tabla 30. Resultados de modelación sexta combinación de factores

Fuente: Autores

Factores: x_1, x_3, x_5 Nivel de confianza: 95%				
Diseño	S	R ² ajusted	R ² pred	Términos significativos
Cuadrático completo	1.35351	44.90%	0.00%	turbiedad, dosis, turbiedad ² , pH ² , turbiedad*dosis
Cuadrático completo ajustado	1.32969	46.82%	2.62%	turbiedad, dosis, pH, turbiedad ² , pH ² , turbiedad*dosis
Lineal más interacciones	1.51168	31.27%	0.81%	dosis, turbiedad*dosis
Lineal más interacciones ajustado	1.57023	25.85%	12.79%	dosis, turbiedad, turbiedad*dosis
Lineal más cuadrados	1.40429	40.69%	9.13%	pH, dosis, pH ² , dosis ²
Lineal más cuadrados ajustado	1.42465	38.96%	9.32%	intercepto, pH, dosis, pH ² , dosis ²
Lineal	1.71125	11.93%	0.00%	intercepto, pH
Lineal ajustado	1.78917	3.72%	0.00%	intercepto

La combinación de factores x_1, x_4 y x_5 (Tabla 31) tiene un menor R² ajusted para el diseño de modelo cuadrático completo con un valor de 41.76%, mismo valor que es inferior al obtenido en la Tabla 30, y por otro lado tiene una mejora en el R² pred alcanzando un valor máximo de 35.59% para el diseño del modelo cuadrático completo ajustado.

Tabla 31. Resultados de modelación séptima combinación de factores

Fuente: Autores

Factores: x_1, x_4, x_5 Nivel de confianza: 95%				
Diseño	S	R ² ajusted	R ² pred	Términos significativos
Cuadrático completo	1.39159	41.76%	35.06%	intercepto, temperatura, turbiedad*temperatura
Cuadrático completo ajustado	1.41165	39.65%	35.59%	intercepto, turbiedad, temperatura, turbiedad*temperatura
Lineal más interacciones	1.41517	39.77%	34.08%	temperatura, turbiedad*temperatura
Lineal más interacciones ajustado	1.41651	39.65%	35.59%	intercepto, turbiedad, temperatura, turbiedad*temperatura
Lineal más cuadrados	1.58053	24.87%	12.13%	dosis, dosis ²
Lineal más cuadrados ajustado	1.64403	18.71%	6.57%	intercepto, dosis, dosis ²
Lineal	1.77850	4.94%	0.00%	intercepto

La combinación de factores x_3, x_4 y x_5 (Tabla 32) mejora el R^2 ajustado en comparación a las dos tablas anteriores hasta un valor de 49.30% para el diseño de modelo cuadrático completo ajustado, pero disminuye el R^2 pred con un valor máximo de 28.94%.

Tabla 32. Resultados de modelación octava combinación de factores
Fuente: Autores

Factores: x_3, x_4, x_5				
Nivel de confianza: 95%				
Diseño	S	R^2 ajustado	R^2 pred	Términos significativos
Cuadrático completo	1.31197	48.23%	19.76%	intercepto, dosis, pH^2 , temperatura*dosis
Cuadrático completo ajustado	1.29831	49.30%	28.94%	intercepto, dosis, pH , pH^2 , temperatura*dosis
Lineal más interacciones	1.43514	38.06%	15.15%	dosis, temperatura*pH, temperatura*dosis
Lineal más interacciones ajustado	1.43004	38.50%	22.81%	dosis, temperatura*pH, temperatura*dosis
Lineal más cuadrados	1.38914	41.96%	11.30%	intercepto, pH , dosis, pH^2 , dosis ²
Lineal más cuadrados ajustado	1.42465	38.96%	9.32%	intercepto, pH , dosis, pH^2 , dosis ²
Lineal	1.70787	12.28%	0.00%	pH , dosis
Lineal ajustado	1.70533	12.54%	0.00%	intercepto, pH , dosis

La combinación de factores x_2, x_3 y x_4 (Tabla 33) está ligeramente debajo de la combinación x_1, x_3 y x_4 con una desviación estándar de 1.18274, un R^2 ajustado de 57.93% y un R^2 pred de 38.43%.

Tabla 33. Resultados de modelación novena combinación de factores
Fuente: Autores

Factores: x_2, x_3, x_4				
Nivel de confianza: 95%				
Diseño	S	R^2 ajustado	R^2 pred	Términos significativos
Cuadrático completo	1.18274	57.93%	38.43%	temperatura, pH^2 , color*temperatura
Cuadrático completo ajustado	1.17824	58.25%	30.78%	intercepto, temperatura, pH , color, pH^2 , color*temperatura
Lineal más interacciones	1.28490	50.35%	28.96%	temperatura, color*temperatura
Lineal más interacciones ajustado	1.42633	38.81%	18.20%	intercepto, temperatura, pH , color, color*temperatura
Lineal más cuadrados	1.53598	29.05%	0.00%	pH , pH^2 , color ² , temperatura ²
Lineal	1.74288	8.64%	0.00%	intercepto, pH
Lineal ajustado	1.78917	3.72%	0.00%	intercepto

La combinación de factores x_2, x_3 y x_5 (Tabla 34) no indica una mejora del R^2 ajustado y el R^2 pred, dado que existe una reducción de ambos coeficientes hasta un valor máximo de 40.89% y 12.36% respectivamente.

Tabla 34. Resultados de modelación décima combinación de factores
Fuente: Autores

Factores: x_2, x_3, x_5				
Nivel de confianza: 95%				
Diseño	S	R^2 ajustado	R^2 pred	Términos significativos
Cuadrático completo	1.40188	40.89%	0.00%	dosis, pH^2
Cuadrático completo ajustado	1.62029	21.04%	0.00%	intercepto, pH , dosis, pH^2
Lineal más interacciones	1.51477	30.99%	0.00%	dosis, color, dosis*color
Lineal más interacciones ajustado	1.55620	27.16%	12.36%	intercepto, dosis, color, dosis*color
Lineal más cuadrados	1.41724	39.59%	6.31%	pH , dosis, pH^2 , dosis ²
Lineal más cuadrados ajustado	1.42465	38.96%	9.32%	Intercepto, pH , dosis, pH^2 , dosis ²
Lineal	1.71628	11.42%	0.00%	intercepto, pH
Lineal ajustado	1.78917	3.72%	0.00%	intercepto

La combinación de factores x_2, x_4 y x_5 (Tabla 35) indica que hay una mejora del R^2 pred con un valor máximo de 18.20% pero hay una reducción del R^2 ajustado con un valor máximo de 39.92% en comparación con la Tabla 34.

Tabla 35. Resultados de modelación décima primera combinación de factores
Fuente: Autores

Factores: x_2, x_4, x_5				
Nivel de confianza: 95%				
Diseño	S	R^2 ajustado	R^2 pred	Términos significativos
Cuadrático completo	1.41333	39.92%	0.00%	temperatura, color*temperatura
Cuadrático completo ajustado	1.42633	38.81%	18.20%	intercepto, color, temperatura, color*temperatura
Lineal más interacciones	1.42625	38.82%	12.03%	temperatura, color*temperatura
Lineal más interacciones ajustado	1.42633	38.81%	18.20%	intercepto, color, temperatura, color*temperatura
Lineal más cuadrados	1.59180	23.79%	9.46%	dosis, dosis ²
Lineal más cuadrados ajustado	1.64403	18.71%	6.57%	intercepto, dosis, dosis ²
Lineal	1.77823	4.90%	0.00%	intercepto

4.3.4. Análisis de resultados de modelos matemáticos

Con los resultados obtenidos para todas las combinaciones de factores, se identifica a la tercera combinación (Tabla 27) como el modelo matemático con mejores resultados estadísticos, pues su R^2 pred es igual a 38.74% y su R^2 ajustado equivale a 58.01%. En las Tablas 36 a 38 se muestran todos los resultados obtenidos para este modelo.

De los resultados de la Tabla 36 se observa que el término temperatura y el término de interacción turbiedad*temperatura tienen un efecto considerable en la respuesta media de la variable dependiente, además la columna de coeficiente también indica que existe una relación positiva entre los términos del modelo y la respuesta. La columna del error estándar del coeficiente indica que si se tomarán nuevas muestras provenientes de la misma población los coeficientes no codificados mantendrían los mismos valores, debido a que ninguno de estos resultados es mayor a una desviación estándar.

La columna de intervalo de confianza indica que el término temperatura tiene un rango amplio de 3.36 unidades codificadas (valores sin unidad), así mismo, sucede con el término de interacción turbiedad*temperatura con un rango amplio de 3.717 unidades codificadas, esto quiere decir que es necesario tomar más muestras para asegurar con un 95% de confianza que los rangos de estos términos puedan reducirse.

Finalmente las columnas del valor t y el valor p indican que desde el punto de vista estadístico todos los términos del modelo son significativos, pues los valores p son todos menores al nivel de significancia y por lo tanto existe una asociación entre todos los términos del modelo con la respuesta.

Tabla 36. Coeficientes codificados

Fuente: Autores

Término	Coeficiente	EE del coef.	IC de 95%	Valor t	Valor p
Constante	3.813	0.371	3.069 – 4.558	10.27	0.00
Turbiedad	2.029	0.412	1.205 – 2.854	4.93	0.00
pH	1.629	0.368	0.891 – 2.367	4.42	0.00
Temperatura	5.862	0.839	4.182 – 7.542	6.99	0.00
pH*pH	2.403	0.577	1.248 – 3.558	4.17	0.00
Turbiedad*Temperatura	6.339	0.928	4.480 – 8.197	6.83	0.00

De los resultados mostrados en la Tabla 37 se observa que el modelo tiene una contribución porcentual para la superficie de respuesta de 61.45%. De manera análoga, la fuente de interacción entre 2 factores aporta con un 32.14%, seguido del efecto lineal con un 14.74% y el efecto cuadrático con un 14.57%. La suma de estas tres contribuciones le otorga al modelo el 61.45%. Es importante destacar que la falta de ajuste y el error puro tienen un aporte significativo a la variación de la respuesta y por lo tanto disminuye el porcentaje de ajuste del modelo a los datos analizados.

Los resultados en base a los valores p indican que el modelo por sí solo explica la variación en la respuesta de la variable dependiente, ya que es menor al nivel de significancia (5%). De manera análoga, a la significancia del modelo, se observa que la falta de ajuste es menor al 5% concluyendo que el modelo no indica una correcta relación entre la respuesta de la variable dependiente y los términos predictores requiriendo de un ajuste en el mismo.

En cuanto a los valores p de interacciones y grupos de términos, se puede concluir que los factores por sí solos son estadísticamente significativos, la interacción entre $x_1 * x_4$ es significativa estableciendo que, si existe una relación entre al menos uno de los factores de esa interacción y la variable de respuesta. Finalmente, el único término cuadrático del modelo influye para que la superficie de respuesta presente una curvatura, ya que este término es estadísticamente significativo.

Tabla 37. Análisis de varianza

Fuente: Autores

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	124.636	61.45%	124.636	17.85	0.00
Lineal	3	29.888	14.74%	112.782	26.93	0.00
Turbiedad	1	11.009	5.43%	33.944	24.31	0.00
pH	1	16.165	7.97%	27.300	19.55	0.00
Temperatura	1	2.715	1.34%	68.228	48.87	0.00
Cuadrado	1	29.555	14.57%	24.551	17.37	0.00
pH*pH	1	29.555	14.57%	24.551	17.37	0.00
Interacción de 2 factores	1	65.192	32.14%	65.192	46.69	0.00
Turbiedad*Temperatura	1	65.192	32.14%	65.192	46.69	0.00
Error	56	78.189	38.55%	78.189		
Falta de ajuste	52	77.636	38.28%	77.636	10.80	0.016
Error puro	4	0.553	0.27%	0.553		
Total	61	202.825	100.00%			

En la Tabla 38 se muestra las observaciones poco comunes para el modelo matemático encontrado. Se observa que existen 8 observaciones poco comunes de las cuales la observación número 17 presenta una gran diferencia entre el valor de la variable dependiente y el valor obtenido al aplicar el modelo con los datos utilizados. La observación número 17 tiene un residuo estandarizado mayor a 2, por lo tanto, se cataloga como un valor atípico. La observación número 18, a pesar de ser menor a -2 no se encuentra muy distante del límite, por lo tanto, no se cataloga como una observación atípica.

Tabla 38. Diagnóstico de observaciones
Fuente: Autores

Obs.	Respuesta	Ajuste	IC de 95%	Resid.	Resid est.
17	10.100	6.157	4.714 – 7.601	3.943	4.21
18	3.820	6.157	4.714 – 7.601	-2.337	-2.50
39	2.090	1.737	0.416 – 3.057	0.353	0.36
40	2.260	1.737	0.416 – 3.057	0.523	0.53
59	9.140	8.650	7.014 – 10.286	0.490	0.57
60	8.170	8.650	7.014 – 10.286	-0.480	-0.56
62	3.110	1.700	0.162 – 3.238	1.410	1.57

Debido a que los resultados estadísticos de este modelo matemático necesitan ser mejorados se procedió a realizar nuevas modelaciones, identificando observaciones atípicas, residuos estandarizados grandes y resultados de coeficientes de determinación (R^2). En la Tabla 39 se observan los resultados de las nuevas modelaciones.

De los resultados de la Tabla 39 se observa claramente que los resultados estadísticos van mejorando conforme se eliminan observaciones atípicas y términos no significativos, sin embargo, esto también reduce el tamaño de la muestra para la calibración del modelo. Además, es importante mencionar que dentro de todas las corridas de modelos estuvieron involucrados los factores turbiedad, temperatura y pH (tercera combinación de factores sin el factor dosis) dado que fueron los términos identificados en el análisis al inicio de este apartado (Tabla 27).

Tabla 39. Resumen de corrida de modelos
Fuente: Autores

Corrida	Modelo	R^2 pred	R^2 ajusted	Observaciones atípicas	Términos no significativos
1	Datos sin observación 17	52.98%	59.50%	29, 35, 40 y 61	pH*pH
2	Datos sin observaciones atípicas de la corrida 1	70.36%	73.24%	11 y 28	pH*pH
3	Datos sin términos no significativos de la corrida 2	71.60%	73.66%	11 y 28	----
4	Datos sin observaciones atípicas de la corrida 3	76.09%	77.85%	15	----
5	Datos sin observaciones atípicas de la corrida 4	77.83%	79.54%	----	----

4.3.4.1. Elección y descripción del mejor modelo

Una vez finalizado todo el análisis estadístico de los resultados de modelación se determinó que la corrida número 5 (Tabla 39) representa el mejor modelo de predicción de la turbiedad final. En las Tablas 40 y 41 se presentan los resultados estadísticos de este modelo.

De la Tabla 40 se observa claramente que todos los términos del modelo son estadísticamente significativos, por lo que se puede concluir que si tienen una relación e influyen en la respuesta de la variable dependiente.

Tabla 40. Coeficientes codificados del mejor modelo
Fuentes: Autores

Término	Coeficiente	EE del coef.	IC de 95%	Valor t	Valor p
Constante	3.442	0.206	3.207 – 3.857	16.68	0.00
Turbiedad	1.419	0.222	0.972 – 1.866	6.38	0.00
pH	5.188	0.445	4.294 – 6.082	11.66	0.00
Temperatura	0.946	0.233	0.478 – 1.414	4.06	0.00
Turbiedad*Temperatura	5.573	0.474	4.621 – 6.524	11.77	0.00

De los resultados obtenidos anteriormente (Tabla 37) se evidencia una mejora significativa de los porcentajes de contribución de los términos del modelo y la disminución del error en el modelo de predicción (Tabla 41). Además, el valor p del modelo, términos e interacciones siguen siendo estadísticamente significativos. El único parámetro de control de este modelo que no mejora su respuesta corresponde a la falta de ajuste. Pese a que el valor p indica que es estadísticamente significativo, ya no es posible corregir la falta de ajuste del modelo, dado que todos los términos que se incluyen son significativos y no existen más observaciones atípicas dentro de los datos utilizados.

Tabla 41. Análisis de varianza del mejor modelo
Fuentes: Autores

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	102.141	81.08%	102.141	52.50	0.00
Lineal	3	34.808	27.63%	101.814	69.78	0.00
Turbiedad	1	20.834	16.54%	19.797	40.71	0.00
pH	1	10.422	8.27%	8.107	16.48	0.00
Temperatura	1	3.551	2.82%	66.122	135.96	0.00
Interacción de 2 factores	1	67.334	53.45%	67.334	138.45	0.00
Turbiedad*Temperatura	1	67.334	53.45%	67.334	138.45	0.00
Error	49	23.831	18.92%	23.831		
Falta de ajuste	34	20.560	16.32%	20.560	2.77	0.019
Error puro	15	3.271	2.60%	3.271		
Total	53	125.972	100.00%			

Finalmente se presenta la ecuación correspondiente al mejor modelo predictivo encontrado:

$$y = -9.2 - 0.006801x_1 - 0.0719x_4 + 1.617x_3 + 0.000416x_1 * x_4 \quad (\text{ecuación 18})$$

Donde:

- y : turbiedad residual (NTU)
- x_1 : turbiedad del agua cruda (NTU)
- x_3 : pH del agua cruda
- x_4 : temperatura del agua cruda ($^{\circ}\text{C}$)

La ecuación 18 está en unidades no codificadas, lo que quiere decir que cada coeficiente que acompaña al término del modelo es una razón de cambio y guarda congruencia con la variable dependiente. Por ejemplo, para el factor temperatura, eso quiere decir que por cada unidad de $^{\circ}\text{C}$ la turbiedad residual disminuye 0.0719 NTU, así mismo por cada unidad de turbiedad inicial y temperatura (interacción) la turbiedad residual aumenta 0.000416 NTU.

Por ejemplo, al aplicar la ecuación 18 con una turbiedad del agua cruda de 25 NTU, un pH del agua cruda de 7.10 y una temperatura del agua cruda de 17°C se obtiene lo siguiente:

$$y = -9.2 \text{ NTU} - \left(0.006801 \frac{\text{NTU}}{\text{NTU}} * 25 \text{ NTU}\right) - \left(0.0719 \frac{\text{NTU}}{^{\circ}\text{C}} * 17^{\circ}\text{C}\right) + (1.617 \text{ NTU} * 7.10) + \left(0.000416 \frac{\text{NTU}}{\text{NTU} * ^{\circ}\text{C}} * 25 \text{ NTU} * 17^{\circ}\text{C}\right)$$

$$y = 1.065175 \text{ NTU}$$

Al obtener los resultados del RMSE para este modelo matemático se obtiene un valor de 0.6644 NTU y el MSE equivale a un valor de 0.4414. Estos resultados se compararon con los resultados obtenidos en la validación del modelo, punto que es abarcado más adelante. En la Figura 73 se muestra la comparación entre la turbiedad residual luego del ensayo de jarras (observado) y la turbiedad estimada por el modelo matemático para todos los datos utilizados para la calibración del mismo. Según este resultado, se aprecia un buen ajuste de la turbiedad estimada por el modelo y los resultados obtenidos en la simulación del proceso de coagulación-floculación.

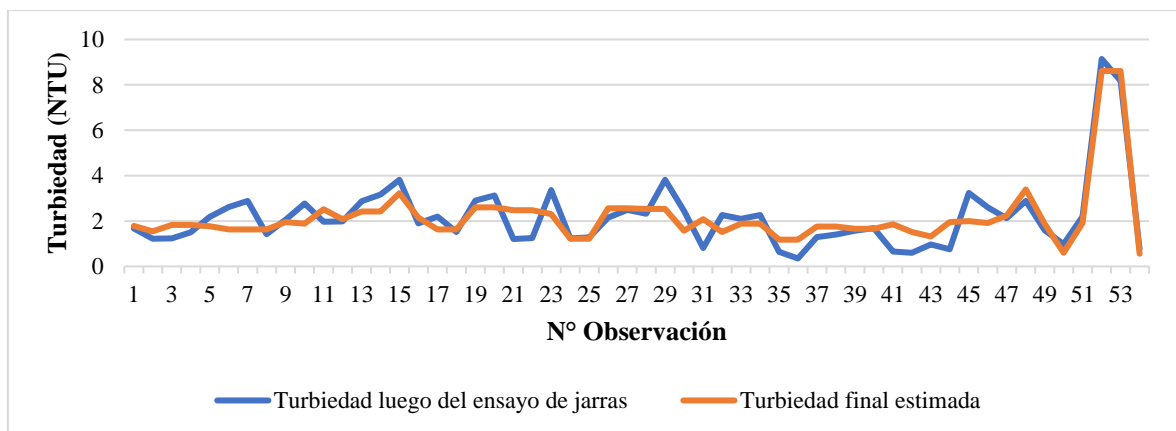


Figura 73. Comparación entre la turbiedad final luego del ensayo de jarras y la turbiedad estimada por el modelo
Fuente: Autores

En la Figura 74 se observa que más del 80% de los datos estimados por el modelo se ajustan a los datos observados y obtenidos experimentalmente. Los dos puntos alejados de la nube de dispersión, fueron ensayos de jarras en donde la turbiedad del agua cruda equivalía a 4500 NTU, y que al finalizar el ensayo de jarras no se obtuvo valores de turbiedad residual menores a 2 NTU como en la mayoría de las otras pruebas. Este tipo de resultados no son muy comunes y no afectaron el proceso de modelación.

De los resultados obtenidos por Apostol et al. (2011), en donde se utilizó la MSR para encontrar un modelo que establezca los parámetros óptimos del proceso de coagulación, en donde los valores estimados por el modelo obtuvieron un R^2 de 95.82%. Teniendo como base el resultado de este estudio se puede observar que el modelo encontrado para el análisis de este trabajo no está muy distante ya que corresponde a un R^2 de 81.08%.

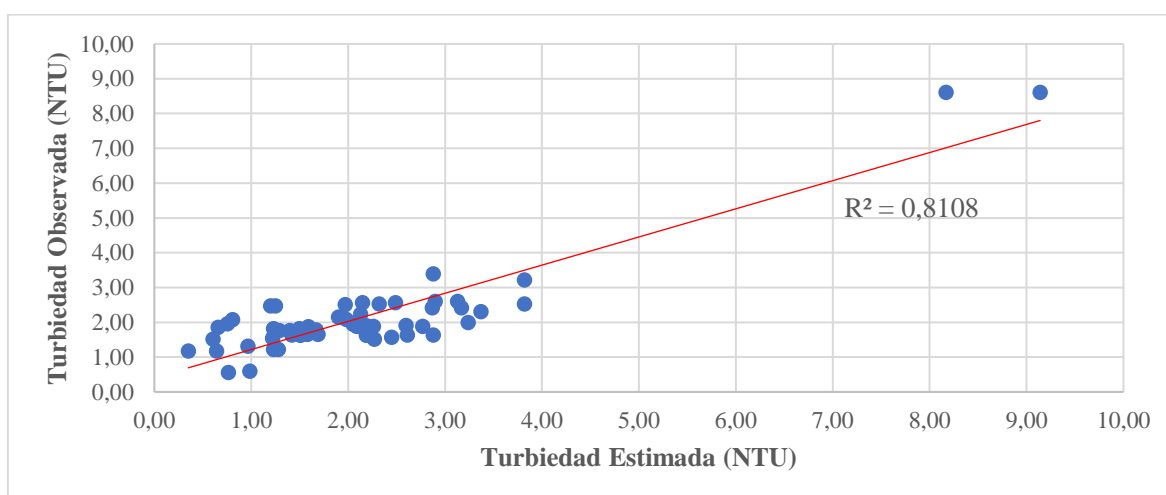


Figura 74. Dispersión de datos observados y datos predichos por el modelo matemático
Fuente: Autores

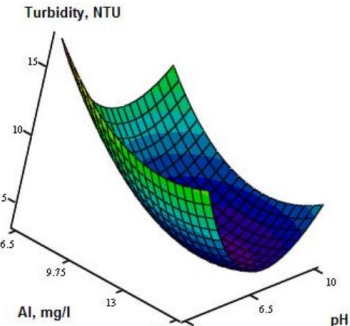
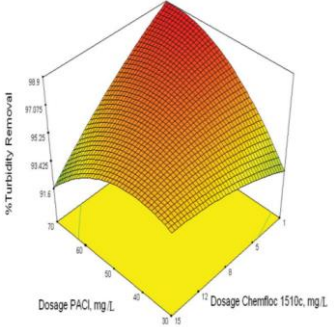
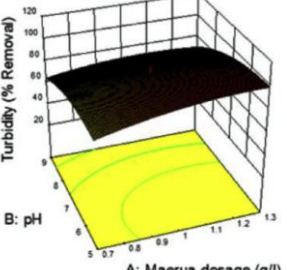
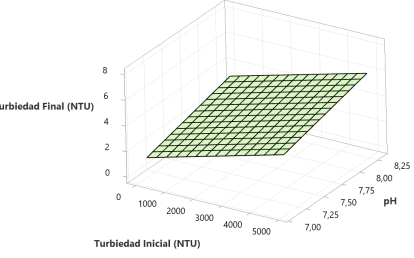
En la Tabla 42 se detallan algunas características de diferentes estudios que implementaron la metodología de superficie de respuesta (MSR), dentro del tratamiento de agua con procesos de coagulación y floculación. Con este análisis es posible realizar una comparación entre el estudio desarrollado en este trabajo y los resultados de otros autores.

El estudio realizado por Birjandi et al. (2013) (Tabla 42) mostró que el modelo encontrado para la predicción de la turbiedad final obtuvo resultados estadísticos con un R^2 de 93.87%, un R^2 ajustado de 92.23% y un R^2 pred de 89.77%. Por otro lado, en el estudio realizado por Kakoi et al. (2017) (Tabla 42) los resultados estadísticos del modelo matemático para la predicción de la turbiedad final obtuvieron un R^2 de 97.74%, un R^2 ajustado de 95.70% y un R^2 pred de 85.99%.

Los resultados estadísticos del estudio realizado en el presente trabajo obtuvieron valores de R^2 de 81.08%, R^2 ajustado de 79.54% y un R^2 pred de 77.83%. Al comparar los resultados estadísticos, es claro identificar que, en los estudios realizados por otros autores, estos obtuvieron mejores

coeficientes de determinación, debido a que en estos estudios se tuvo un control completo de todas las variables implicadas en la creación de modelos de predicción, sin embargo, en el presente estudio los resultados obtenidos no están muy alejados.

Tabla 42. Síntesis de estudios que aplican MSR parte 1
Fuente: Autores de los estudios

Autor	Coagulante	Factores que interviene en el modelo	Superficie de Respuesta
(Apostol et al., 2011)	Sulfato de Aluminio (SA)	Variable Independiente: Dosis de SA (mg/L) Turbiedad Inicial (NTU) pH Variable dependiente: Turbiedad final (NTU)	
(Birjandi et al., 2013)	Sulfato de Aluminio (SA) Policloruro de aluminio (PAC)	Variable Independiente: pH DQO (mg/L) Dosis de SA y PAC (mg/L) Dosis de floculante (mg/L) Variable dependiente: Turbidez (NTU) DQO (mg/L)	
(Kakoi et al., 2017)	<i>Mearua decumbent</i> Sulfato de aluminio (SA)	Variable Independiente: Dosis de coagulantes (g/L) pH Tiempo de sedimentación (min) Variable dependiente: Turbidez (NTU) DQO (mg/L)	
(Patiño & Vallejo, 2022)	Policloruro de aluminio (PAC)	Variable Independiente: Turbiedad Inicial (NTU) Temperatura Inicial (°C) pH Dosis de PAC (mg/L) Variable dependiente: Turbidez Final (NTU)	

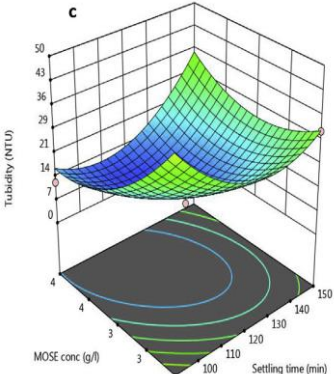
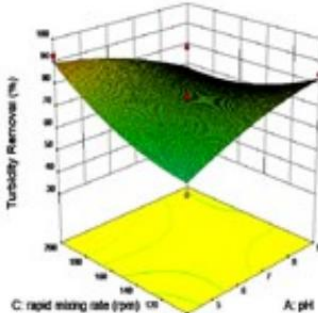
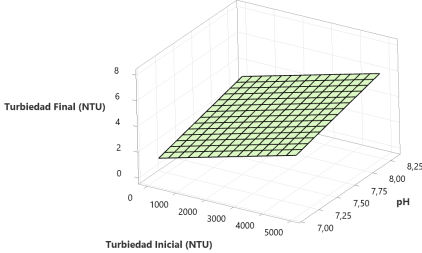
En la Tabla 43 se detallan las mismas características de la Tabla 42 considerando estudios más actuales que aplicaron MSR. Los resultados obtenidos por Adesina et al. (2019) (Tabla 43) mostraron que el R^2 tuvo un valor de ajuste del 90% y el R^2 ajustado fue de 80%. Si se comparan estos resultados con los obtenidos en este estudio se determina que son mejores resultados estadísticos los obtenidos

por Adesina et al. (2019) debido a que el R^2 es inferior con un 8.92% y el R^2 ajustado solo está por debajo con un 0.46%

Los resultados obtenidos por Gökçek & Özdemir (2020) (Tabla 43) mostraron que el coeficiente de determinación del modelo fue de 91.99% al utilizar SA como coagulante. En comparación con los resultados del presente estudio se tiene que el R^2 es menor con un 10.91%. Si se observa cuáles son los factores utilizados en la mayoría de los estudios, se tiene que el pH y la dosis del coagulante utilizado, son los parámetros más comunes.

Teniendo en cuenta que la MSR, es una herramienta basada en el diseño de experimentos, esto quiere decir que, existe un control total de todos los parámetros o factores que intervienen en el modelo que se desee encontrar. Si bien el presente estudio, el único factor controlable fue la dosis de PAC, fue de interés aplicar la MSR con otro tipo de variables para observar el comportamiento e influencia en la variación de turbiedad final, representando un primer acercamiento para futuras investigaciones.

Tabla 43. Síntesis de estudios que aplican MSR parte 2
Fuente: Autores de los estudios

Autor	Coagulante	Factores que interviene en el modelo	Gráfica de Superficie de Respuesta
(Adesina et al., 2019)	<i>Moringa oleifera</i> (MOSE)	<p>Variable Independiente: Tiempo de sedimentación (min) Tiempo de agitación (min) Velocidad de mezcla (rpm) Dosis de MOSE (g/L)</p> <p>Variable dependiente: Turbidez (NTU) pH Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)</p>	
(Gökçek & Özdemir, 2020)	Sulfato de Aluminio (SA) Cloruro Férrico (CF)	<p>Variable Independiente: pH Dosis de SA y CF (mg/L) Velocidad de mezcla (rpm) Tiempo de sedimentación (min)</p> <p>Variable dependiente: Turbiedad final (NTU) Sólidos suspendidos (ppm) DQO (mg/L)</p>	
(Patiño & Vallejo, 2022)	Policloruro de aluminio (PAC)	<p>Variable Independiente: Turbiedad Inicial (NTU) Temperatura Inicial ($^{\circ}\text{C}$) pH Dosis de PAC (mg/L)</p> <p>Variable dependiente: Turbiedad Final (NTU)</p>	

Si se analiza los parámetros influyentes en el proceso de coagulación-floculación, se tiene que según Jin (2005) no es recomendable bajas temperatura del agua cruda debido a que varía la viscosidad del agua, afectando el proceso de sedimentación de los flóculos formados. Por otro lado, el pH afecta notablemente en la remoción de la turbiedad, ya que cuando el rango de pH no es óptimo, es necesario aumentar la dosis de coagulante para un valor de turbiedad específico. A lo largo del desarrollo de este estudio se ha observado que los valores de pH del agua cruda están en un rango de 7.14 a 8.31 y según la ecuación del modelo matemático encontrado se tiene que por cada unidad de pH la turbiedad final se verá incrementada en 1.617 NTU; este término del modelo matemático es el que tiene el mayor valor del coeficiente que lo acompaña.

La dosis de PAC no fue un parámetro que este incluido dentro del modelo matemático, debido a que por una parte a nivel estadístico no fue una variable significativa para la creación del modelo, y en segundo lugar como los demás factores no fueron variables controlables esto afectó a que la dosis no se incluya en la explicación del modelo matemático al no contar con un diseño experimental definido. Si bien la dosis de PAC no es un parámetro que este incluido dentro del modelo matemático obtenido, si representa un factor importante en el tratamiento del agua, en la medida que se deben dosificar las cantidades óptimas para remover la mayor cantidad de turbiedad del agua cruda.

4.3.4.2. Análisis de residuos del modelo matemático

En la Figura 75 se muestra la exploración gráfica de los residuos del modelo matemático, en donde se observa que es muy probable que los residuos estén distribuidos normalmente, ya que el diagrama de dispersión de los residuos indica que los puntos están distribuidos aleatoriamente. Por lo tanto, no son dependientes unos de otros, así mismo, la función de densidad que acompaña al histograma de residuos tiene la forma de una campana de gauss y no se muestra colas alargadas en ninguna dirección.

El diagrama de caja y bigote no muestra la presencia de datos atípicos y también permite observar que la media de los residuos está muy cerca de un valor de cero, lo cual es beneficioso para al proceso de tratamiento. Finalmente, el gráfico de Q-Q Plot indica que los residuos están ajustados casi perfectamente a la línea de referencia de la distribución normal, lo cual permite establecer que posiblemente los residuos del modelo matemático si provienen de una distribución normal.

Con la exploración visual realizada, se puede inferir que posiblemente los residuos están distribuidos normalmente, sin embargo, esto es solo una herramienta gráfica, y por lo tanto es necesario verificar esta suposición. En tanto, en la Tabla 44 se muestran los resultados encontrados para los residuos del modelo matemático, según la prueba estadística de Kolgomorov-Smirnov y la prueba estadística de Kolgomorov-Smirnov con la corrección de Lilliefors.

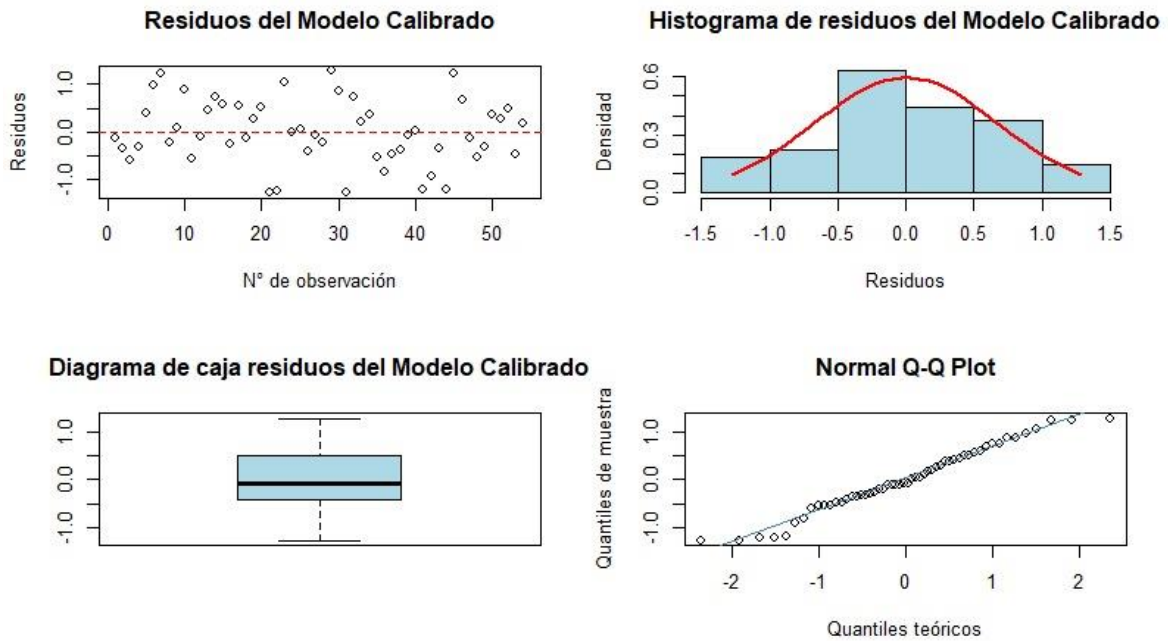


Figura 75. Exploración visual de los residuos del mejor modelo matemático
Fuente: Autores

Según los resultados de la Tabla 44 se observa que ambas pruebas estadísticas informan que los residuos del modelo siguen una distribución normal ya que cumplen con la hipótesis nula en función de que el $p\text{-value} > 0.05$, dando evidencia suficiente para no rechazar la H_0 y asegurar que los residuos del modelo matemático están distribuidos normalmente.

Tabla 44. Resultados de las pruebas estadísticas de normalidad del mejor modelo
Fuente: Autores

Prueba Estadística	p-value	Nivel de significancia
Kolmogorov-Smirnov	0.9607	0.05
Kolmogorov-Smirnov con corrección de Lilliefors	0.8084	

4.3.4.3. Gráficas de superficie de respuesta del modelo matemático

La Figura 76 muestra cómo se desarrolla la superficie de respuesta para el modelo matemático con las variables turbiedad inicial y temperatura. Se observa que a medida que la turbiedad del agua cruda aumenta y la temperatura disminuye, se logra que la turbiedad final tenga valores cercanos a cero. Así mismo, cuando existen turbiedades iniciales menores a 500 NTU y temperaturas iniciales en un rango de 12 a 20 °C, se obtiene que la turbiedad final se encuentre en valores de 0 a 2 NTU beneficiando el proceso de tratamiento. La superficie de respuesta también permite identificar que a medida que aumenta la temperatura del agua y en conjunto al aumento de la turbiedad a partir de 1000 NTU, se provoca que la turbiedad final se eleve disminuyendo el porcentaje de remoción, ya que los valores sobrepasan los 4 NTU y alcanzan valores de 12 a 16 NTU. Cabe recalcar que con el

posterior proceso de filtración se podría remover aún más la turbiedad para cumplir con la normativa de calidad de agua potable (INEN, 2020).

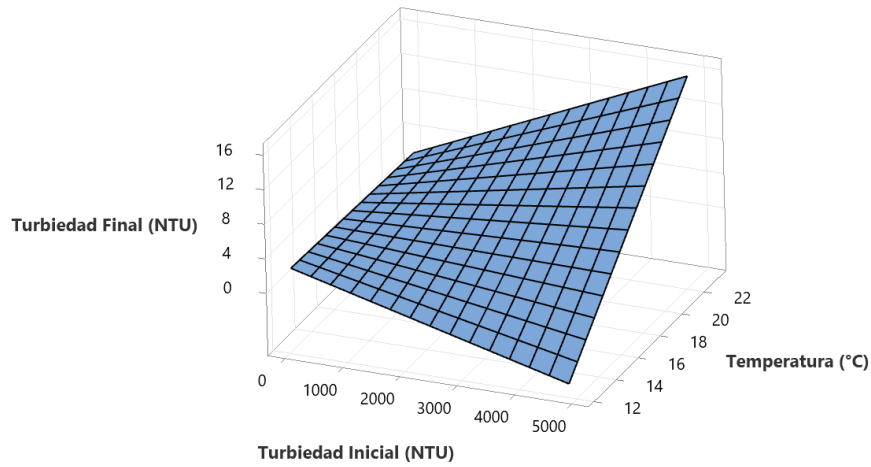


Figura 76. Superficie de Respuesta, variables: Turbiedad Inicial (NTU) vs Temperatura (°C)
Fuente: Autores

La Figura 77 muestra cómo se desarrolla la superficie de respuesta para el modelo matemático con las variables turbiedad inicial y pH. Se observa que ambas variables ejercen una fuerza lineal en la turbiedad final, es decir mientras se dé un aumento de las dos variables, la turbiedad final también aumentará. Se observa que cuando la turbiedad inicial se encuentre en valores superiores a 2000 NTU y el agua cruda tenga un pH entre 7.5 a 7.75, la turbiedad final supere el valor de 4 NTU. La observación más importante de la Figura 77 consiste en que, cuando exista agua cruda con una turbiedad menor a 500 NTU y el pH del agua sea muy cercano a 7, la turbiedad final alcanzará valores menores a 2 NTU, lo cual beneficia el proceso de tratamiento.

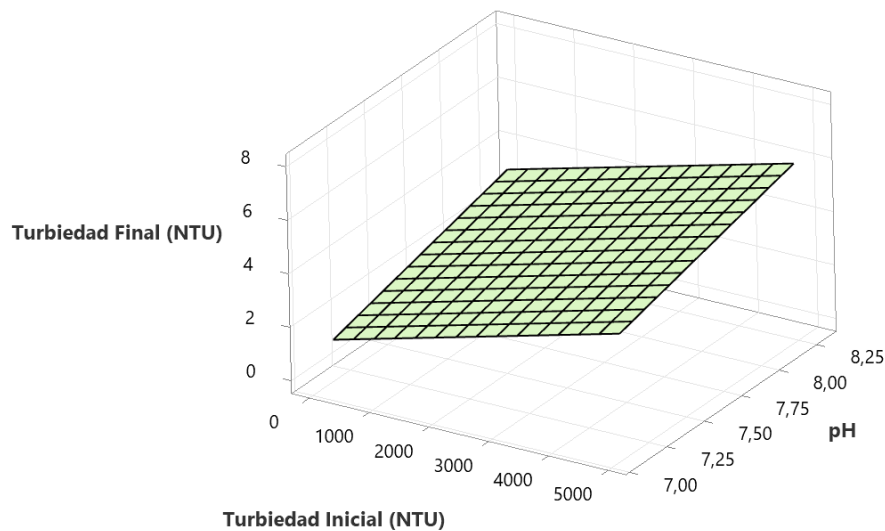


Figura 77. Superficie de respuesta, variables: Turbiedad Inicial (NTU) vs pH
Fuente: Autores

La Figura 78 muestra cómo se desarrolla la superficie de respuesta para el modelo matemático con las variables pH y temperatura. La superficie para esta combinación de variables muestra que el rango óptimo para que la turbiedad final tenga valores menores a 2 NTU, consiste en que la temperatura del agua cruda se encuentre entre 16 a 18 °C, y el pH sea neutro con un valor máximo de 7.2. Sin embargo, el pH parece tener un efecto poco influyente, ya que con valores mayores a 7.8 no se observa un aumento grande de la turbiedad final, pero al igual que la superficie anterior es un indicativo de que valores de pH cercano a 7 (neutro) favorece el proceso de tratamiento.

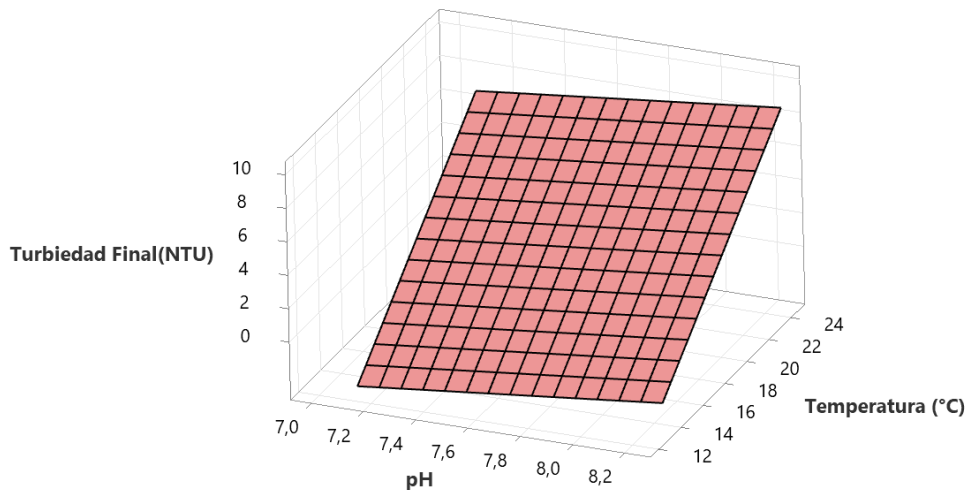


Figura 78. Superficie de respuesta, variables: pH vs Temperatura (°C)
Fuente: Autores

4.3.4.4. Gráficas de superficie de contorno del modelo matemático

La gráfica de contorno de la Figura 79, indica que la turbiedad residual óptima se produce en un rango de turbiedad superior a 300 NTU aproximadamente, pero cuando la temperatura del agua no sobrepasa los 16 °C. Así mismo, se observa una muy pequeña región que indica que, si el agua cruda registra valores de temperatura superior a 18 °C hasta 23 °C, pero con una turbiedad inicial de 50 NTU como máximo, entonces es probable que la turbiedad final del agua tratada sea menor a 2 NTU. Por otro lado, cuando existen condiciones de temperatura mayor a 19 °C con una turbiedad superior a 1500 NTU, provoca que la turbiedad final del agua sea mayor a 4 NTU afectando el proceso de tratamiento. Cabe recalcar que con el posterior proceso de filtración se podría remover aún más la turbiedad para cumplir con la normativa de calidad de agua potable (INEN, 2020).

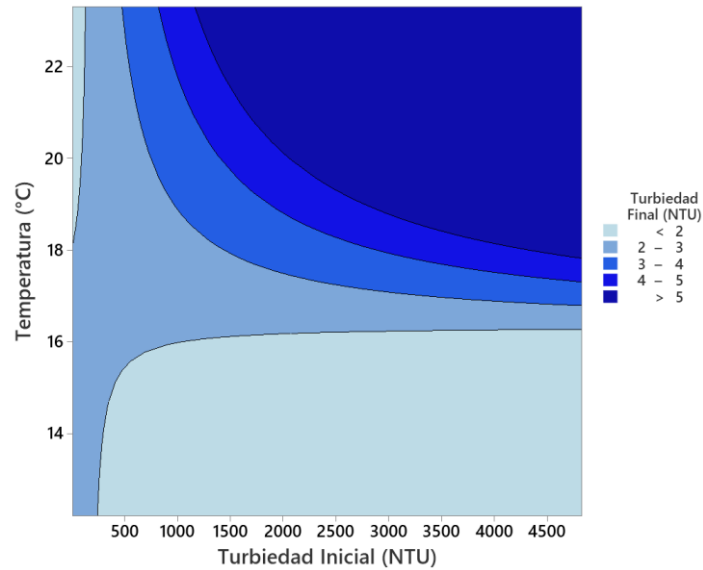


Figura 79. Gráfica de contorno, variables: Turbiedad Inicial (NTU) vs Temperatura (°C)
Fuente: Autores

Según la Figura 80, se puede destacar que la región óptima para que la turbiedad residual sea menor a 2 NTU, se da cuando la turbiedad máxima a tratar registre un valor de 1500 NTU y el pH del agua cruda no supere el valor 7.7. De manera análoga a este análisis, se observa que cuando existen turbiedades superiores a 2500 NTU con pH menor a 7.7; así como, cuando la turbiedad inicial sea menor a 2500 NTU con pH superior a 7.7, la remoción de turbiedad no será efectiva ya que los valores finales serán mayores a 3 NTU en adelante. Cabe recalcar que con el posterior proceso de filtración se podría remover aún más la turbiedad para cumplir con la normativa de calidad de agua potable (INEN, 2020).

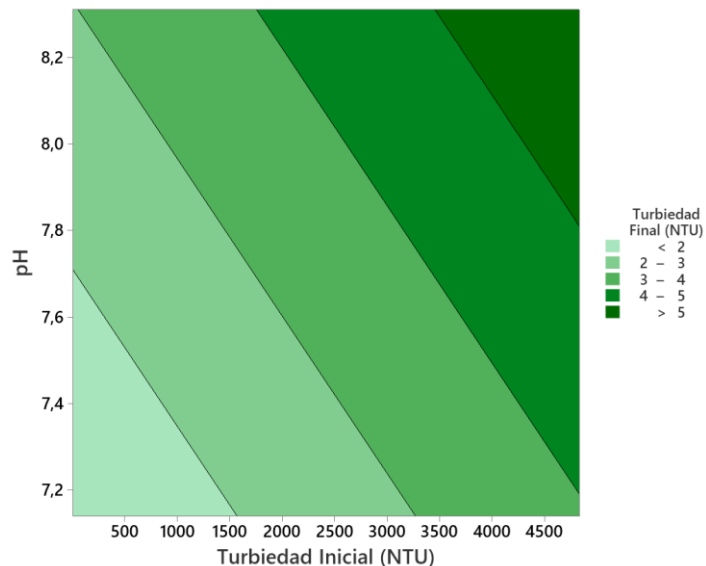


Figura 80. Gráfica de contorno, variables: Turbiedad Inicial (NTU) vs pH
Fuente: Autores

La Figura 81 muestra que para lograr una turbiedad final menor a 2 NTU, es necesario que la temperatura del agua cruda no supere los 17 °C y, a medida que se observe un descenso de temperatura los valores del pH aumenten para mantener óptimo el proceso de tratamiento. Finalmente, se observa que esta combinación de variables indica que al superar los 17 °C en la temperatura del agua cruda y en cualquier rango de pH (7.2 – 8.2), la remoción de turbiedad no es efectiva ya que los valores serán superiores a 2 NTU, inclusive alcanzando valores mayores a 8 NTU, provocando deficiencias en el proceso de tratamiento.

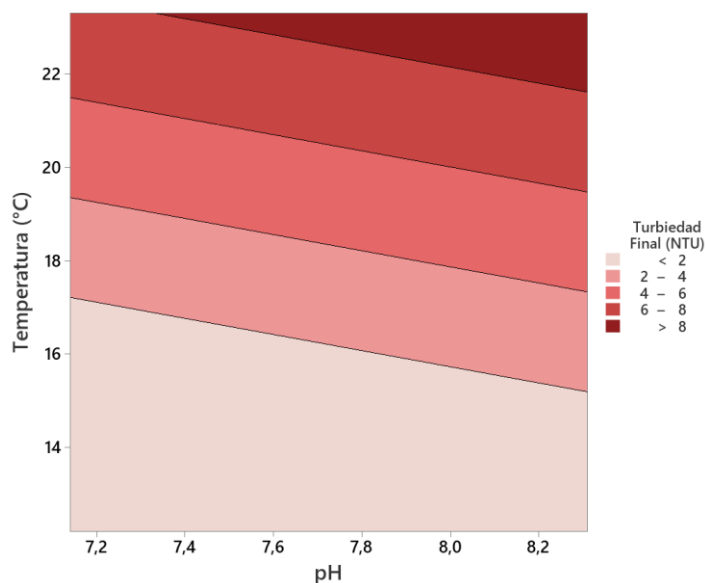


Figura 81. Gráfica de contorno, variables: pH vs Temperatura (°C)
Fuente: Autores

4.3.4.5. Validación externa del modelo matemático

En la Tabla 45 se muestran los datos recolectados para la validación del modelo, en donde desde la hora de inicio se tomó un tiempo de 30 minutos para tomar la muestra de agua a la salida del proceso de sedimentación.

Tabla 45. Datos recolectados para la validación del modelo
Fuente: Autores

Día	Hora	Turbiedad Inicial (NTU)	pH	Temperatura (°C)	Turbiedad Final (NTU)
1	11:00 am – 11:30 am	21.1	6.98	18.6	4.92
	11:30 am – 12:00 pm	25.4	7.00	17.5	5.82
	12:00 pm – 12:30 pm	22.9	7.01	16.7	4.79
	12:30 pm – 13:00 pm	23.3	7.04	15.5	4.65
	13:00 pm – 13:30 pm	20.4	6.87	16.7	5.77
	13:30 pm – 14:00 pm	31.6	6.95	17.8	4.71
	14:00 pm – 14:30 pm	24.7	7.28	19.1	5.43
	14:30 pm – 15:00 pm	27.8	7.02	19.9	4.37
	15:00 pm – 15:30 pm	28.5	6.89	17.6	4.43
	15:30 pm – 16:00 pm	28.8	7.06	17.7	5.77
	16:00 pm – 16:30 pm	37.2	6.91	18.0	3.80
16:30 pm – 17:00 pm	31.5	6.90	18.1	4.48	

Continuación de la Tabla 45

2	10:30 am – 11:00 am	22.4	7.10	15.7	2.54
	11:00 am – 11:30 am	14.1	7.05	14.7	4.18
	11:30 am – 12:00 pm	13.9	7.04	13.9	4.07
	12:00 pm – 12:30 pm	16.8	7.08	14.5	3.77
	12:30 pm – 13:00 pm	24.6	7.12	14.3	3.20
	13:00 pm – 13:30 pm	21.3	7.11	14.4	2.18
	13:30 pm – 14:00 pm	21.7	7.06	14.2	3.18
	14:00 pm – 14:30 pm	23.1	7.10	15.6	4.17
	14:30 pm – 15:00 pm	20.5	7.08	14.3	2.71
	15:00 pm – 15:30 pm	17.6	7.11	15.0	1.85
15:30 pm – 14:00 pm	12.4	7.20	14.5	2.15	

Con los datos recolectados durante dos días en la Planta de Tratamiento de Bayas, se procedió a reemplazar estos datos en el modelo matemático elegido y se determinó los residuos que se obtienen de su aplicación. En la Tabla 46 se muestra los resultados de la aplicación del modelo.

Tabla 46. Resultados de la aplicación del modelo con los datos recolectados en planta
Fuente: Autores

Modelo: $y = -9.2 - 0.006801x_1 - 0.0719x_4 + 1.617x_3 + 0.000416x_1 * x_4$		
Turb_{obs}	Turb_{est}	Residuos
4.92	0.7691	4.1509
5.82	0.8729	4.9471
4.79	0.9378	3.8522
4.65	1.0610	3.5890
5.77	0.7110	5.0590
4.71	0.7774	3.9326
5.43	1.2267	4.2033
4.37	0.7616	3.6084
4.43	0.6905	3.7395
5.77	0.9596	4.8104
3.80	0.7048	3.0952
4.48	0.6789	3.8011
2.54	1.1458	1.3942
4.18	1.1333	3.0467
4.07	1.1701	2.8999
3.77	1.1929	2.5771
3.20	1.2639	1.9361
2.18	1.2442	0.9358
3.18	1.1756	2.0044
4.17	1.1519	3.0181
2.71	1.2027	1.5073
1.85	2.0022	-0.1522
2.15	1.3903	0.7597

Nota: Turb_{obs}: turbiedad medida a la salida del proceso de sedimentación en NTU, Turb_{est}: turbiedad estimada por el modelo matemático en NTU, Residuos = Turb_{obs} - Turb_{est}

Tal como se observa en la Tabla 46, los residuos en su mayoría son bastante grandes, esto debido a que los datos recolectados en planta son altos y los datos predichos por el modelo son bajos. Los datos de planta son altos debido a que el día de la toma de muestras, el tratamiento de agua no se encontraba en óptimas condiciones, ya que se estaba dosificando menos PAC provocando que a la salida de los sedimentadores la turbiedad no registre valores bajos, es decir el proceso de

coagulación-floculación no estaba optimizado. Sin embargo, con los datos recolectados se realizó un análisis estadístico para la normalidad de los residuos, mismos que se muestran en la Tabla 47.

Tabla 47. Resultados estadísticos de las pruebas de normalidad de los residuos de la validación del modelo
Fuente: Autores

Prueba Estadística	p-value	Nivel de significancia
Shapiro Wilks	0.3489	0.05

Los resultados indican que los residuos generados para validar el modelo, siguen una distribución normal ya que el *p-value* es superior al nivel de significancia del 5%. En tanto que en la Figura 82 se observa que gráficamente los residuos están distribuidos normalmente.

Si bien los residuos del modelo matemático están distribuidos normalmente, es importante resaltar que los datos obtenidos para la validación del modelo fueron recolectados únicamente durante dos días en donde no se observó precipitación y por tanto no se obtuvieron valores de turbiedad del agua cruda mayores a 37.2 NTU, acortando el rango de validación del modelo. Esto quiere decir que el modelo matemático tendría que hacer uso de datos con mayores turbiedades iniciales y mayor número de muestras.

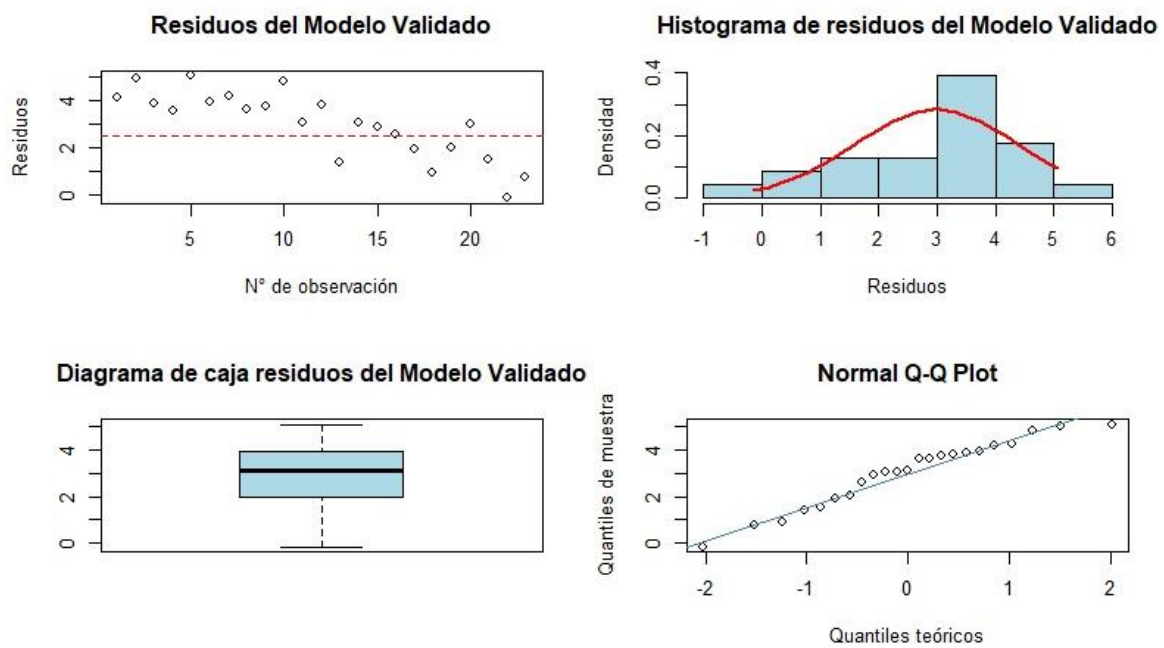


Figura 82. Exploración visual de los residuos de la validación del modelo matemático
Fuente: Autores

Los resultados de los otros parámetros de validación del modelo indicaron que el RMSE equivale a 3.292 y el MSE equivale a 10.836. La comparación de todos los indicadores entre el modelo calibrado y la validación del mismo se muestran en la Tabla 48. Además, en la Figura 83 se muestra la comparación de la turbiedad final entre los datos observados y los datos estimados por el modelo.

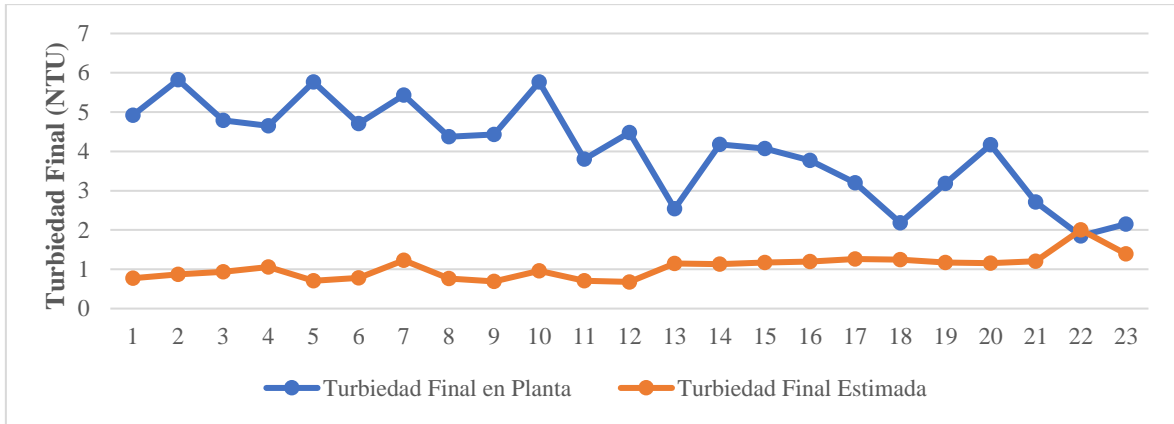


Figura 83. Comparación en la turbiedad final en planta y la turbiedad final estimada por el modelo matemático
Fuente: Autores

Como se observa en la Tabla 48, el error medio cuadrático del modelo validado es mucho más alto que el modelo calibrado inicialmente; así mismo, la raíz del MSE aumenta y por otro lado el R^2 pred disminuye desde 77.83% a un valor de 37.68%.

Tabla 48. Comparación entre el modelo calibrado y el modelo validado
Fuente: Autores

Descripción	RMSE	MSE	R^2 pred
Modelo calibrado	0.6644	0.44142	77.83%
Modelo validado	3.3918	10.8358	37.68%

Por lo tanto, con los resultados de la validación del modelo es necesario indicar lo siguiente:

- Los residuos del modelo matemático validado siguen una distribución normal, teniendo en cuenta que la mayoría de los datos ingresados para la prueba del modelo no varían mucho en cuanto a la turbiedad del agua cruda, pH y temperatura.
- El coeficiente de determinación de predicción disminuye considerablemente a menos del 50%, esto se debe a que los datos utilizados para la validación del modelo no abarcan las mismas condiciones para la calibración del modelo matemático.
- Es claro observar que ambos errores estadísticos (RMSE y MSE) aumentan en comparación con los resultados del modelo calibrado. Debido a que estos indicadores dependen en gran medida del tamaño de la muestra, por lo tanto, se debe tener en consideración que los resultados obtenidos del modelo validado, se analizaron únicamente en base a una muestra de 23 datos, siendo necesario ampliar el tamaño de la misma, para abarcar mayores valores de turbiedad, teniendo en cuenta que en la calibración del modelo estuvieron implicadas muestras de agua cruda con turbiedades superiores a 1000 NTU, es decir que se debería abarcar un mayor número de muestras durante las épocas de invierno y verano.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

El proceso de coagulación-floculación permite remover la turbiedad, color del agua y cualquier sustancia que afecte la calidad del recurso, catalogándose como una de las etapas de tratamiento más importantes para la potabilización. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la Planta de Tratamiento de la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Se evaluó la dosificación de policloruro de aluminio (PAC) sobre el rendimiento de la coagulación-floculación, simulando el proceso a través de ensayos de jarras con muestras de agua cruda durante las épocas de invierno y verano, y se determinó que el promedio del porcentaje de remoción de turbiedad fue de 93.73% donde la mayoría de los valores de turbiedad residual fue de 2 NTU aproximadamente, cumplimiento con la normativa INEN 1108 donde se indica que la turbiedad del agua potable debe ser menor o igual a 5 NTU.
- Tras realizar las simulaciones del proceso de coagulación-floculación se determinó las dosis óptimas de PAC, con el fin de optimizar el tratamiento de potabilización en rangos de turbiedad altos y bajos. Entendiéndose, que cuando no se optimiza este proceso y se dosifica bajo criterios empíricos, esto puede traducirse en pérdidas económicas al no dosificar la cantidad adecuada volviendo ineficiente al tratamiento.
- Se logró realizar las pruebas de jarras para simular el proceso de coagulación-floculación y se determinó que es una excelente metodología para identificar qué es lo que sucede en planta ayudando a determinar las dosis óptimas de coagulante y floculante, así como determinar parámetros influyentes en el tratamiento como el pH y la temperatura.
- Teniendo en cuenta que en la literatura se indica que el proceso de coagulación-floculación remueve además de turbiedad y color, la materia orgánica presente en el agua, el cual es un proceso eficiente cuando el pH no supera un valor de 7.54. Esta condición se evidenció en algunos ensayos de jarras donde el agua presentó una coloración amarilla (presencia de materia orgánica) y se tuvo que aplicar dosis cercanas a 30 mg/L para asegurar una turbiedad residual menor a 2 NTU en un nivel de 50 NTU.
- Los resultados del análisis de pH indicaron que el PAC no causó una gran variación en el pH al final del ensayo de jarras y ubicó el resultado en valor promedio de pH de 7.06

obteniéndose que el coagulante vario el pH en 0.48 unidades y lo estabilizó hasta un pH muy cercano a 7.

- Los resultados obtenidos para la temperatura del agua cruda indicaron que en su gran mayoría los valores estuvieron en un rango de 12 a 16 °C. La literatura indica que mientras la temperatura del agua sea menor, esto provoca que las dosis de coagulante sean mayores. Por consiguiente, los resultados obtenidos a lo largo de la realización de las pruebas de jarras evidenciaron que en algunas ocasiones fue necesario agregar dosis elevadas de PAC para bajos niveles de turbiedad, entendiéndose que este coagulante requiere menores dosificaciones a comparación de los coagulantes convencionales como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico.
- Se logró elaborar una curva de dosificación de PAC en base a los resultados obtenidos en las pruebas de jarras, considerando que también este resultado representa una actualización de la curva de dosificación de SA determinada hace 7 años en donde la relación encontrada entre las dosis de SA fue 1.85 veces mayor a las dosis de PAC. Además, la curva encontrada en este estudio permitirá a los operarios determinar la dosis óptima que se debe añadir al agua acorde a los distintos niveles de turbiedad del agua cruda que ingrese al proceso de tratamiento.
- La dosis de PAC encontradas en este estudio, estuvieron en un rango de 6 a 45 mg/L para niveles de turbiedad desde 6 a 6000 NTU, por lo que la curva de dosificación en base a los tres criterios analizados es una buena herramienta para la potabilización del agua. Además de recalcar la importancia de los resultados del tercer criterio en donde se obtuvo una curva de dosificación para turbiedades superiores a 1000 NTU. Este resultado puede ser utilizado como una línea base para otros estudios y plantas en donde se trabaje con aguas en esos niveles de turbiedad.
- Con el análisis de costos realizado se concluye que, según los datos obtenidos para los 4 meses del estudio, la JAAPRB tendría un beneficio económico, debido a que el consumo de PAC disminuiría otorgando un ahorro de \$290.70 y un ahorro anual de \$872.10. Por lo tanto, si la PTAP empezara a dosificar el coagulante en función de la curva encontrada en este estudio se podrían tener un mayor beneficio económico.
- Se logró obtener un modelo que evalué la eficiencia del proceso de coagulación-floculación a través de la MSR. Los resultados estadísticos de la calibración del modelo mostraron que

el mismo es capaz de predecir la turbiedad residual en base a los parámetros turbiedad, pH y temperatura del agua cruda.

- A nivel estadístico no se observó ninguna relación entre la turbiedad residual y la dosis de PAC, sin embargo, a nivel de planta es un parámetro influyente ya que esta determina si la remoción será efectiva o no asegurando la calidad del agua en el tratamiento.
- Con los resultados obtenidos en la validación del modelo, todavía no es posible afirmar que el modelo matemático pueda o no ser una herramienta para la Planta de Tratamiento, debido a que es necesario seguir realizando una validación con datos durante diferentes épocas y condiciones en las que se trate agua cruda. Además de esto es necesario que el proceso de coagulación-floculación se encuentre en óptimas condiciones, asegurando que la turbiedad del agua a la salida del proceso de sedimentación no se encuentre en rangos de 3 a 5 NTU, si no de forma contraria, se mantenga generalmente con valores menores a 2 NTU. Esto quiere decir que, para cumplir este requerimiento, se debe empezar a aplicar la curva de dosificación de PAC determinada en este estudio.
- Se cumplió con todos los objetivos planteados en este estudio, mismo que permitirá a la Planta de Tratamiento de Bayas, optimizar el tratamiento de agua, debido a que el proceso de coagulación-floculación es clave para el correcto funcionamiento de las etapas de tratamiento.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda que en la Planta de Potabilización de Bayas se empiece a realizar un control y registro de todos los parámetros posibles del agua cruda y tratada, considerándose como los principales a la turbiedad, color, pH y dosis aplicada. El control de los parámetros indicados debería ser realizado con equipos que otorguen mayor confiabilidad de medición y se encuentren calibrados en todo momento. Por lo tanto, sería importante realizar una inversión para la adquisición de equipos como: equipo de jarras, turbidímetro y medidor de pH y temperatura para el control de la calidad del agua y registro de los parámetros del agua cruda.
- Dado que la curva de dosificación de PAC encontrada en este estudio es nueva, sería recomendable seguir aplicando ensayos de jarras para constatar la fiabilidad del resultado encontrado en relación a las dosis óptimas.

- Dado que la forma de dosificación del PAC en la planta es realizada bajo un mecanismo de rosca, se recomienda que se defina el número de vueltas necesarias para aplicar una dosis específica determinada en base a la curva de dosificación.
- Para asegurar que el recurso hídrico sea apto para el consumo humano es necesario controlar todos los procesos de tratamiento en base a criterios técnicos de operación, y no trabajar de forma empírica o solo en base a la observación. Por lo tanto, se recomienda que los operarios de la planta tengan una capacitación completa del manejo de equipos de laboratorio, toma de muestras y análisis fisicoquímico tanto del agua cruda como tratada.
- La metodología técnica y estadística empleada para la determinación de la curva de dosificación puede ser utilizada en otros estudios con la misma temática o enfoque.
- Se recomienda que para aplicar la MSR, se debería utilizar diferentes softwares estadísticos, que ayuden a verificar los resultados, ya que limitarse únicamente al uso de un solo software podría ocasionar que los resultados sean diferentes.
- Con motivo de investigación se recomienda realizar un estudio en donde se apliquen coagulantes naturales para la remoción de turbiedad y color dentro del proceso de coagulación-floculación. Esto debido que los coagulantes naturales podrían ser más amigables con el medio ambiente y se dejaría de utilizar productos químicos para la potabilización del agua.

CAPÍTULO VI

6. Referencias Bibliográficas

- Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, 40(2), 10–17. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120664002.pdf>
- Adesina, O., Abdulkareem, F., Yusuff, A. S., Lala, M., & Okewale, A. (2019). Response surface methodology approach to optimization of process parameter for coagulation process of surface water using Moringa oleifera seed. *South African Journal of Chemical Engineering*, 28(August 2018), 46–51. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2019.02.002>
- Aliaga, S. (2010). *Aplicación del proceso fenton y coagulación - floculación para la regeneración de aguas depuradas* [Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza]. <https://zagan.unizar.es/record/5122/files/TAZ-PFC-2010-193.pdf>
- Alvarado, C., Pérez, H., & Saba, C. (2014). Evaluación del uso de policloruro de aluminio en conjunto con sulfato de aluminio en el proceso de coagulación de una planta de potabilización de agua en el estado Carabobo. *Ingeniería y Sociedad*, 10(1), 35–46. <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/IngenieriaYSociedad/a10n1/art03.pdf>
- American Water Works Association. (2011). *Water Quality & Treatment A Handbook on Drinking Water* (J. K. Edzwald (ed.); 6th ed.). McGraw-Hill eBooks.
- Andía, Y. (2000). *Tratamiento de agua coagulación y floculación*. https://www.academia.edu/40515416/Tratamiento_de_Agua_coagulación_y_floculación
- Apostol, G., Kouachi, R., & Constantinescu, I. (2011). Optimization of coagulation-flocculation process with aluminum sulfate based on response surface methodology. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, 73(2), 77–84. [https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/APOSTOL et al 2011 Optimization of Coagulation Flocculation Process with Aluminium Sulfate Based on Surface Methodology.pdf#:~:text=A coagulation-flocculation process%2C based on aluminum sulfate](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/APOSTOL%20et%20al%202011%20Optimization%20of%20Coagulation%20Flocculation%20Process%20with%20Aluminium%20Sulfate%20Based%20on%20Surface%20Methodology.pdf#:~:text=A%20coagulation-flocculation%20process%20based%20on%20aluminum%20sulfate)
- Arboleda, J. (2000). Teoría y práctica de la purificación del agua. In R. Pertuz Molina (Ed.), *Colombia: Ed. Mc Graw Hill* (3rd ed.). McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A. https://www.academia.edu/49010823/Teoria_y_Practica_de_la_Purificacion_del_H2O_Tomo_1_Arboleda_Valencia
- Birjandi, N., Younesi, H., Bahramifar, N., Ghafari, S., Zinatizadeh, A. A., & Sethupathi, S. (2013). Optimization of coagulation-flocculation treatment on paper-recycling wastewater: Application

- of response surface methodology. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 48(12), 1573–1582. <https://doi.org/10.1080/10934529.2013.797307>
- Calle, L., & Zambrano, C. (2015). *Optimización del proceso de floculación y coagulación de la planta potabilizadora de la Junta de Agua Potable de Bayas* [Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/22162/1/tesis.pdf.pdf>
- Chele, Y. (2019). *Determinación de la dosis del coagulante sulfato de aluminio tipo A para el tratamiento de agua potable en la Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Alcantarillado del Cantón Sucúa* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/13199/1/236T0458.PDF>
- Chulluncuy, N. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería Industrial*, 29, 153–224. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=337428495008>
- Cogollo, J. (2011). *Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclorigenato de aluminio*. 165, 18–27. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/26091>
- Comisión Nacional del Agua. (2016). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento - Diseño de plantas potabilizadoras de tecnología simplificada. In Comisión Nacional del Agua (Ed.), *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro24.pdf>
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Howe, K. J., Tchobanoglous, G., & Borchardt, J. (2012). *MWH's Water Treatment Principles and Design* (J. Wiley (ed.); 3rd ed.). MWH. <https://doi.org/10.1002/9781118131473>
- EPA. (2002). *Water Treatment Manuals - Coagulation, Flocculation & Clarification* (N. Bourke, G. Carty, G. O. Leary, M. Crowe, & D. Page (eds.); 1st ed.). https://www.epa.ie/publications/compliance--enforcement/drinking-water/advice--guidance/EPA_water_treatment_mgt_coag_flocc_clar2.pdf
- Feng, C., Li, L., & Sadeghpour, A. (2020). A comparison of residual diagnosis tools for diagnosing regression models for count data. *BMC Medical Research Methodology*, 20(1), 1–21. <https://doi.org/10.1186/s12874-020-01055-2>
- Fernández, B. (2018). *Validación interna de modelos de regresión logística comando Validation (Stata)* [Universidad Complutense de Madrid]. https://eprints.ucm.es/49486/1/TFM_Borja_Fernandez_Felix.pdf

- Fernandez, M., Aruajo, R., & Eiji Ito, A. (1998). *Manuel de Hidráulica Azevedo Netto* (8th ed.). EDITORA EDGARD BLUCHER LTDA.
- Fox, J. (2016). *Applied regression analysis and generalized linear models* (3rd ed.). SAGE Publications India Pvt. Ltd. http://www.ievbras.ru/ecostat/Kiril/R/Biblio_N/R_Eng/Fox2016.pdf
- Frost, J. (2013). *Multiple regression analysis: Use adjusted R-squared and predicted R-squared to include the correct number of variables*. The Minitab Blog. <https://blog.minitab.com/en/adventures-in-statistics-2/multiple-regression-analysis-use-adjusted-r-squared-and-predicted-r-squared-to-include-the-correct-number-of-variables>
- Fúquene, D., & Yate, A. (2018). Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. *Ecapma*, 1(1), 1–7. <https://doi.org/https://doi.org/10.22490/ECAPMA.2771>
- Galindo, G. (2018). *Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio granulado tipo b en la planta de tratamiento de agua potable Yurajhuanca – Emapa Pasco*. [Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/347/1/TESIS_GIANCARLO_GALINDO_YANTAS1.pdf
- García Altamirano, V. (2018). *Implementacion de un floculador horizontal y un sedimentador de alta tasa*.
- García Ávila, F. (2014). Filtración rápida para reemplazar a un sistema de filtración lenta. *ResearchGate*, *Tratamiento de Agua*. https://www.researchgate.net/publication/357339370_Design_of_a_treatment_plant_with_rapid_filtration_to_replace_a_slow_filtration_system_Disenio_de_una_planta_de_tratamiento_con_filtracion_rapida_para_reemplazar_a_un_sistema_de_filtracion_lenta
- García, F., Avilés, A., Ordoñez, J., Guanuchi, C., Flores del Pino, L., & Ramos, L. (2021). Modeling of residual chlorine in a drinking water network in times of pandemic of the SARS-CoV-2 (COVID-19). *Sustainable Environment Research*, 31(1). <https://doi.org/10.1186/s42834-021-00084-w>
- García Pérez, A., & Rojas Vargas, A. (2006). Comparación de los floculantes CHEMEDD A-41, 42 y 43 de la firma CHEMATEK, el IP-600 de la firma ZAR CIA y el Percol, verión canadiense del MAGNAFLOC R-155. *Tecnología Química*, 26(3), 41–47. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543751006%0ACómo>
- Gil, C. (2018). Regresión Lineal Simple. *GitHub*, 1–31. <https://github.com/CristinaGil/Ciencia-de->

Datos-R/blob/master/PDF/Regresion_lineal_simple.pdf

- Gökçek, Ö., & Özdemir, S. (2020). Optimization of the coagulation--flocculation process for slaughterhouse wastewater using response surface methodology. *CLEAN Soil Air Water*, 48(7–8). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/clen.202000033>
- Gómez, N. (2005). *Remoción de materia orgánica por coagulación-floculación* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/2841/nestoralejandrogomezpuentes.2005.pdf?sequence=1>
- Gorgas, J., Cardiel, N., & Zamorano, J. (2011). *Estadística básica para estudiantes de ciencias*. Universidad Complutense de Madrid. https://www.academia.edu/48816675/Estadística_Básica_para_estudiantes_de_Ciencias_Gorgas_García
- HACH. (2013). *Serie DR 800 – Colorímetros compactos para 20 , 50 o 90 test*. <https://es.hach.com/product.detail-downloads.jsa?id=26096878244>
- HACH. (2016). *Turbidímetro de sobremesa de la serie TL23*. <https://es.hach.com/turbidimetros/turbidimetros-de-sobremesa-de-la-serie-tl23/family-downloads?productCategoryId=50908076310>
- Hassan, N. (2020). Water Quality Parameters. In J. K. Summers (Ed.), *Water Quality - Science, Assessments and Policy* (pp. 1–18). Intechopen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89657>
- Hendricks, D. (2011). *Fundamentals of Water Treatment Unit Processes Physical, Chemical, and Biological*. Taylor & Francis Group, LLC.
- INEN. (2020). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1108:2020 Agua para Consumo Humano, Requisitos. In *Instituto Ecuatoriano de Normalización* (p. 14). <https://www.normalizacion.gob.ec/>
- Izquierdo, A. (2015). *Determinación de la dosis óptima del coagulante sulfato de aluminio aplicado en la planta de tratamiento de agua de la central termoeléctrica “El Descanso”* [Universidad de Cuenca]. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23008>
- J. Howe, K., Hand, D. W., Crittenden, J. C., Trussel, R. R., & Tchobanoglous, G. (2012). *Principles of water treatment* (J. Wiley (ed.); 1st ed.). MWH.
- Jiang, J. (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>

- Jin, Y. (2005). *Use of a High resolution photographic technique for studying coagulation/flocculation in water treatment* (Issue May) [Universidad de Saskatchewan]. https://central.bac-lac.gc.ca/item?id=TC-SSU-06042005213443&op=pdf&app=Library&oclc_number=1007719270
- Jowa, T., & Mguni, L. L. (2015). Treatment of Low Turbidity Water Using Poly-Aluminium Chloride (PAC) and Recycled Sludge : Case study Chinhoyi. *Zimbabwe Journal of Science & Technology*, 10, 101–108. <https://www.semanticscholar.org/paper/Treatment-of-Low-Turbidity-Water-Using-Chloride-and-Jowa-Mguni/4d26c4779e1b1392269d778d8edbdd143548c3b4>
- Kakoi, B., Kaluli, J. W., Ndiba, P., & Thiong'o, G. (2017). Optimization of Maerua Decumbent bio-coagulant in paint industry wastewater treatment with response surface methodology. *Journal of Cleaner Production*, 164, 1124–1134. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.240>
- Kumar, N., & Balasundaram, N. (2017). Efficiency of PAC in water treatment plant & disposal of its sludge. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(12), 3253–3262. https://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12n12_36.pdf
- Mhaisalkar, V. A., Paramasivam, R., & Bhole, A. G. (1986). An innovative technique for determining velocity gradient in coagulation-flocculation process. *Water Research*, 20(10), 1307–1314. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(86\)90162-4](https://doi.org/10.1016/0043-1354(86)90162-4)
- Montgomery, D. C. (2004). Diseño y análisis de experimentos. In A. R. Griselda Zetina Vélez (Ed.), *Limusa Wiley* (2nd ed.). LIMUSA, S.A. GRUPO NORIEGA EDITORES. https://www.academia.edu/9101936/Diseño_y_análisis_de_experimentos_Douglas_C_Montgomery
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2014). Applied Statistics and Probability for Engineers. In W. Ashenberg (Ed.), *Proceedings - 26th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, WAINA 2012* (6th ed.). WILEY. <https://doi.org/10.1109/WAINA.2012.175>
- Mora, M., & Sagal, M. (2019). *Optimización de los procesos de coagulación, floculación y cloración en la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas* [Universidad de Cuenca]. [https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/33515/1/Trabajo de Titulación.pdf](https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/33515/1/Trabajo%20de%20Titulación.pdf)
- OAKTON. (2000). *Medidor pH 510*. <https://documents.in/document/medidor-ph-510-oakton-instruments-latin-impedancia-de-entrada-temperatura.html?page=6>
- Ohaus Corporation. (2000). *Instruction manual adventurer balances*.

https://www.ohaus.ca/PU/PDF/Adventurer_Man.pdf

- OMS. (2011). *Guías para la calidad del agua de consumo humano* (4th ed.). <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Park, S. M., Heo, T. Y., Park, J. G., & Jun, H. B. (2016). Effects of hydrodynamics and coagulant doses on particle aggregation during a rapid mixing. *Environmental Engineering Research*, 21(4), 365–372. <https://doi.org/10.4491/eer.2016.046>
- Peláez, M. (2016). Modelos de regresión: lineal simple y regresión logística. *Revista Seden*, 195–214. <https://revistaseden.org/files/14-CAP 14.pdf>
- Pérez, E. (2015). Control de calidad en agua para consumo humano en la región occidental de Costa Rica. *Tecnología En Marcha*, 29(3), 3–14. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i3.2884>
- Pérez Garay, I. (2015). *Optimización de la dosificación de sulfato de aluminio para el tratamiento de agua potable del Distrito de Vilcacoto* [Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/4549/Perez G..pdf?sequence=1>
- Phipps & Bird. (1997). *PB-700 Standar Jar Tester*. <https://pim-resources.coleparmer.com/instruction-manual/99521-00-05.pdf>
- Quevedo, H., & García, J. (2011). *Métodos estadísticos para la Ingeniería Ambiental* (R. Garza Sánchez (ed.); 1st ed.). Fabro Editores.
- Restrepo, H. (2009). *Evaluación del proceso de coagulación - floculación de una planta de tratamiento de agua potable* [Universidad Nacional de Colombia]. https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/2561/15372239_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Reyes, L. (2011). *Análisis de Regresión Logarítmica*. Estadística, Matemática y Computación. <http://reyesestadistica.blogspot.com/2011/07/analisis-de-regresion-logaritmica.html>
- Rodríguez, C. (2008). *Uso y control del proceso de coagulación en plantas de tratamiento de agua potable* [Universidad de Sucre]. <https://repositorio.unisucre.edu.co/bitstream/handle/001/298/628.162R696.pdf?sequence=2>
- Romero, J. (1999). *Potabilización Del Agua* (S. A. de C. V. ALFAOMEGA GRUPO EDITOR (ed.); 3rd ed.). Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. <file:///C:/Users/Andres Ramirez/Downloads/314629477-Romero-Rojas-Jairo-Alberto-Potabilizacion-Del-Agua.pdf>
- Romero, J. (2009). *Calidad del Agua* (C. Salazar Perdomo & J. Cañas Sepúlveda (eds.); 3rd ed.).

Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Salciccioli, J. D., Crutain, Y., Komorowski, M., & Marshall, D. C. (2016). Sensitivity Analysis and Model Validation. In *Secondary Analysis of Electronic Health Records* (pp. 265–268). Springer Nature. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-43742-2.pdf>

Shandong Jiahua Water Treatment Technology. (2021). *Certificate of analysis*.

Sierra, C. (2011). *Calidad del agua Evaluación y Diagnóstico* (L. D. López Escobar (ed.); 1st ed.). Ediciones de la U.

SOLENIS. (2014). *Praestol™ 650TR – Agente Floculante*.

Torra, A., Valero, F., Bisbal, J. L., & Tous, J. F. (1998). Policloruro de aluminio en el proceso de potabilización de aguas superficiales - Su comportamiento como coagulante dentro del ámbito de la química del aluminio. *Tecnología Del Agua*. <https://cidta.usal.es/cursos/etap/modulos/libros/policloruro.pdf>

Triola, M. F. (2019). Estadística. In *Pearson* (12th ed., Vol. 11, Issue 1). Pearson Education Inc.

Vargas, L. de. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida Manual I: Teoría Tomo I* (V. Maldonado Yactayo, L. AAndrade, I. Barbieri, & I. Sánchez (eds.); 1st ed.). CEPIS/OPS. http://www.ingenieriasanitaria.com.pe/pdf/manual1/tomo1/ma1_tomo1_indice.pdf

Vásconez, D. (2013). *Reducción del nivel de sólidos suspendidos del agua de retrolavado en la etapa de filtración* [Universidad Central del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/1500/1/T-UCE-0017-40.pdf>

Walpole, R. E., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (G. López Ballesteros & F. Hernández Carrasco (eds.); 9th ed.). Pearson Educación.

Wang, L. K., Hung, Y.-T., & Shammas, N. K. (2005). Physicochemical Treatment Processes. In P. F. Cleary (Ed.), *HUMANA PRESS* (3rd ed.). Humana Press Inc.

Wei, N., Zhang, Z., Liu, D., Wu, Y., Wang, J., & Wang, Q. (2015). Chinese Journal of Chemical Engineering Coagulation behavior of polyaluminum chloride: Effects of pH and coagulant dosage. *CJCHE*, 23(6), 1041–1046. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2015.02.003>

Zand, A. D., & Hoveidi, H. (2015). Comparing aluminium sulfate and poly-aluminium chloride (PAC) performance in turbidity removal from synthetic water. *Journal of Applied Biotechnology Reports*, 2(3), 287–292. http://www.biotechrep.ir/article_69189_15e78418c10724dd9a027deb22e59857.pdf

CAPÍTULO VII

7. Anexos

7.1. Anexo 1: NTE INEN 1108:2020



Quito – Ecuador

NORMA
TÉCNICA
ECUATORIANA

NTE INEN 1108
Sexta revisión

AGUA PARA CONSUMO HUMANO. REQUISITOS

DRINKING WATER. REQUIREMENTS

ICS: 13.060.20

10
Páginas

AGUA PARA CONSUMO HUMANO REQUISITOS

1. OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma establece los requisitos del agua para consumo humano y aplica al agua proveniente de sistemas de abastecimiento, suministrada a través de sistemas de distribución.

De esta norma se excluyen las aguas minerales naturales, las aguas purificadas envasadas y aguas purificadas de uso farmacéutico.

2. REFERENCIAS NORMATIVAS

Los siguientes documentos, en su totalidad o en parte, son indispensables para la aplicación de este documento. Para referencias fechadas, solamente aplica la edición citada. Para referencias sin fecha, aplica la última edición (incluyendo cualquier enmienda).

ISO 5667-5, *Water quality – Sampling – Part 5: Guidance on sampling of drinking water from treatment works and piped distribution systems*

NTE INEN-ISO 5667-1, *Calidad del agua – Muestreo – Parte 1: Guía para el diseño de los programas de muestreo y técnicas de muestreo.*

NTE INEN-ISO 5667-3, *Calidad del agua – Muestreo – Parte 3: Conservación y manipulación de las muestras de agua*

NTE INEN-ISO 19458, *Calidad del agua – Muestreo para el análisis microbiológico*

NTE INEN 52, *Reglas para redondear números*

EPA 1623, *Cryptosporidium and Giardia in Water by Filtration/IMS/FA*

Standard Methods 2120, *Color*

Standard Methods 2130, *Turbidity*

Standard Methods 3111, *Metals by flame atomic absorption spectrometry*

Standard Methods 3112, *Metals by cold-vapor atomic absorption spectrometry*

Standard Methods 3113, *Metals by electrothermal atomic absorption spectrometry*

Standard Methods 3114, *Arsenic and selenium by hydride generation/atomic absorption spectrometry*

Standard Methods 4500-Cl⁻, *Chloride*

Standard Methods 4500-F⁻, *Fluoride*

Standard Methods 4500-NO₂⁻, *Nitrogen (Nitrite)*

Standard Methods 4500-NO₃⁻, *Nitrogen (Nitrate)*

Standard Methods 9221, *Multiple-tube fermentation technique for members of the coliform group*

Standard Methods 9222, *Membrane filter technique for members of the coliform group*

3. TÉRMINOS Y DEFINICIONES

Para los efectos de esta norma, se adoptan las siguientes definiciones:

3.1

agua para consumo humano

Agua utilizada para beber, preparar y cocinar alimentos u otros usos domésticos, independiente del origen y suministro, con características físicas, químicas y microbiológicas que garanticen su inocuidad y aceptabilidad para el consumo humano.

NOTA. El agua para consumo inocua se conoce también como "agua potable".

3.2

sistema de abastecimiento

Sistema, que incluye la infraestructura hidráulica y trabajos auxiliares, construido para el funcionamiento de la captación, conducción, tratamiento, almacenamiento y sistema de distribución del agua para consumo humano.

3.3

sistemas de distribución

Comprenden la infraestructura hidráulica y trabajos auxiliares construidos desde el almacenamiento hasta la acometida domiciliaria.

NOTA. Otras alternativas de distribución son camiones cisternas (tanqueros) y depósitos móviles.

3.4

límite permitido

Valor de un requisito fijado dentro del ámbito del conocimiento científico y tecnológico del momento, que no ocasiona ningún riesgo significativo para la salud humana.

4. REQUISITOS

4.1 El agua para consumo humano debe presentar un sabor y olor aceptables.

4.2 El agua para consumo humano debe cumplir los requisitos físicos y químicos indicados en la Tabla 1.

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

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

^a Se conoce también como *Turbidez*.

^b Los resultados obtenidos deben expresarse con el mismo número de cifras significativas de los límites permitidos, aplicando las reglas para redondear números indicadas en NTE INEN 52.

^c En el caso de que sean usados métodos de ensayo alternativos a los señalados, estos deben ser normalizados. En el caso de no ser un método normalizado, este debe ser validado.

4.3 El agua para consumo humano debe cumplir los requisitos microbiológicos indicados en la Tabla 2.

TABLA 2. Requisitos microbiológicos del agua para consumo humano

Parámetro	Unidad	Límite permitido	Método de ensayo ^a
Coliformes fecales	Número/100 mL	Ausencia	Standard Methods 9221 ^b Standard Methods 9222 ^c
<i>Cryptosporidium</i>	Número de ooquistes/ L	Ausencia	EPA 1623
<i>Giardia</i>	Número de quistes/ L	Ausencia	EPA 1623

^a En el caso de que sean usados métodos de ensayo alternativos a los señalados, estos deben ser normalizados. En el caso de no ser un método normalizado, este debe ser validado.

^b La ausencia corresponde a " $< 1,1$ NMP/100 mL".

^c La ausencia corresponde a " < 1 UFC/100 mL".

5. MUESTREO

5.1 El muestreo para el análisis de requisitos químicos y físicos debe realizarse de acuerdo con lo establecido en NTE INEN-ISO 5667-1, NTE INEN-ISO 5667-3 e ISO 5667-5.

5.2 El muestreo para el análisis de requisitos microbiológicos debe realizarse de acuerdo con lo establecido en NTE INEN-ISO 19458.

7.2. Anexo 2: Permiso para la utilización del equipo de jarras



Cuenca, 13 de julio de 2021

Ing.
Santiago Luna Romero
GERENTE DE LA EMAPAL EP
Su despacho

De nuestra consideración:

Reciba un cordial saludo y deseándole éxitos en sus importantes funciones.

El motivo de la presente es solicitar de la manera más comedida, se permita el uso del equipo de jarras que se dispone en la planta de tratamiento de Mahuarcay. El uso de este equipo tiene el propósito de realizar un proyecto de tesis titulado "Estudio experimental del proceso de coagulación en una planta de potabilización usando Policloruro de Aluminio".

El trabajo de titulación será realizado para la Junta Administradora de Agua Potable de Bayas. Los estudiantes Mateo Patiño Ullauri y Bryan Vallejo Chuchuca serán las personas que realizarán las pruebas en este equipo desde el mes de agosto de 2021 hasta marzo de 2022. El uso del equipo será de unos dos a tres días a la semana según las condiciones climáticas.

Por la favorable atención a la presente, anticipamos nuestro agradecimiento.

MARCO TULIO RAMIREZ MATAMOROS
Firmado digitalmente
por MARCO TULIO
RAMIREZ MATAMOROS
Fecha: 2021.07.13
09:00:32 -05'00'

Ing. Marco Ramírez Matamoros
Presidente de la Unidad de Titulación
de la carrera de Ing. Ambiental
de la Universidad de Cuenca

FAUSTO FERNANDO GARCIA AVILA
Firmado digitalmente
por FAUSTO FERNANDO
GARCIA AVILA
Fecha: 2021.07.13
11:25:24 -05'00'

Ing. Fernando García Ávila
Docente tutor del
trabajo de titulación

e-mail de contacto: fernando.garcia@ucuenca.edu.ec

7.3. Anexo 3: Resultados de las pruebas o ensayos de jarras

En esta sección se muestra un fragmento de los ensayos de jarras realizados para determinar la dosis óptima de PAC en distintos valores de turbiedad del agua cruda.

Tabla 49. Resultados de la prueba de jarras para una turbiedad de 10.80 NTU
Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS					
	Fecha de toma de la muestra		11/08/2021		
	Hora de toma de la muestra		08:30 am		
	Fecha del ensayo de jarras		11/08/2021		
	Hora del ensayo de jarras		09:00 am		
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	14	Concentración (%)	2.5%
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	10.80	104		7.4	12.9
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)
4	0.32	8.64	117	7.32	13.1
6	0.48	8.93	123	7.19	13.3
8	0.64	4.3	54	7.12	13.4
10	0.8	2.65	25	7.05	13.3
12	0.96	1.79	24	7.04	13.3
14	1.12	1.23	4	7	13.3
Observaciones: ninguna					

Tabla 50. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 293 NTU
Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS					
	Fecha de toma de la muestra		12/08/2021		
	Hora de toma de la muestra		10:30 am		
	Fecha del ensayo de jarras		13/08/2021		
	Hora del ensayo de jarras		12:00 pm		
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	22	Concentración (%)	2.5%
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	293	2510		7.2	14.5
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)
12	1.96	29.8	359	7	13.9
14	1.12	8.36	95	6.93	14
16	1.28	4.92	29	6.39	14.2
18	1.44	3.94	16	6.88	13.8
20	1.6	2.16	9	6.87	13.8
22	1.76	0.642	4	7.02	13.9
Observaciones: ninguna					

Tabla 51. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 50 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		13/08/2021			
	Hora de toma de la muestra		08:30 am			
	Fecha del ensayo de jarras		14/08/2021			
	Hora del ensayo de jarras		10:00 am			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	36	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	50		598		7.32	13
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
28	2.24	2.02	34	6.9	14.1	
32	2.56	2.10	29	6.58	14.1	
36	2.88	1.51	18	6.44	14.2	
40	3.2	2.76	27	6.36	14.4	
44	3.52	1.52	18	6.3	14.3	
48	3.84	1.65	17	6.26	14.3	
Observaciones: la muestra tomada presento una coloración amarilla						

Tabla 52. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 350 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		16/08/2021			
	Hora de toma de la muestra		11:00 am			
	Fecha del ensayo de jarras		17/08/2021			
	Hora del ensayo de jarras		10:45 am			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	32	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	350		1590		7.56	13.7
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
26	2.08	13.6	46	7.4	14.4	
28	2.24	3.72	0	7.26	14.5	
30	2.4	2.1	0	7.15	14.6	
32	2.56	1.69	0	7.14	14.6	
34	2.72	2.31	0	7.09	14.5	
36	2.88	1.76	0	7.1	14.6	
Observaciones: ninguna						

Tabla 53. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 61.8 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		30/08/2021			
	Hora de toma de la muestra		08:15 am			
	Fecha del ensayo de jarras		30/08/2021			
	Hora del ensayo de jarras		11:20 am			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	22	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	61.8		610		7.85	12.9
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
16	1.28	1.98	3	7.78	14	
18	1.44	1.6	0	7.47	14	
20	1.6	1.85	0	7.01	14.1	
22	1.76	1.25	0	7.19	14.3	
24	1.92	1.96	0	7.08	14.4	
26	2.08	1.48	0	6.98	14.5	
Observaciones: ninguna						

Tabla 54. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 131 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		30/08/2021			
	Hora de toma de la muestra		13:00 pm			
	Fecha del ensayo de jarras		31/08/2021			
	Hora del ensayo de jarras		17:40 pm			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	28	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	131		1140		7.98	14.2
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
20	1.6	2.58	7	7.16	14.2	
22	1.76	3.35	0	6.85	14.3	
24	1.92	2.34	1	6.85	14.3	
26	2.08	2.49	0	6.86	14.7	
28	2.24	1.32	0	6.84	14.4	
30	2.4	1.45	0	6.85	14.4	
Observaciones: ninguna						

Tabla 55. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad 13 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		03/09/2021			
	Hora de toma de la muestra		13:30 pm			
	Fecha del ensayo de jarras		03/09/2021			
	Hora del ensayo de jarras		15:30 pm			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	7	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	13		106		7.95	15.8
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
2	0.16	10.1	81	7.7	16.2	
4	0.42	5.14	28	7.54	16.2	
6	0.48	3.11	8	7.36	16.1	
7	0.56	1.97	0	7.21	16.2	
8	0.64	3.97	7	7.26	16.3	
9	0.72	2.01	0	7.22	16.5	
Observaciones: ninguna						

Tabla 56. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 50.3 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		06/09/2021			
	Hora de toma de la muestra		08:10 am			
	Fecha del ensayo de jarras		06/09/2021			
	Hora del ensayo de jarras		12:00 am			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	26	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	50.3		514		7.93	13.2
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
18	1.44	31	385	7.8	14	
20	1.6	17.4	233	7.54	14	
22	1.76	8.31	109	7.28	14.4	
24	1.92	4.15	39	7.38	14.2	
26	2.08	3.13	34	7.27	14.3	
28	2.24	3.93	18	7.3	14.3	
Observaciones: la muestra tomada presento una coloración amarilla						

Tabla 57. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 111 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		06/09/2021			
	Hora de toma de la muestra		15:00 pm			
	Fecha del ensayo de jarras		06/09/2021			
	Hora del ensayo de jarras		17:00 pm			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	36	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	111		1048		7.41	14.5
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
20	1.6	81.3	870	7.24	13.9	
24	1.92	32.9	384	7.09	13.9	
28	2.24	8.86	104	7.02	13.9	
32	2.56	5.2	40	6.98	14.3	
36	2.88	4.07	20	7.02	14.3	
40	3.2	4.46	35	7.01	14.3	
Observaciones: la muestra tomada presento una coloración amarilla						

Tabla 58. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad 46.1 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		06/09/2021			
	Hora de toma de la muestra		08:30 am			
	Fecha del ensayo de jarras		07/09/2021			
	Hora del ensayo de jarras		14:45 pm			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	30	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	46.1		468		8.31	13.3
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
14	1.2	30.3	365	7.91	14.4	
18	1.44	28.8	359	7.46	14.4	
22	1.76	22.5	294	7.2	14.4	
26	2.08	8.75	126	7.08	14.5	
30	2.4	3.22	30	7.01	14.5	
34	2.72	3.06	20	6.97	14.2	
Observaciones: la muestra presento una coloración amarilla						

Tabla 59. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 13.4

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		17/09/2021			
	Hora de toma de la muestra		08:15 am			
	Fecha del ensayo de jarras		17/09/2021			
	Hora del ensayo de jarras		09:00 am			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	10	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	13.4		131		7.54	12.3
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
6	0.48	11.1	95	7.34	13	
8	0.64	2.57	9	7.25	13.1	
10	0.8	2.05	0	7.21	13.2	
12	0.96	2.3	0	7.2	13.2	
14	1.12	1.98	1	7.23	13.3	
16	1.28	2.52	4	7.17	13.3	
Observaciones: ninguna						

Tabla 60. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 11 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		17/09/2021			
	Hora de toma de la muestra		16:00 pm			
	Fecha del ensayo de jarras		18/09/2021			
	Hora del ensayo de jarras		11:00 am			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	10	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	11		91		7.36	12.7
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
6	0.48	7.55	75	7.17	13.7	
8	0.64	7.68	61	7.14	13.6	
10	0.80	2.46	7	7.11	13.6	
12	0.96	2.18	6	7.05	13.5	
14	1.12	2.96	2	7.01	13.4	
16	1.28	2.26	0	7.02	13.4	
Observaciones: ninguna						

Tabla 61. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 248 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		21/09/2021			
	Hora de toma de la muestra		09:45 am			
	Fecha del ensayo de jarras		21/09/2021			
	Hora del ensayo de jarras		11:30 am			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	20	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	248		1730		7.45	23.3
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
Blanco	Blanco	66.9	532	7.35	14.6	
20	1.6	1.83	4	7.09	14.6	
25	2	2.84	3	7.07	15.1	
30	2.4	2.09	0	7.05	14.9	
35	2.8	2.06	3	7	15	
40	3.2	3.08	6	7.05	15	
Observaciones: primera jarra sin adición de coagulante						

Tabla 62. Resultados de la prueba de jarras para una turbiedad de 204 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		21/09/2021			
	Hora de toma de la muestra		15:20 pm			
	Fecha del ensayo de jarras		22/09/2021			
	Hora del ensayo de jarras		11:00 am			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	22	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	204		1990		7.37	14.8
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
20	1.6	4.8	18	7.05	15	
22	1.76	2.27	5	7.01	15.1	
24	1.92	2.72	8	7	15.1	
26	2.08	2.81	7	6.99	15.2	
28	2.24	4.25	2	7.01	15.1	
30	2.4	3.85	6	7.03	15.2	
Observaciones: ninguna						

Tabla 63. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 164 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		17/02/2022			
	Hora de toma de la muestra		09:00 am			
	Fecha del ensayo de jarras		17/02/2022			
	Hora del ensayo de jarras		11:40 am			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	24	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	164		860		7.7	15.8
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
24	1.92	0.808	0	7.09	16.8	
26	2.08	2.88	0	7.18	16.6	
28	2.24	1.61	0	7.09	16.8	
30	2.4	2.98	0	7.28	16.7	
32	2.56	1.47	0	7.35	17	
34	2.72	3.03	4	7.06	17.1	
Observaciones: ninguna						

Tabla 64. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 4150 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		09:15 am			
	Hora de toma de la muestra		17/02/2022			
	Fecha del ensayo de jarras		18:30 pm			
	Hora del ensayo de jarras		17/02/2022			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	50	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	4150		24500		7.39	20.6
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
25	2	11	51	7.27	17.2	
30	2.4	9	41	7.24	17.2	
35	2.8	9.4	42	7.18	17.3	
40	3.2	8.7	43	7.21	17.3	
45	3.6	9.6	26	7.2	17.3	
50	4	8.17	23	7.26	17.2	
Observaciones: la captación de Mahuarca y tuvo mantenimiento y limpieza de los desarenadores provocando la llegada de agua con turbiedad elevada						

Tabla 65. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 685 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		19/02/2022			
	Hora de toma de la muestra		13:30 pm			
	Fecha del ensayo de jarras		19/02/2022			
	Hora del ensayo de jarras		15:30 pm			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	28	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	685		3730		7.63	16.5
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
24	1.92	4.05	0	7.2	17.4	
26	2.08	5.15	7	7.14	17.4	
28	2.24	3.53	0	7.08	17.5	
30	2.4	3.24	0	6.93	17.8	
35	2.8	4.57	2	7.07	17.7	
40	3.2	5.49	3	7.14	17.8	
Observaciones: ninguna						

Tabla 66. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 900 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		19/02/2022			
	Hora de toma de la muestra		18:30 pm			
	Fecha del ensayo de jarras		23/02/2022			
	Hora del ensayo de jarras		15:20 pm			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	28	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	900		4920		7.46	17.1
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
22	1.76	4.95	0	7.3	18.6	
24	1.92	3.59	1	7.28	18.7	
26	2.08	3.97	0	7.19	18.8	
28	2.24	2.6	0	7.12	18.8	
30	2.4	3.2	0	7.1	18.5	
35	2.8	3.4	5	7.05	18.5	
Observaciones: ninguna						

Tabla 67. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 47.1 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		24/02/2022			
	Hora de toma de la muestra		08:30 am			
	Fecha del ensayo de jarras		24/02/2022			
	Hora del ensayo de jarras		09:30 am			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	28	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	47.1		461		7.72	15.5
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
20	1.6	3.3	5	7.37	15.9	
22	1.76	3.69	0	7.14	15.8	
24	1.92	3.53	2	7.13	15.7	
26	2.08	2.97	0	7.1	15.9	
28	2.24	2.27	0	7.04	16.1	
30	2.4	1.9	0	7.09	16.2	
Observaciones: la muestra presento una coloración ligeramente amarilla						

Tabla 68. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 11.9 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		02/03/2022			
	Hora de toma de la muestra		15:00 pm			
	Fecha del ensayo de jarras		02/03/2022			
	Hora del ensayo de jarras		15:30 pm			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	16	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	11.9		143		7.6	15.8
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
10	0.8	5.36	58	7.22	16.5	
12	0.96	3.19	21	7.03	16.5	
14	1.12	3.58	16	7.04	16.6	
16	1.28	2.05	0	7.02	16.7	
18	1.44	3.1	3	7.01	16.8	
20	1.6	2.12	0	7.01	16.8	
Observaciones: ninguna						

Tabla 69. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 144 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		02/03/2022			
	Hora de toma de la muestra		18:30 pm			
	Fecha del ensayo de jarras		03/03/2022			
	Hora del ensayo de jarras		09:00 am			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	20	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	144		1350		7.37	13.6
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
20	1.6	1.78	9	7.06	14.1	
22	1.76	2.45	0	7.09	14.2	
24	1.92	2.97	6	7.05	14.3	
26	2.08	2.64	2	7.01	14.4	
28	2.24	2.7	2	7	14.4	
30	2.4	2.52	3	7.02	14.6	
Observaciones: ninguna						

Tabla 70. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 3520 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		07/03/2022			
	Hora de toma de la muestra		09:10 am			
	Fecha del ensayo de jarras		07/03/2022			
	Hora del ensayo de jarras		14:00 pm			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	40	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	3520		19200		7.38	16.6
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
25	2	5.42	45	7.36	17.1	
30	2.4	3.79	28	7.23	17.1	
35	2.8	3	21	7.18	17.3	
40	3.2	2.19	10	7.08	17.3	
45	3.6	2.31	23	7.15	17.6	
50	4	2.88	9	7.18	17.6	
Observaciones: ninguna						

Tabla 71. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 617 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		09/03/2022			
	Hora de toma de la muestra		08:00 am			
	Fecha del ensayo de jarras		09/03/2022			
	Hora del ensayo de jarras		14:00 pm			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	30	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	617		4620		7.62	16.4
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
26	2.08	2.47	1	7.27	17.1	
28	2.24	2.89	6	7.05	17.1	
30	2.4	0.755	0	7.06	17.2	
32	2.56	0.761	1	7.02	17.1	
34	2.72	0.689	5	7.03	17.2	
36	2.88	1.12	12	7.04	17.3	
Observaciones: ninguna						

Tabla 72. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 585 NTU

Fuente: Autores





JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		10/03/2022			
	Hora de toma de la muestra		09:10 am			
	Fecha del ensayo de jarras		10/03/2022			
	Hora del ensayo de jarras		15:00 pm			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	26	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	585		4040		7.35	15.2
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
24	1.92	1.48	3	7.51	17.1	
26	2.08	0.621	1	7.15	16.9	
28	2.24	1.09	1	7.18	16.8	
30	2.4	0.967	0	7.05	17.3	
32	2.56	1.24	4	7.02	17.3	
34	2.72	2.08	9	7	17.4	
Observaciones: ninguna						

Tabla 73. Resultado de la prueba de jarras para una turbiedad de 8.16 NTU

Fuente: Autores

JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		11/03/2022			
	Hora de toma de la muestra		08:45 am			
	Fecha del ensayo de jarras		11/03/2022			
	Hora del ensayo de jarras		09:15 am			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	6	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	8.16		83		7.28	14.1
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
2	0.16	5.26	2	7.65	15.1	
4	0.32	5.81	4	7.74	15.2	
6	0.48	1.22	0	7.27	15.3	
8	0.64	2.38	0	7.24	15.3	
10	0.8	1.36	0	7.25	15.4	
12	0.96	1.12	3	7.14	15.5	
Observaciones: ninguna						

7.4. Anexo 4: Fichas técnicas de los reactivos químicos

Shandong Jiahua Water Treatment Technology Co., Ltd.
TAIWAN INDUSTRIAL PARK, SHANDONG, CHINA

CERTIFICATE OF ANALYSIS

Lot No .20210810 Dated: 10th Aug, 2021

Sl No	Item Description	Product Specification	Suppliers Specification
1	Name of Material	Polyaluminium Chloride	Polyaluminium Chloride
2	Type No	PAC JH	PAC JH
3	Appearance	Lemon Yellow powder	Lemon Yellow powder
4	AL ₂ O ₃	29min%	30.2%
5	Basicity	40-90%	75%
6	PH of 5 percent solution	3.0-5.0	4.0
7	Water Insoluble matter	0.6% (max)	0.03%
8	As	0.0002%(max)	0.0002%
9	Pb	0.001% (max)	0.0004%
10	Cd	0.0002%(max)	0.0002%
11	Hg	0.00001%(max)	0.00001%
12	Cr6+	0.0005%(max)	0.0002%
13	Fe	3%(max)	0.05%

Test Standard	GB15892-2009
Chemical Formula	{Al ₂ (OH) _n Cl _{6-n} (H ₂ O) _m }
Package	25kg net PP bag outside with PE bag inside
Container volume	27MT/40'GP FCL without pallets
Usage	widely used in the line of drinking water treatment ,industrial water treatment.
Storage	shall be sealed and stored in the dry and ventilated place to prevent from rain, high temperature and strong sunlight.
Notes	There will be 1% tolerance for different test via different test standard

Production date: 10/08/2021

Expiry date: 10/08/2023

Quality Assurance Officer:

Delia 张廷
jiahua@sdjhtech.com or zbxianhua_pac@hotmail.com
mobile: 86 15053341281

Figura 84. Certificado de análisis del policloruro de aluminio (PAC)
Fuente: (Shandong Jiahua Water Treatment Technology, 2021)



PYM-PDS-LA-Praestol 656 TR - e

Praestol™ 650TR – Agente Floculante

Descripción del Producto

Composición: Peso molecular medio, poli electrolito medianamente catiónico de media carga, derivado de poli-acrilamida y monómeros catiónicos.

Apariencia: Material granulado blanco a amarillo claro.

Tipo de carga: Catiónica.

Densidad a granel: Aproximadamente 650 kg/m³

Viscosidad (0,5 % en agua común*): aprox. 400 mPa*s

Viscosidad (0,1 % en agua común*): aprox. 30 mPa*s

Valor de pH (0,1 % en agua común*): aprox. 7

Tipos de Aplicación y Modo de Acción

El producto es utilizado principalmente como un acelerador de la velocidad de sedimentación en procesos de clarificación, bien como en el espesamiento y deshidratación del lodo de residuos industriales y municipales (centrifugas, prensas de tela filtrante, prensas de tornillo, geotube).

El producto es bastante adecuado para aplicaciones en que los floculos formados están sujetos a alto cizallamiento.

El modo de acción de productos catiónicos se basa esencialmente en el intercambio iónico entre las cargas eléctricas a lo largo de las cadenas de polímeros presentes en soluciones acuosas y en las cargas superficiales de partículas sólidas suspendas.

La carga de las superficies de las partículas es neutralizada, posibilitando la coagulación o floculación.

Aplicación y Dosificación

Efectivo en la faja de pH: 1 - 10

Normalmente, el producto es utilizado como solución diluida (0,05 a 0,1%).

Para la preparación de soluciones para almacenamiento (aproximadamente 0,5%), el producto original es adicionado al agua con agitación vigorosa y constante. Después de un período de dilución de

aproximadamente 60 minutos (a una temperatura de aproximadamente 20°C), la solución estará madura y lista para uso.

Debido a las diferentes propiedades de los lodos o aguas desechadas a ser purificadas o deshidratadas, las dosificaciones adecuadas para cada aplicación solamente pueden ser determinadas por medio de pruebas de laboratorio y pruebas industriales.

El consumo del polímero generalmente varía entre aproximadamente 3 y 10 kg de sustancia activa del polímero por tonelada de sólidos secos en el lodo.

Valores bajos son encontrados en aplicaciones de espesamiento o sedimentación secundaria. Lodos difíciles de desaguar exigen una cantidad mayor de polímero.

Confiabilidad Operacional y Prevención de Accidentes

Identificación de los Riesgos: ¡Cuidado! En contacto con agua o humedad, el producto o solución derramada deja las superficies extremadamente resbalosas. ¡Aísle el área! El producto sólido debe ser barrido y descartado correctamente. La solución o producto húmedo debe ser limpiado con material absorbente, como aserrín o arena, antes de ser barrido y descartado. Debido a la toxicidad acuática aguda, evite el derrame o descarte del producto en cursos de aguas naturales o en sabanas freáticas. Lave cuidadosamente las pequeñas cantidades residuales del área con un chorro fuerte de agua. Descarte por medio de resumideros para posterior tratamiento de efluentes biológicos.

Medidas de Precaución: Utilice equipos de protección personal (Zapatos de suela de caucho, guantes adecuados y protección respiratoria para polvo, si es posible). Deben ser observadas las medidas generales de precaución aplicables a la manipulación de productos químicos.

Primeros Auxilios: En caso de contacto con los ojos, lave con agua en abundancia por un período prolongado – busque un médico si ocurren efectos más graves. En caso de contacto con la piel, lave con agua y jabón directamente y retire ropas contaminadas. Si el producto es ingerido, procure un médico inmediatamente.

Todas las declaraciones, informaciones y datos aquí presentados son tenidos como exactos y confiables, pero, no deben ser tomados como una garantía expresa o garantía implícita de comerciabilidad o actitud para un propósito en particular, o representación, expresa o implícita, por las cuales Solenis Internacional, L.P., y sus subsidiarias asumen responsabilidad legal. ©Marca registrada, Solenis o sus subsidiarias, registrada en varios países. ™Marca, Solenis o sus subsidiarias, registrada en varios países. *Marca ® propiedad de un tercero. ©2014, Solenis.

Materiales Constructivos: Nuestra experiencia demuestra que los productos y soluciones no son corrosivos en contacto con materiales utilizados en tanques y tuberías, como plásticos, fibra de vidrio, materiales de revestimiento plástico y acero inoxidable.

Manipulación: Cuando hay formación de polvo, certifíquese de existir ventilación suficiente: Tome medidas contra el acúmulo de cargas electroestáticas. El producto, por sí, no es explosivo. Sin embargo, el polvo fino puede formar mezclas explosivas en el aire. Evite depósitos de polvo.

Referencias Adicionales: Consulte la planilla de datos de seguridad

Almacenaje

El producto es básicamente sensible a la humedad, como condensación, gotas de agua y humedad. El contacto con gotas de agua puede llevar a la formación puntual de nódulos y pelotas. Por lo tanto, el producto debe ser almacenado en recipientes y ambientes secos, cerrados y protegidos de la humedad. Los recipientes deben ser sellados nuevamente después de la retirada del material. La temperatura de almacenamiento no debe exceder los 40°C por largos períodos.

Clase de contaminación del agua: 2 (auto clasificación)

Estabilidad de Almacenamiento En Condiciones Correctas

Granulado en el embalaje original: por lo menos 12 meses.

Solución de almacenamiento 0,5% en agua común*: por lo menos 1 semana.

Solución 0,1% lista para uso en agua común*: por lo menos 3 días.

*agua común en Krefeld - Alemania: aproximadamente 25 °dH (grados de dureza alemanes), valor del pH: aproximadamente 7, conductividad: aproximadamente 600 µS/cm

Soluciones de Proceso e Ambientales

Todas las afirmaciones, informaciones y datos aquí presentados son considerados precisos y confiables, pero no deben ser interpretados como garantía, expresa o implícita, de la comerciabilidad o adecuación para una finalidad específica, ni representación, expresa o implícita, de que el revendedor asume responsabilidad legal, siendo tales informaciones ofrecidas solamente para su consideración, investigación y verificación. Las afirmaciones o sugerencias relativas al uso posible de este producto son hechas sin representación o garantía de que tal uso está exento de infracción a patentes, no constituyendo recomendación a la infracción de ninguna patente.

Embalaje

Este producto está disponible en diversos embalajes. El representante de Solenis le recomendará el embalaje apropiada para su aplicación.

Información Importante

Seguridad: Solenis mantiene las Fichas de Seguridad para todos sus productos. Las Fichas de Seguridad contienen informaciones relativas a la salud y seguridad para el desenvolvimiento de sus procedimientos apropiados de manipulación del producto para proteger sus funcionarios y clientes.

Nuestra Ficha de Seguridad debe ser leída y comprendida por todo su personal de supervisión y funcionarios antes de utilizar los productos Solenis en sus instalaciones.

Figura 85. Especificaciones técnicas del agente floculante

Fuente: (SOLENIS, 2014)

7.5. Anexo 5: Fichas técnicas de los equipos

PB-700™ Standard Jar Tester - Specifications

This equipment is designed to be operated under the following conditions:

- indoor use
- altitude up to 2000 m
- 5 °C to 40 °C (41 °C to 104 °C)
- relative humidity 50% - 80%
- supply voltage should not exceed +/- 10% of the nominal voltage
- transient over voltage category II

If the equipment is used in a manner inconsistent with the above environmental conditions, the protection provided by the equipment and the functional capabilities of the equipment may be impaired.

Electrical Requirements:

Model 7790-701:	120 volt AC, 60 Hz, 1 ampere
Model 7790-702:	220 volt AC, 50 Hz, .75 amperes
Model 7790-703:	220 volt AC, 60 Hz, .75 amperes

Florescent Lamp: F30T12/CW/RS

Fuses:

Model 7790-701:	1 ampere, type 3AG, slo-blo
Model 7790-702:	1 ampere, type 5x20mm, time lag
Model 7790-703:	1 ampere, type 5x20mm, time lag

Dimensions: 9-1/4"(W) x 42-1/4"(L) x 15-1/2"(H)
23.5(W) cm. x 107.3 cm.(L) x 39.4 cm.(H)

Weight: 49 lb.
22.2 kg.

Stirring Speed:

Low range:	0-35 r.p.m.
High range:	30-300 r.p.m

Stirrer Shafts and Paddles: Type 304 Stainless Steel

Figura 86. Datos técnicos del Standard Jar Tester modelo PB-700™
Fuente: (Phipps & Bird, 1997)

Modelo	DR 820	DR 850	DR 890
Ref.	4844000	4845000	4847000
Pantalla	Pantalla gráfica		
Sistema óptico	Tecnología LED, estable, que ahorra energía		
Gama de longitudes de onda	520 nm	520 nm 610 nm	420 nm 520 nm 560 nm 610 nm
Ancho de banda espectral	10 nm	10 nm	10 nm
Selección de longitud de onda	Automática al seleccionar el método		
Métodos de medición	Métodos HACH pre-programados Absorbancia y transmitancia Pueden programarse métodos de usuario		
Fecha/hora	Reloj de tiempo real incorporado		
Almacenamiento de datos	Hasta 99 valores medidos		
Interfaz	RS232C mediante adaptador infrarrojos		
Dimensiones	23,6 x 8,7 x 4,7 cm		
Peso	450 g (sin pilas)		
Clase de protección	IP 67, estancos al polvo y al agua		
Marcas	CE, GS		

Figura 87. Datos técnicos del colorímetro portátil - Serie DR 800
Fuente: (HACH, 2013)

Modelo	TL2300 EPA	TL2310 ISO	TL2350 EPA	TL2360 ISO
Método de medición	Nefelométrico			
Normativa	Cumple el método EPA 180.1	Cumple las normas ISO 7027, DIN EN 27027, DIN 38404 y NFT 9033	Cumple el método EPA 180.1	Cumple las normas ISO 7027, DIN EN 27027, DIN 38404 y NFT 9033
Pantalla	Pantalla táctil a color de 17,8 mm			
Fuente de luz	Lámpara de filamento de tungsteno	Diodo emisor de luz (LED) a 860 ± 30 nm	Lámpara de filamento de tungsteno	Diodo emisor de luz (LED) a 860 ± 30 nm
Unidades	NTU y EBC	FNU y NTU	NTU, EBC, Abs (absorbancia), %T (% transmitancia) y mg/L	FNU, FAU, NTU, EBC, Abs (absorbancia), %T (% transmitancia) y mg/L
Rango de medición	NTU (Ratio activado): de 0 a 4000 NTU (Ratio desactivado): de 0 a 40 EBC (Ratio activado): de 0 a 980 EBC (Ratio desactivado): de 0 a 9,8	NTU/FNU: de 0 a 1000	NTU (Ratio activado): de 0 a 10 000 auto decimal NTU (Ratio desactivado): de 0 a 40 EBC (Ratio activado): de 0 a 2450 auto decimal EBC (Ratio desactivado): de 0 a 9,8 Absorbancia (rango automático): de 0 a 1,0 Transmitancia (%): de 1,0 a 100 Grado (mg/L): de 1 a 100	FNU (Ratio activado): de 0 a 1000 FNU (Ratio desactivado): de 0 a 40 FAU (rango automático): de 20 a 10 000 NTU (Ratio activado): de 0 a 10 000 auto decimal NTU (Ratio desactivado): de 0 a 40 EBC (Ratio activado): de 0 a 2450 auto decimal EBC (Ratio desactivado): de 0 a 9,8 Absorbancia (rango automático): de 0 a 2,00 Transmitancia (%): de 1,0 a 100 Grado (mg/L): de 0 a 100
Exactitud	Ratio activado: ±2 % de la lectura + 0,01 NTU de 0 a 1000 NTU, ±5 % de la lectura de 1000 a 4000 NTU en función del estándar primario de formacina Ratio desactivado: ±2 % de la lectura + 0,01 NTU de 0 a 40 NTU	±2 % de las lecturas + 0,01 FNU/NTU de 0 a 1000 FNU/NTU	Ratio activado: ±2 % de la lectura + 0,01 NTU de 0 a 1000 NTU, ±5 % de la lectura de 1000 a 4000 NTU ±10 % de la lectura de 4000 a 10 000 NTU Ratio desactivado: ±2 % de la lectura + 0,01 NTU de 0 a 40 NTU	FNU: ±2 % de la lectura + 0,01 FNU de 0 a 1000 FNU FAU: ±10 % de la lectura de 20 a 10 000 NTU NTU: ±2 % de la lectura + 0,01 NTU de 0 a 1000 NTU, ±5 % de la lectura de 1000 a 4000 NTU, ±10 % de la lectura de 4000 a 10 000 NTU
Absorbancia			Absorbancia: ±0,01 Abs de 0 a 0,5 Abs a 455 nm, ±2 % de Abs de 0,5 a 1 Abs a 455 nm Transmitancia: 2 % T de 10 a 100 % T a 455 nm	Absorbancia: ±0,005 Abs de 0 a 1 Abs a 860 nm Transmitancia: 0,12 % T de 10 a 100 % T a 860 nm
Resolución	Turbidez: 0,001 NTU/EBC (en el rango más bajo)		Turbidez: 0,001 NTU/EBC; absorbancia: 0,001 Abs; transmitancia: 0,1 % T	
Repetibilidad	±1 % de la lectura o 0,01 NTU, lo que sea mayor (en condiciones de referencia)			
Tiempo de respuesta	Promedio de la señal desactivado: 6,8 segundos/Promedio de la señal activado: 14 segundos (cuando se utilizan 10 mediciones para calcular la media)			

Figura 88. Datos técnicos del turbidímetro LED – Serie TL23
Fuente: (HACH, 2016)

Modo	pH	mV	Temperatura
Rango	0.00 a 14.00 pH	±1999 mV	0 a 100.0°C
Resolución	0.01 pH	0.1 mV hasta ±199.9 mV, 1 mV más allá de ±199.9 mV	0.1°C
Exactitud	±0.01 pH	±0.2 mV hasta ±199.9 mV, ±2 mV más allá de ±199.9 mV	±0.3°C
Calibración	Hasta 3 puntos (USA: 4.01; 7.00; 10.01 or NIST: 4.01, 6.86; 9.18); reconocimiento automático de sol. buffer	Compensación (Offset) hasta ±150 mV	Offset Incrementos de 0.1°C hasta ±5°C

Figura 89. Datos técnicos del medidor de pH 510
Fuente: (OAKTON, 2000)

Capacity	65g ⁽²⁾⁽³⁾	210g ⁽²⁾⁽⁴⁾	150g ⁽¹⁾	310g ⁽¹⁾	510g	1500g	3100g	4100g
Readability	0.1mg		0.001g		0.01g			0.1g
Weighing units/modes	g, kg, mg, ct, N, lb, oz, ozt, gn, dwt, momme, mesghal, 3 taels, ticals, Parts Counting							
Repeatability (Std. Dev.)	0.1mg		0.001g		0.01g			0.1g
Linearity	±0.2mg	±0.3mg	±0.002g		±0.01g	±0.02g		±0.1g
Tare Range	Full capacity by subtraction							
Stabilization Time (seconds)	3 Seconds							
Sensitivity Drift	3ppm/°C			10ppm/°C				
Operating Temp Range	50° to 86° F/10° to 30° C							
Power Requirements	8 - 14.5V 50/60Hz 6VA or 9.5 - 20V 6W							
Calibration	External Digital							
Display (in/cm)	LCD (1.2/3 high)							
Pan Size (in/cm)	3.5/9 dia.		3.9/10 dia.		7.1/18 dia.			
Draft shield clearance height above pan (in/cm)	9.3/23.6		6.8/17.25					
Dimensions (WxHxD) (in/cm)	8.5x14.3x13.5/36.6x11x34.3		8.5x8.3x13.5/21.7x21x34.3		8.5x4.3x13.5/21.7x11x34.3			
Net Wt (lb/kg)	12.5/5.7		10/4.5		8.5/3.9			
Shipping Wt (lb/kg)	21/9.5		16/7.3		14/6.4			
Model	AV-65	AV-210	AV-150	AV-130	AV-510	AV-1500	AV-3100	AV-4100
Item No.	AR0640	AR2140	AR1530	AR3130	AR5120	ARA520	ARC120	ARD110

Figura 90. Datos técnicos de la Balanza Adventurer™ modelo "AV"
Fuente: (Ohaus Corporation, 2000)

7.6. Anexo 6: Procedimiento para la realización de las pruebas de jarras

1. Tomar una muestra de agua cruda al ingreso de la planta de potabilización con un balde con capacidad para 15 litros.
2. Trasladar la muestra de agua cruda al laboratorio donde se encuentra el equipo de jarras.
3. Homogenizar la muestra de agua con una jarra plástica de 2 litros aproximadamente y posterior a esto tomar una submuestra de 200 mL en un vaso de precipitación.
4. Con la submuestra de agua cruda, proceder a realizar la medición de los parámetros iniciales del agua cruda como son: turbiedad, color, pH y temperatura.
5. Para la medición de la turbiedad se debe verter 30 mL de agua cruda en una celda de vidrio, que se coloca dentro del turbidímetro, luego cerrar el cobertor y proceder a medir la turbiedad y anotar el resultado.
6. Para la medición del color se debe contar con una celda de vidrio de 25 mL de agua destilada (blanco), colocar la misma dentro del equipo, cerrar el cobertor y encerrar la medida: una vez realizado esto, colocar 25 mL de agua cruda en una celda de vidrio distinta y realizar el procedimiento anterior, medir el color y anotar el resultado.
7. Para la medición del pH y temperatura, primero se debe calibrar el equipo cada 3 semanas con una solución buffer en tres puntos de reconocimiento automático de 4.01, 7.00 y 10.01. Para realizar la medición de ambos parámetros se debe colocar el vaso de precipitación que contiene la submuestra de agua cruda al frente del equipo e introducir el electrodo integrado dentro del vaso para agitar el mismo durante 5 segundos, luego de esto esperar hasta que la medida de la pantalla se estabilice y anotar el resultado.
8. Preparar una solución de policloruro de aluminio al 2.5% P/V en un balón de aforo de 100 mL y una solución de polímero catiónico al 0.01875% P/V en otro balón de aforo de 100 mL.
9. Homogenizar la muestra de agua nuevamente y posterior a esto colocar 2 litros de agua cruda en cada jarra del equipo. Colocar las jarras en las posiciones respectivas del equipo con las paletas dentro de cada jarra, verificando que no choquen las paredes de la jarra y estén correctamente aseguradas en la parte superior.
10. Determinar el volumen de alícuotas, es decir, el volumen de cada solución química que llevaran las jeringas hipodérmicas desechables de acuerdo a las dosis experimentales en función del nivel de turbiedad del agua cruda.
11. Tomar el volumen de cada alícuota en las jeringas hipodérmicas desechables y colocarlas frente a cada jarra correspondiente.
12. Empezar el ensayo de jarras y seguir los siguientes tiempos y velocidades de agitación (rpm).

Tabla 74. Velocidad de agitación y tiempos de retención empelados en cada ensayo de jarras realizado

Fuente: Autores

Proceso	Velocidad de agitación (rpm)	Tiempo	Consideraciones
Mezcla rápida	285 (máxima capacidad del equipo utilizado)	1 minuto	Agregar la dosis de coagulante a los 40 segundos
Mezcla lenta	65	4 minutos	Agregar la dosis de floculante a los 2 minutos
	42	6	El paso a la siguiente velocidad debe ser paulatinamente para evitar romper los flóculos formados
	35	10	
Sedimentación	2	20 minutos	Evitar mover las jarras

13. Finalizada la prueba de jarras en el equipo, retirar el agua retenida en las llaves de las jarras del equipo con el fin de evitar interferencias en las medidas posteriores.
14. Sin mover las jarras del equipo, tomar 1 muestra de cada jarra en un vaso plástico rotulado.
15. Medir los parámetros requeridos con los equipos de laboratorio siguiendo el mismo proceso antes mencionado.
16. Anotar los resultados y determinar la dosis óptima en función de la turbiedad y el color principalmente, de acuerdo al valor de turbiedad y color inicial.
17. Lavar los materiales de laboratorio y las jarras del equipo para poder ser usados nuevamente en otro ensayo.

7.7. Anexo 7: Ensayos de jarras para la dosis óptima de polímero catiónico

En esta sección se presenta un fragmento de las pruebas realizadas para determinar la dosis óptima de polímero catiónico en distintos valores de turbiedad del agua cruda.

Tabla 75. Resultado de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 31.7 NTU
Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		13/09/2021			
	Hora de toma de la muestra		08:30 am			
	Fecha del ensayo de jarras		16/09/2021			
	Hora del ensayo de jarras		09:00 pm			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	20	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.025	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	31.7		361		7.5	14.2
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
0.025	0.26	8.73	156	7.14	13.8	
0.03	0.32	12.1	200	7.06	13.8	
0.035	0.37	10.3	180	7.09	13.9	
0.04	0.43	18.4	276	6.98	14	
0.045	0.48	14.6	237	7.04	14.1	
0.05	0.53	13.5	201	7.15	14.2	
Observaciones: ninguna						

Tabla 76. Resultado de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 164 NTU
Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		17/02/2022			
	Hora de toma de la muestra		09:00 am			
	Fecha del ensayo de jarras		17/02/2022			
	Hora del ensayo de jarras		15:30 pm			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	24	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.055	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	164		860		7.7	15.8
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
0.025	0.26	2.37	0	7.63	18.6	
0.035	0.37	1.95	0	7.25	17.9	
0.045	0.48	2.13	0	7.21	18.1	
0.055	0.58	1.5	0	7.45	17.8	
0.065	0.69	3.25	0	7.38	17.8	
0.075	0.80	2.03	0	7.6	18	
Observaciones: ninguna						

Tabla 77. Resultado de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 248 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		21/09/2021			
	Hora de toma de la muestra		09:45 am			
	Fecha del ensayo de jarras		21/09/2021			
	Hora del ensayo de jarras		11:30 am			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	28	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	248		1730		7.45	23.3
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
0.015	0.2	0.984	0	7.16	14.8	
0.02	0.27	0.993	0	7.21	14.7	
0.025	0.33	1.85	0	7.18	14.7	
0.03	0.4	1.33	0	7.26	14.8	
0.035	0.47	2.35	0	7.24	14.8	
0.04	0.53	0.903	0	7.18	14.8	
Observaciones: ninguna						

Tabla 78. Resultado de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 4150 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		17/02/2022			
	Hora de toma de la muestra		09:15 am			
	Fecha del ensayo de jarras		18/02/2022			
	Hora del ensayo de jarras		10:00 am			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	40	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.055	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	4150		24500		7.39	20.6
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
0.025	0.26	3.82	0	7.28	17	
0.035	0.37	5.79	15	7.26	17.1	
0.045	0.48	1.52	0	7.29	17	
0.055	0.58	0.993	0	7.24	16.9	
0.065	0.69	2.52	5	7.29	17	
0.075	0.80	1.04	0	7.33	17	
Observaciones: ninguna						

Tabla 79. Resultado de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 685 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		19/02/2022			
	Hora de toma de la muestra		13:30 pm			
	Fecha del ensayo de jarras		19/02/2022			
	Hora del ensayo de jarras		16:40 pm			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	30	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.035	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	685		3730		7.63	16.5
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
0.025	0.26	2.42	0	7.16	17.3	
0.035	0.37	0.867	0	7.09	17.2	
0.045	0.48	2.16	0	7.12	17.3	
0.055	0.58	2.77	0	7.08	17.4	
0.065	0.69	2.33	0	7.07	17.3	
0.075	0.80	0.946	0	7.08	17.4	
Observaciones: ninguna						

Tabla 80. Resultado de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 900 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		19/02/2022			
	Hora de toma de la muestra		18:30 pm			
	Fecha del ensayo de jarras		23/02/2022			
	Hora del ensayo de jarras		17:00 pm			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	28	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	900		4920		7.46	17.1
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
0.025	0.26	5.15	6	7.21	17.8	
0.035	0.37	4.68	5	7.18	17.8	
0.045	0.48	4.87	6	7.21	17.6	
0.055	0.58	7.47	6	7.11	18	
0.065	0.69	4.46	0	7.13	18	
0.075	0.80	4	0	7.23	18.1	
Observaciones: ninguna						

Tabla 81. Resultados de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 47.1 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		24/02/2022			
	Hora de toma de la muestra		08:30 am			
	Fecha del ensayo de jarras		24/02/2022			
	Hora del ensayo de jarras		11:00 am			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	30	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.055	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	47.1		461		7.72	15.5
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
0.025	0.26	4.9	11	7.45	16.8	
0.035	0.37	1.88	0	7.33	16.8	
0.045	0.48	2.18	0	7.25	16.9	
0.055	0.58	1.93	0	7.14	16.7	
0.065	0.69	1.99	0	7.04	16.8	
0.075	0.80	2.09	0	7.23	16.9	
Observaciones: ninguna						

Tabla 82. Resultado de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 11.9 NTU

Fuente: Autores



JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		02/03/2022			
	Hora de toma de la muestra		15:00 pm			
	Fecha del ensayo de jarras		02/03/2022			
	Hora del ensayo de jarras		17:15 pm			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	16	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.055	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	11.9		143		7.6	15.8
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
0.025	0.26	3.21	7	7.04	16.2	
0.035	0.37	4.28	26	6.98	16.2	
0.045	0.48	3.33	9	6.98	16.1	
0.055	0.58	2.51	1	6.96	16.2	
0.065	0.69	2.38	4	7.02	16.3	
0.075	0.80	2.05	13	7.07	16.3	
Observaciones: ninguna						

Tabla 83. Resultado de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 144 NTU

Fuente: Autores





JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		02/03/2022			
	Hora de toma de la muestra		18:30 pm			
	Fecha del ensayo de jarras		03/03/2022			
	Hora del ensayo de jarras		15:45 pm			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	22	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	144		1350		7.37	13.6
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
0.025	0.26	3.4	10	7.04	16	
0.035	0.37	2.83	4	7.02	16	
0.045	0.48	2.82	7	7.04	16.1	
0.055	0.58	2.96	7	7.05	15.8	
0.065	0.69	3.29	8	7.15	16.1	
0.075	0.80	2.43	5	7.44	16	
Observaciones: ninguna						

Tabla 84. Resultado de la prueba de jarras con polímero para una turbiedad de 3520 NTU

Fuente: Autores

JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS						
	Fecha de toma de la muestra		07/03/2022			
	Hora de toma de la muestra		09:10 am			
	Fecha del ensayo de jarras		07/03/2022			
	Hora del ensayo de jarras		15:30 pm			
Coagulante	PAC	Dosis óptima (mg/L)	40	Concentración (%)	2.5%	
Floculante	Polímero	Dosis óptima (mg/L)	0.075	Concentración (%)	0.01875%	
Muestra	Turbiedad (NTU)		Color (UC Pt-Co)		pH	Temperatura (°C)
Agua cruda	3520		19200		7.38	16.6
Dosis (mg/L)	Alícuota (mL)	Turbiedad (NTU)	Color (UC Pt-Co)	pH	Temperatura (°C)	
0.025	0.26	3.44	14	7.17	16.8	
0.035	0.37	4.49	14	7.06	16.9	
0.045	0.48	4.57	21	7.10	17	
0.055	0.58	2.63	13	7.06	17.2	
0.065	0.69	2.37	10	7.06	17.1	
0.075	0.80	0.708	9	7.12	17.1	
Observaciones: ninguna						

7.8. Anexo 8: Base de datos utilizados para crear el modelo matemático

En esta sección se muestra un fragmento de los datos empleados para crear el modelo matemático de predicción de la turbiedad residual del agua cruda.

Tabla 85. Base de datos empleada para crear el modelo matemático predictivo
Fuente: Autores

x_1	x_3	x_4	x_5	y
6.23	7.52	16.3	10	1.67
10.8	7.4	12.9	14	1.23
13.4	7.54	12.3	14	1.98
15	7.75	12.4	14	3.17
47.1	7.72	15.5	30	1.9
50	7.32	13	28	2.19
81.4	7.78	13.6	28	3.37
107	7.14	14.4	24	1.28
142	7.96	13.7	24	2.32
164	7.7	15.8	24	0.808
204	7.37	14.8	22	2.27
293	7.2	14.5	22	0.642
300	7.59	13.8	24	1.29
350	7.56	13.7	13.7	1.69
521	7.45	15.3	30	0.606

7.9. Anexo 9: Evidencias fotográficas de las pruebas de jarras realizadas



Figura 91. Homogenización de una muestra de agua cruda
Fuente: Autores



Figura 92. Preparación de celda para medir turbiedad
Fuente: Autores



Figura 93. Muestras de agua cruda con turbiedad alta
Fuente: Autores



Figura 94. Planta de tratamiento de Mahuarcay
Fuente: Autores



Figura 95. Adición del coagulante PAC
Fuente: Autores



Figura 96. Prueba de jarras con turbiedades bajas
Fuente: Autores



Figura 97. Preparación de la solución química de PAC
Fuente: Autores



Figura 98. Submuestra de agua cruda
Fuente: Autores