

EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LA SUSTITUCIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO POR COAGULANTES DEL TIPO HIDROXICLORURO DE ALUMINIO EN EL PROCESO CLARIFICACIÓN DEL AGUA EN LA PLANTA DE SERVICIOS INDUSTRIALES, REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA, ECOPETROL S.A.

Ing. JORGE AUGUSTO RAMIREZ RESTREPO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISCOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRIA EN INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA
2016**

EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LA SUSTITUCIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO POR COAGULANTES DEL TIPO HIDROXICLORURO DE ALUMINIO EN EL PROCESO CLARIFICACIÓN DEL AGUA EN LA PLANTA DE SERVICIOS INDUSTRIALES, REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA, ECOPETROL S.A.

Ing. JORGE AUGUSTO RAMIREZ RESTREPO

DIRECTOR

JULIO ANDRÉS PEDRAZA AVELLA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRIA EN INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA
2016**

DEDICATORIA

Para mi esposa, Yasmín quien me enseñó que el amor verdadero existe, y para mi hija Salomé, de quien aprendí que todo es posible.

Este libro está dedicado a ustedes.

JORGE AUGUSTO RAMIREZ RESTREPO

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la fuerza para terminar este ciclo profesional. A la Universidad Industrial de Santander y ECOPETROL que, a través de este programa de maestría, aportó a mi formación como profesional.

Asimismo, a mi asesor de trabajo de grado el Doctor Julio Andrés Pedraza, quien con sabiduría me guío hasta culminar el proyecto; a mis asesores externos: René Abadía Gutiérrez y Sergio Guevara. Y, A mi familia y amigos, por su comprensión, compañía incondicional y apoyo constante.

Muchas Gracias

JORGE AUGUSTO RAMIREZ RESTREPO

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	22
1. OBJETIVOS	24
1.1 OBJETIVO GENERAL	24
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
2. MARCO TEÓRICO	25
2.1 CLARIFICACIÓN DEL AGUA	25
2.1.1 Coagulación	25
2.1.2 Floculación	25
2.1.3 Sedimentación	26
2.2 AGENTES COAGULANTES	26
2.2.1 Coagulantes convencionales	26
2.2.2 Coagulantes alternativos (PAC´s)	26
2.2.3 Ventajas del coagulante PAC en la clarificación de agua cruda	28
2.3 LODOS GENERADOS EN EL PROCESO DE CLARIFICACIÓN	29
2.3.1 Composición química de los lodos	29
2.4 DETERMINACIÓN DEL MEJOR COAGULANTE Y SU DOSIS ÓPTIMA – PRUEBA DE JARRAS	30
2.5 ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DEL AGUA	31
2.5.1 Turbiedad	31
2.5.2 Alcalinidad	32

	Pág.
2.5.3 Color	32
2.5.4 pH	32
2.5.5 Dureza total	32
2.5.6 Conductividad	32
2.5.7 Hierro	33
2.5.8 Aluminio	33
2.5.9 Porcentaje de lodo	33
2.6 MODELO DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE	33
2.6.1 Pruebas de hipótesis en regresión lineal múltiple	34
2.6.2 Contraste	34
2.7 ANÁLISIS ECONÓMICO	35
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	36
3.1 TOMA DE LAS MUESTRAS	36
3.2 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS	36
3.3 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA	36
3.3.1 Determinación de turbiedad	36
3.3.2 Determinación de alcalinidad	37
3.3.3 Determinación de color	37
3.3.4 Determinación del pH	37
3.3.5 Determinación de dureza	37
3.3.6 Determinación de la conductividad	38

	Pág.
3.3.7 Determinación de hierro	38
3.3.8 Determinación de aluminio	38
3.3.9 Determinación del porcentaje de lodo	38
3.4 PRUEBA DE JARRAS	39
4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DESCRIPTIVO	41
4.1 VARIABLES DE MODELACIÓN	41
4.1.1 Turbiedad	41
4.1.2 Porcentaje de Lodo	42
4.1.3 Color	43
4.1.4 Hierro y Aluminio	43
4.1.5 Alcalinidad y pH	45
4.1.6 Conductividad	46
4.1.7 Dureza	46
4.2 CRITERIO DE NORMALIDAD	48
5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO INFERENCIAL	50
5.1 PROCESO DE ESTIMACIÓN ESTADÍSTICA	50
5.2 MATRIZ DE CORRELACIÓN GRÁFICA	50
5.3 ESTIMACIÓN DE MODELOS LINEALES	52
5.4 CALIDAD DE LA ESTIMACIÓN	53
5.5 ESTIMACIÓN DEL MEJOR COAGULANTE	54
5.6 COMPORTAMIENTO DEL pH y ALCALINIDAD	57

	Pág.
5.7 FUNCIONES DE ESTIMACIÓN DE DOSIS ÓPTIMA PARA EL MEJOR COAGULANTE	58
5.7.1 Función dosis óptima PAC 3, relación 30/70	59
5.7.2. Función dosis óptima PAC 1, relación 100/0	60
5.8 FUNCIÓN DE ESTIMACIÓN DE LODO (% VOLUMEN)	61
5.8.1 Función estimación de lodo PAC 3, relación 30/70	61
5.8.2 Función estimación de lodo PAC 1, relación 100/0	62
5.9 DOSIS ÓPTIMA Y GENERACIÓN DE LODOS A PARTIR DE LAS FUNCIONES OBTENIDAS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO	62
6. COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SULFATO DE ALUMINIO VERSUS PAC	64
7. COMPARACIÓN DEL TIEMPO DE LLENADO DE LA PISCINA DE LODO	65
8.1. 8. REQUERIMIENTOS PARA EL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN ISOMÉTRICO SISTEMA DE DOSIFICACIÓN POLICLORURO DE ALUMINIO	69
9. ANÁLISIS ECONÓMICO	71
9.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN	71
9.2 COSTO INSUMOS QUÍMICOS, ENERGÍA ELÉCTRICA, TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LODOS	72
9.3 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO EVALUADAS	73
9.4 COSTO DE INVERSIÓN	74
9.5 AHORRO ESTIMADO SOBRE LA TARIFA DE AGUA TRATADA	74
10. CONCLUSIONES	75

	Pág.
BIBLIOGRAFIA	76
ANEXOS	78

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Comparación de características entre el sulfato de aluminio y policloruros de aluminio	27
Tabla 2. Unidades de variables del modelo	39
Tabla 3. Coagulantes poliméricos	40
Tabla 4. Parámetros pruebas de jarras	40
Tabla 5. Medidas estadísticas de resumen de las variables	49
Tabla 6. Coeficientes de determinación de las regresiones	53
Tabla 7. Valores Máximos admisibles principales parámetros de agua clarificada	54
Tabla 8. Resultados de reducción en la relación 30/70	55
Tabla 9. Resultados de reducción en la relación 100/0	56
Tabla 10. Mejor coagulante para cada relación de mezcla	56
Tabla 11. Reducción de alcalinidad y pH del agua clarificada para una relación 30% río - 70%	57
Tabla 12. Reducción de alcalinidad y pH del agua clarificada para una relación 100% río - 0%	57
Tabla 13. Valores de reducción fraccional para alcalinidad (ALK), dureza (DUR), conductividad (K) y pH, en las relaciones río-ciénaga más utilizadas	59
Tabla 14. Modelo estimado ppm para PAC3, relación 30/70	59
Tabla 15. Modelo estimado ppm para PAC1, relación 100/100	60
Tabla 16. Modelo estimado porcentaje de lodo para PAC3, relación 30/70	61
Tabla 17. Modelo estimado porcentaje de lodo para PAC1, relación 100/0	62

	Pág.
Tabla 18. Dosis óptima relación 30/70 utilizando PAC3	63
Tabla 19. Dosis óptima relación 100/0 utilizando PAC1	63
Tabla 20. Comparación sulfato de aluminio-PAC	64
Tabla 21. Características físico-químicas promedio del lodo en las piscinas de decantación	67
Tabla 22. Requerimientos sistema de dosificación	69
Tabla 23. Características bombas de dosificación	69
Tabla 24. Condiciones actuales de operación de la planta de tratamiento	71
Tabla 25. Costo de kilogramo de insumo químico incluido costo de transporte	72
Tabla 26. Costo de energía, tratamiento y disposición de lodos	72
Tabla 27. Condiciones de dosificación y consumo de kilogramo por mes	73
Tabla 28. Estimación de consumo de energía y generación de lodos	73
Tabla 29. Costo de Inversión	74
Tabla 30. Características del agua cruda	80
Tabla 31. Características del agua clarificada utilizando sulfato de aluminio líquido tipo B	80
Tabla 32. Características del agua clarificada utilizando PAC1	81
Tabla 33. Características del agua clarificada utilizando PAC2	82
Tabla 34. Características del agua clarificada utilizando PAC3	83
Tabla 35. Características del agua cruda	83
Tabla 36. Características del agua clarificada utilizando sulfato de aluminio líquido tipo B	84

	Pág.
Tabla 37. Características del agua clarificada utilizando PAC1	84
Tabla 38. Características del agua clarificada utilizando PAC2	85
Tabla 40. Características del agua cruda	86
Tabla 41. Características del agua clarificada utilizando sulfato de aluminio líquido tipo B	87
Tabla 42. Características del agua clarificada utilizando PAC1	87
Tabla 43. Características del agua clarificada utilizando PAC2	88
Tabla 44. Características del agua clarificada utilizando PAC3	89
Tabla 45. Características del agua cruda	89
Tabla 46. Características del agua clarificada utilizando sulfato de aluminio líquido tipo B	90
Tabla 47. Características del agua clarificada utilizando PAC1	90
Tabla 48. Características del agua clarificada utilizando PAC2	91
Tabla 49. Características del agua clarificada utilizando PAC3	92
Tabla 50. Características del agua cruda	92
Tabla 51. Características del agua clarificada utilizando sulfato de aluminio líquido tipo B	93
Tabla 52. Características del agua clarificada utilizando PAC1	93
Tabla 53. Características del agua clarificada utilizando PAC2	94
Tabla 54. Características del agua clarificada utilizando PAC3	95
Tabla 55. Características del agua cruda	95
Tabla 56. Características del agua clarificada utilizando sulfato de aluminio líquido tipo B	96

	Pág.
Tabla 57. Características del agua clarificada utilizando PAC1	96
Tabla 58. Características del agua clarificada utilizando PAC2	97
Tabla 59. Características del agua clarificada utilizando PAC3	97
Tabla 60. Prueba de normalidad	98
Tabla 61. Colinealidad	104
Tabla 62. Matriz de correlación	105
Tabla 63. Criterio del VIF	106
Tabla 64. Normalidad	107
Tabla 65. Colinealidad	111
Tabla 66. Varianza (VIF)	111
Tabla 67 Estimación del Mejor Coagulante. Relación 20/80	113
Tabla 68 Estimación del Mejor Coagulante. Relación 40/60	113
Tabla 69 Estimación del Mejor Coagulante. Relación 50/50	114
Tabla 70 Estimación del Mejor Coagulante. Relación 70/30	114
Tabla 71. Regresión con R/L 20	115
Tabla 72 Regresión con R/L 30	116
Tabla 73. Regresión con R/L 40	117
Tabla 74. Regresión con R/L 50	118
Tabla 75. Regresión con R/L 70	119
Tabla 76. Regresión con R/L 100	120
Tabla 77. Regresión con R/L 20	121

	Pág.
Tabla 78 Regresión con R/L 30	122
Tabla 79. Regresión con R/L 40	124
Tabla 80. Regresión con R/L 50	126
Tabla 81. Regresión con R/L 70	127
Tabla 82. Regresión con R/L 100	129
Tabla 83. Bases financieras	137
Tabla 84. Inversión implementación PAC	138
Tabla 85. Operación U2900 Caso base	138
Tabla 86. Operación U2900 Caso PAC	139
Tabla 87. Flujo de caja uso coagulante PAC	140
Tabla 88. Flujo de caja sulfato de aluminio	141
Tabla 89. Análisis diferencial en pesos constantes / ahorro en tarifa de kilo-galón agua tratada	142

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Equipo ensayo de jarras	30
Figura 2. Primera matriz de correlación gráfica	51
Figura 3. Segunda matriz de correlación gráfica	52
Figura 4. Piscinas de sedimentación de lodos	63
Figura 5. Balance volumétrico de lodos en piscinas de sedimentación	66
Figura 6. Tratamiento y disposición de lodos	67
Figura 7. Sistema de dosificación	70
Figura 8. Homocedasticidad	110
Figura 9. Sistema de trasiego polihidroxiclورو de aluminio	131
Figura 10. Vista lateral línea de trasiego coagulante polimérico tipo PAC	133
Figura 11. Trazado sistema de dosificación coagulante polimérico tipo PAC hacia Clarificador	135

LISTADO DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1. Turbiedad, histograma de frecuencias y diagrama de caja y bigotes	41
Grafica 2. Porcentaje de Lodo, distribución de frecuencias y diagrama de caja y bigotes	42
Grafica 3. Valor de Color, distribución de frecuencias y diagrama de caja y bigotes	43
Grafica 4. Aluminio, distribución de frecuencias y diagrama de caja y bigotes	44
Grafica 5. Hierro, distribución de frecuencias y diagrama de caja y bigotes	44
Grafica 6. pH, distribución de frecuencias y diagrama de caja y bigotes	45
Grafica 7. Alcalinidad, distribución de frecuencias y diagrama de caja y Bigotes	45
Grafica 8. Conductividad, distribución de frecuencias y diagrama de caja y bigotes	46
Grafica 9. Dureza, distribución de frecuencias y diagrama de caja y Bigotes	47
Grafica 10. Gráficos de cuantiles, QQ-Plot	48
Grafica 11. La forma funcional	99
Grafica 12. La forma normal	101
Grafica 13. Homocedasticidad	103
Grafica 14. Normalidad y curtosis	107
Grafica 15. Frecuencia y densidad	109

LISTADO DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Procedimiento para Realizar Prueba de Jarras	79
Anexo B. Resultados Pruebas de Jarras	80
Anexo C. Pruebas de Supuestos de Regresión Lineal	96
Anexo D. Estimación del Mejor Coagulante	112
Anexo E. Resultados Regresión: Porcentaje de Lodo	114
Anexo F. Resultados Regresión: Turbiedad	120
Anexo G. Memoria de Cálculo del Sistema de Bombeo	130
Anexo H. Análisis Económico	136

RESUMEN

Título:

“EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LA SUSTITUCIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO POR COAGULANTES DEL TIPO HIDROXICLORURO DE ALUMINIO EN EL PROCESO CLARIFICACIÓN DEL AGUA EN LA PLANTA DE SERVICIOS INDUSTRIALES, REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA, ECOPETROL S.A.”¹

Autor:

JORGE AUGUSTO RAMIREZ RESTREPO²

Palabras claves:

Tratamiento de agua, clarificación, coagulante, policloruro de aluminio, hidroxiclورو de aluminio, desempeño, funciones lineales multivariadas.

Descripción:

En la última década se han desarrollado nuevas tecnologías con coagulantes poliméricos del tipo hidroxiclورو de aluminio (PAC), los cuales han mostrado ser altamente efectivos, de fácil manejo, transporte y aplicación.

En este trabajo de aplicación se evaluó experimentalmente el reemplazo del sulfato de aluminio líquido tipo B por un coagulante tipo PAC en el proceso de clarificación del agua en la U2900. Posteriormente mediante un análisis multivariable se obtuvieron las funciones matemáticas para las relaciones de mezcla actual (30% río Magdalena y 70% ciénaga San Silvestre) y proyectada (100% río Magdalena) para la dosis óptima y porcentaje de lodos del mejor coagulante respectivamente. Finalmente, con el mejor coagulante se estimó el impacto económico que tuvo el uso del mejor PAC en el proceso de clarificación del agua y se realizó un modelo a escala industrial donde se aplicaron los conceptos fundamentales de la mecánica de los fluidos y se determinaron las diferentes restricciones que hacían viable el modelo.

En la actualidad diferentes empresas termoeléctricas, manufactureras y de servicios públicos han realizado cambios exitosos de los coagulantes tradicionales a PAC con beneficios económicos inmediatos, reducción en la frecuencia de mantenimiento y disminución de los vertimientos de sólidos, lo cual genera ventajas competitivas y el reconocimiento como empresas que favorecen la seguridad industrial y el medio ambiente.

¹ Monografía de Maestría

² Facultad de Ciencias Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, Maestría En Ingeniería Química. Director: Doctor Julio Andres Pedraza

SUMMARY

Title:

“TECHNICAL ECONOMIC EVALUATION OF REPLACEMENT FOR ALUMINUM SULFATE ALUMINUM CHLOROHYDRATE COAGULANTS OF TYPE IN PROCESS WATER CLARIFICATION PLANT INDUSTRIAL SERVICES, BARRANCABERMEJA REFINERY, ECOPETROL S.A.”⁴

Author:

JORGE AUGUSTO RAMIREZ RESTREPO⁵

Special Words:

Water treatment, clarification, coagulant, polualuminum chloride, aluminum hydroxychloride, performance, multivariate linear analysis.

Description:

In the last decade new technologies have been developed with polymeric coagulant of aluminum chlorohydrate type (PAC), which have shown to be highly effective, easy to handle, transport and application.

In this application work replacement liquid aluminum sulfate type B we were experimentally evaluated by a PAC coagulant type in the process water clarification in U2900. Then by multivariate analysis mathematical functions for relations current mix (30% Magdalena River and 70% morass San Silvestre) projected (100% river Magdalena) for optimal and percentage of sludge best coagulant dose respectively and were obtained. Finally, with the best coagulant economic impact of the use of the best PAC in the process of clarification of water it was estimated and a model industrial scale where the fundamental concepts of fluid mechanics were applied and were determined performed different restrictions that made viable model.

At present different thermoelectric plants, manufacturing and utilities companies have made successful changes of traditional coagulants PAC with immediate economic benefits, reduction in the frequency of maintenance and reduced discharges of solid, generating competitive advantages and recognition as companies that promote industrial safety and the environment.

⁴ Master Monograph

⁵ Physicochemical Faculty of Science, School of Chemical Engineering , Master of Engineering Chemistry . Director: Dr. Julio Andres Pedraza

INTRODUCCIÓN

La Planta de Servicios Industriales de la Unidad de Balance de la Refinería de Barrancabermeja (U2900) capta agua del río Magdalena y de la ciénaga San Silvestre en diferentes proporciones volumétricas, de acuerdo a la disponibilidad.

Actualmente se capta mayor volumen de agua de la ciénaga por facilidad operativa en los sistemas de bombeo hacia la planta, para luego ser tratada en los sistemas de clarificación. Generalmente, el agua captada del río Magdalena varía en una proporción de 20 a 30 (% v/v) y de la ciénaga San Silvestre de 70 a 80 (% v/v).

En los sistemas de clarificación se procesan alrededor de 3200 GPM de agua que se distribuyen para ser utilizada como reposición en las torres de enfriamiento, sello de las bombas en toda la refinería y sistemas contra-incendio.

Hace 10 años en el proceso de clarificación se emplea como coagulante el sulfato de aluminio tipo B en presentación líquida, Cabe resaltar que este tiene un mayor contenido de hierro (1,2% Fe_2O_3 máx.) en comparación al sulfato de aluminio tipo A (0,004% Fe_2O_3 máx.)⁷, sin embargo, se prefiere por su bajo costo (\$842/Kg versus \$1242/Kg).

La presentación líquida (contenido de alúmina: 7,3% Al_2O_3 mín., contenido de insolubles: 0,1% máx.) es más utilizado en los procesos de clarificación del agua, debido a la baja reactividad, facilidad de preparación, transporte y dosificación, en comparación con el uso del coagulante en presentación sólida (contenido de alúmina: 15,5% Al_2O_3 mín., contenido de insolubles 7,0% máx.).

En la última década se han desarrollado nuevas tecnologías con coagulantes poliméricos del tipo hidroxiclورو de aluminio (PAC, por sus siglas en inglés), los cuales han mostrado ser altamente efectivos, de fácil manejo, transporte y aplicación. Los PAC pueden ser utilizados en un amplio intervalo de turbiedad, no requieren que el agua a tratar presente alcalinidad y su dosificación es mucho menor que el sulfato de aluminio. Esto representa una gran ventaja competitiva frente a los coagulantes tradicionales. (KEMMER & Macallion, 1989).

⁷ Kemmer, Frank N., NALCO Chemical Company. The NALCO Water Handbook, Second Edition. McGraw-Hill, Inc., 1988.

Además, la cantidad de lodo generado en el proceso de clarificación con estos coagulantes es menor (lodo más compacto), mejorando la confiabilidad de la operación y reduciendo la frecuencia y el volumen de las purgas. De esta forma es posible reducir el costo operativo asociado al manejo y disposición de los lodos, así como reducir el volumen de captación de agua cruda (PERNITSKY & EDZWALD, 2006).

En la actualidad diferentes empresas termoeléctricas, manufactureras y de servicios públicos han realizado cambios exitosos de los coagulantes tradicionales a PAC con beneficios económicos inmediatos, reducción en la frecuencia de mantenimiento y disminución de los vertimientos de sólidos, lo cual genera ventajas competitivas y el reconocimiento como empresas que favorecen la seguridad industrial y el medio ambiente (CARTWRIGHT, 2009).

En este trabajo de aplicación se evaluó experimentalmente el reemplazo del sulfato de aluminio líquido tipo B por un coagulante tipo PAC en el proceso de clarificación del agua en la U2900. Posteriormente mediante un análisis multivariable se obtuvieron las funciones matemáticas para las relaciones de mezcla actual (30% río Magdalena y 70% ciénaga San Silvestre) y proyectada (100% río Magdalena) para la dosis óptima y porcentaje de lodos del mejor coagulante respectivamente. Finalmente, con el mejor coagulante se estimó el impacto económico que tuvo el uso del mejor PAC en el proceso de clarificación del agua.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar técnica y económicamente el reemplazo del sulfato de aluminio líquido tipo B por un coagulante tipo PAC en el proceso de clarificación del agua en la U2900.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el mejor coagulante tipo PAC para el proceso de clarificación del agua, para las relaciones de mezcla actual (30% río Magdalena y 70% ciénaga San Silvestre) y proyectada (100% río Magdalena).
- Obtener una función matemática multivariable que permita predecir la dosis óptima y el volumen de lodos del mejor coagulante tipo PAC, para las relaciones de mezcla actual (30% río Magdalena y 70% ciénaga San Silvestre) y proyectada (100% río Magdalena).
- Realizar un análisis económico de la sustitución de sulfato de aluminio por coagulante tipo PAC en el proceso clarificación del agua en la U2900.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CLARIFICACIÓN DEL AGUA

La clarificación del agua tiene por objeto retirar los sólidos suspendidos, sólidos finamente divididos y materiales coloidales, convirtiéndolos en partículas más grandes que se pueden remover con mayor facilidad. Es un proceso utilizado tanto en sistemas de tratamiento de aguas municipales con el fin de obtener agua potable para consumo humano, como en sistemas de tratamiento de aguas industriales que comprenden el tratamiento individual del agua proveniente de acueductos municipales de acuerdo con su uso final, ya sea agua para elaboración de bebidas o alimentos, generación de vapor o circuitos de refrigeración, lavado de envases, etc. La clarificación incluye los subprocesos de coagulación, floculación y sedimentación.

2.1.1 Coagulación. Es el proceso de formación de pequeñas partículas gelatinosas mediante la adición de un reactivo al agua llamado coagulante y la aplicación de energía de mezclado, que desestabiliza las partículas suspendidas por neutralización de las cargas de coloides cargados negativamente. (Cause & Pinto, 1974).

Comienza en el mismo instante en que se agrega el coagulante y dura solo fracciones de segundo. Desde el punto de vista electrostático, el propósito de la coagulación es reducir el potencial zeta por adición de iones específicos e inducir la desestabilización de las partículas para aglomerarlas.

La coagulación es el tratamiento más eficaz para la eliminación de impurezas en el agua y también puede representar un gasto elevado cuando no se realiza adecuadamente. La dosis de coagulante condiciona el funcionamiento de las unidades de sedimentación y es imposible realizar una buena clarificación si la cantidad de coagulante no es la adecuada.

2.1.2 Floculación. Es el proceso mediante el cual se unen las partículas desestabilizadas o coaguladas para formar un aglomerado más grande llamado floculo y se debe a un mecanismo de formación de puentes químicos o enlaces físicos. Operativamente, la floculación se consigue recurriendo a una mezcla moderada y prolongada que transforma las partículas coaguladas de tamaño submicroscópico en otras suspendidas, discretas y visibles.

2.1.3 Sedimentación. Es la remoción de partículas más pesadas que el agua por acción de la fuerza de gravedad. Mediante este proceso se eliminan materiales en suspensión empleando un tiempo de retención adecuado. Estos sólidos están constituidos generalmente por arenas, limos y coloides agrupados mediante las etapas anteriores de coagulación y floculación.

En las plantas de tratamiento estos tres procesos, descritos anteriormente, tienen lugar en un mismo equipo denominado clarificador.

2.2 AGENTES COAGULANTES

2.2.1 Coagulantes convencionales. Los coagulantes más comunes que se usan en el tratamiento de aguas son compuestos inorgánicos de aluminio o hierro como el sulfato de aluminio, aluminato de sodio, sulfato ferroso, sulfato férrico y cloruro férrico. Cada coagulante tiene un rango específico de pH donde tiene la mínima solubilidad y ocurre la máxima precipitación dependiendo, también, de las características químicas del agua cruda. Con excepción del aluminato de sodio, estos coagulantes son sales ácidas que disminuyen el pH del agua. Por esta razón y dependiendo del agua a tratar, es necesario agregar un álcali como cal, soda o soda cáustica.

2.2.2 Coagulantes alternativos (PAC's). En los últimos 25 años se ha desarrollado una nueva generación de coagulantes inorgánicos pre polimerizados tales como PAC's, los cuales se comportan diferentes a los coagulantes convencionales en el proceso de clarificación debido a sus características de especiación química. Los PAC's tienen diferentes fases sólidas en las reacciones hidrolíticas respecto a los coagulantes convencionales: los flóculos de PAC's tienden a ser grupos de pequeñas esferas y/o estructuras tipo cadena con tamaño menor a 25 mm, mientras que los flóculos de sulfato de aluminio son usualmente estructuras esponjosas y porosas con tamaño de 25 a 100 mm. Esta diferencia estructural hace que los PAC's produzcan una menor turbiedad en suspensión que el sulfato de aluminio.

Los PAC's contienen una gama de especies hidrolíticas de Al (III) preformadas de calidad superior y poseen una estructura que es bastante estable ante hidrólisis posteriores, que contribuyen a su mayor eficiencia de coagulación; se consideran más eficientes que el sulfato de aluminio dadas las ventajas de menor producción de lodos y la menor dependencia de la temperatura y el pH (ver tabla 1.). Sin

embargo, su eficiencia también se ve afectada por algunos parámetros como la composición del agua cruda y las condiciones de operación específicas.

Se considera que un PAC es más eficiente que el sulfato de aluminio dado su mayor capacidad de remoción de sólidos suspendidos y, por tanto, requiere de menos dosis. Dependiendo del tipo de agua, puede sustituir de 1.5 a 2.0 partes de sulfato de aluminio grado A y de 3.5 a 3.9 de sulfato de aluminio grado B (COGOLLO FLÓREZ, 2010).

Tabla 1. Comparación de características entre el sulfato de aluminio y policloruros de aluminio

CRITERIO	Sulfato de Aluminio	PAC's
Temperatura	La temperatura afecta la hidrólisis y por ende, la producción de complejos hidróxilos cargados positivamente esenciales para la coagulación	Menor efecto de la temperatura por la presencia de formas de aluminio prepolimerizadas.
pH	El rango de pH controla cuál especie de hidróxido de aluminio se produce	Se espera menor impacto del pH por la presencia de formas de aluminio prepolimerizadas.
Especie de Aluminio	La mayoría de especies de aluminio son complejos hidróxilo monoméricos con una carga catiónica de +1 a +3.	Presencia de formas de aluminio monoméricas y poliméricas.
Cinética	Más lenta.	Más rápida.

Fuente. Selection of alum and polyaluminum coagulants: principles and applications. Journal of Water Supply: Research and Technology, 55, 121, 2006.

Los PAC's son producidos adicionando una base al cloruro de aluminio hasta lograr la fórmula empírica $Al(OH)_nCl_{3-n}$, donde n toma valores que van de 1 a 2.5. Los diferentes PAC's se tipifican por su contenido de aluminio (porcentaje de Al_2O_3), contenido de sulfatos (porcentaje de SO_4) y contenido de hidróxido (porcentaje de basicidad).

La basicidad se refiere al número de iones hidróxido promedio por átomos de aluminio en las moléculas del PAC ($[\text{OH}]/[\text{Al}]$), y es un índice del grado de polimerización.

La reacción de hidrólisis de un PAC se da por etapas. Dependiendo de las condiciones del proceso, se forman los siguientes productos intermedios: dímeros $[\text{Al}_2(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_8]^{+4}$; complejos poli hidroxilo $[\text{Al}_8(\text{OH})_{20}]$, $[\text{Al}_8(\text{OH})_{22}]^{+2}$, $[\text{Al}_8(\text{OH})_{24}]$, $[\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{+7}$, $[\text{Al}_{14}(\text{OH})_{38}]^{+8}$, $[\text{Al}_{30}\text{Cl}_9(\text{OH})_{81}(\text{H}_2\text{O})_{38}]^{+5}$; compuestos complejos $[\text{Al}_8(\text{OH})_{20}(\text{H}_2\text{O})_{10}]\text{Cl}_4$ y partículas y agregados en la forma original del PAC. La eficiencia de la coagulación está en función de cuál o cuáles de los anteriores productos intermedios de la hidrólisis reaccionan con las impurezas del agua.

2.2.3 Ventajas del coagulante PAC en la clarificación de agua cruda. Las ventajas observadas para los coagulantes pre-polimerizados como el poli-cloruro de aluminio (PAC), son diversas frente a los coagulantes tradicionales (TORRA & VALERO, 1998).

- **Mejor desempeño en la separación.** Acorde a publicaciones científicas anteriores (TORRA & VALERO, 1998), se observa de manera general una mejora en la separación de flóculos con el uso de PAC frente a coagulantes tradicionales, en lo que se refiere a velocidad de decantación, índice de filtrabilidad y deshidratación de lodos.
- **Mayores intervalos de pH.** Ahora bien, los valores de pH en donde el proceso de coagulación utilizando PAC es efectivo, oscila entre 4 y 8 (a mayor basicidad los valores de pH en los que se obtiene una correcta floculación son superiores), frente al margen óptimo para el sulfato de aluminio de a 5.5 a 7.5 tanto en aguas potables como residuales.
- **Menor concentración de aluminio residual.** El policloruro de aluminio implica una densidad metálica residual menor que los coagulantes tradicionales, a dosis equivalentes. Esta reducción es aún mayor al incrementar la basicidad del PAC.
- **Mejor desempeño en el proceso de la clarificación.** En el proceso de clarificación del agua y para dosis de aluminio equivalentes, con el PAC se logra obtener una menor turbidez residual que con el sulfato de aluminio, lo que a su vez reduce de manera análoga la materia orgánica y con frecuencia el color.

En aguas blandas el uso del policloruro de aluminio permite una floculación óptima para un margen de dosis superior al de las sales básicas metálicas –dosis

menores al mínimo no permite la desestabilización de las partículas coloidales, en tanto que dosis excesivas causan la re-estabilización. Dicho de otro modo, los coagulantes pre-polimerizados son menos sensibles a las variaciones de composición del agua cruda que los coagulantes tradicionales.

2.3 LODOS GENERADOS EN EL PROCESO DE CLARIFICACIÓN

Los lodos que se originan en el tratamiento de agua para uso industrial son en su mayor parte los producidos en los procesos de floculación-coagulación, Los flóculos una vez decantados, se convierten en lodos.

Uno de los aspectos más críticos en los sistemas de tratamiento es el manejo de los lodos generados en los procesos de clarificación del agua. Estudios realizados han indicado que los lodos que se producen en los sedimentadores constituyen entre el 60 y el 70%² de los sólidos totales, y en los filtros entre el 30 y 40% (ARBOLEDA VALENCIA, 2009, pág. 199). Sin embargo, en las plantas que remueven hierro y manganeso los filtros retienen la mayoría de los lodos: 50 a 90%⁸.

2.3.1 Composición química de los lodos. Los lodos generados en el proceso de clarificación del agua representan un gran volumen. Estos lodos están compuestos principalmente por agua, además de sólidos provenientes del agua cruda como arcillas, compuestos no minerales, plancton y otros sólidos agregados durante el tratamiento como hidróxidos de aluminio y/o hierro, hidróxidos de calcio, poli electrólitos, carbón activado en polvo y demás compuestos químicos añadidos.

Los lodos tienen propiedades tixotrópicas, es decir, son de características gelatinosas en reposo, pero líquidas en movimiento. Además, son compresibles y resistentes al espesamiento y deshidratación, especialmente aquellos generados con agua de baja turbiedad.

⁸ Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS-2000.SECCIÓN II. Título C. Sistemas de potabilización. 2000.

2.4 DETERMINACIÓN DEL MEJOR COAGULANTE Y SU DOSIS ÓPTIMA – PRUEBA DE JARRAS

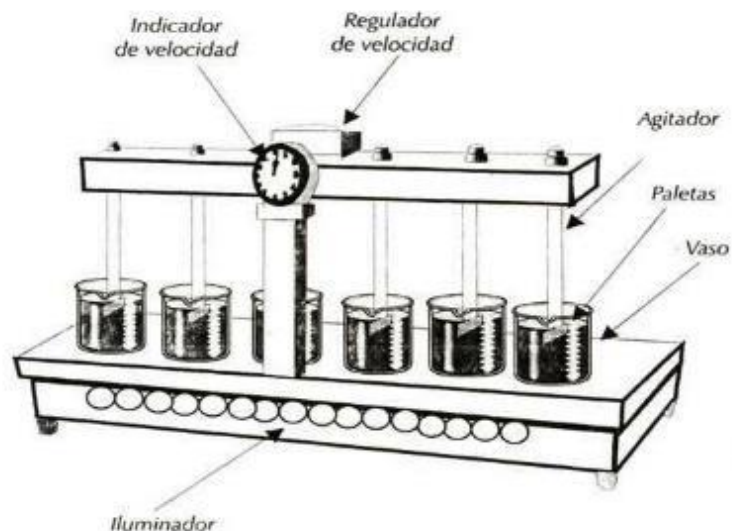
Como su nombre lo indica, la prueba de jarras es un ensayo que trata de simular las condiciones en que se realizan el proceso de coagulación y de sedimentación. Se constituye en la principal herramienta de trabajo para el control de la operación de las plantas.

De acuerdo con los resultados de este ensayo se deben dosificar los miligramos por litro (mg/l), que dará una máxima calidad de agua con el mínimo consumo de coagulantes.

El ensayo de jarras es de óptima utilidad porque determina:

- La dosis de coagulantes que se deben aplicar en planta.
- El pH óptimo de coagulación, este es el pH que permite la formación de los flóculos y no es igual para todas las aguas.

Figura 1. Equipo ensayo de jarras



Fuente. <http://med.se-todo.com/doc/24314>

Para la realización de un ensayo de jarras, se debe contar con los siguientes elementos:

- Un agitador mecánico
- Vaso de precipitados
- Un reloj o cronómetro
- Una probeta de 1000 ml.
- Balanza de precisión de 0.1 gr. a 100 gr.
- Espátulas
- 6 jeringas desechables de 10 ml.
- Pipetas graduadas de 10 ml.
- Matraces aforados de 1.000 ml.

2.5 ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DEL AGUA

A continuación se describen las principales variables físico químicas que afectan el proceso de clarificación del agua y cuya influencia puede ser evaluada a través de las pruebas de jarras.

2.5.1 Turbiedad. La turbiedad es causada en el agua por microorganismos, materiales orgánicos o inorgánicos que se encuentra en suspensión. La turbiedad es una medida de la propiedad óptica que causa dispersión y absorción de la luz con disminución de la transmisión en línea recta, se mide en unidades de turbiedad nefelometría (NTU).

La medición de la turbiedad se basa en la comparación de la intensidad de la luz dispersada por la muestra bajo condiciones semejantes por una suspensión de referencia estandarizada. La turbiedad puede ser determinada para cualquier muestra de agua que esté libre de desechos y sedimentos de arena. El vidrio sucio y la presencia de burbujas alteran la visibilidad superficial de la muestra originando falsos resultados (NALCO Chemical Company, 1988).

2.5.2 Alcalinidad. La alcalinidad es la capacidad del agua para neutralizar ácidos y representa la suma de las bases que pueden ser tituladas. Debido que la alcalinidad de aguas superficiales está determinada generalmente por el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidroxilos, este se toma como un indicador de dichas especies iónicas.

La alcalinidad se determina por titulación con una solución estándar de un ácido mineral fuerte y el uso de indicador químico a los puntos sucesivos de equivalencia del bicarbonato y el ácido carbónico.

2.5.3 Color. El color en el agua se debe a varios iones metálicos característicos como el hierro y el manganeso, materia orgánica diversa y en algunos casos residuos contaminantes de tipo industrial. En aguas para consumo humano, existe una condición psicológica de rechazo hacia este parámetro físico, el cual no necesariamente está asociado a alguna forma de contaminación.

El color se determina por comparación visual o espectrofotometría de la muestra con soluciones coloridas de platino-cobalto de concentraciones conocidas, la unidad de color es la producida por 1mg/L de platino en forma de ion cloro-platinato. La turbiedad es la única interferencia en este método y se recomienda eliminarla mediante filtración.

2.5.4 pH. El efecto del pH sobre las propiedades químicas y biológicas del agua hace de su determinación algo crucial, debido a que sirve como medida para el control del proceso de potabilización del agua y la corrosión. La medición del pH se basa en la determinación de la actividad de iones hidrógeno (H^+), medida en un medidor de pH.

2.5.5 Dureza total. La dureza es el contenido de sales de calcio y magnesio en el agua y aporta cationes para la tendencia conductiva del agua, esta se toma como un indicador usado para determinar la capacidad incrustante del agua. La dureza se expresa como carbonato de calcio, en mg/L (ppm).

2.5.6 Conductividad. La conductividad es una propiedad física del agua que se usa para medir el contenido de especies catiónicas y aniónicas de esta, La conductividad es una capacidad que posee una solución acuosa de conducir la corriente eléctrica, a 25°C; la conductividad se expresa en $\mu S/cm$.

2.5.7 Hierro. La medición del hierro permite determinar la tendencia corrosiva del agua por formación de óxidos; los cuales producen corrosión bajo depósito y ensuciamiento (color). El contenido de hierro en el agua se determina a partir de un método colorimétrico utilizando un espectrofotómetro, se expresa en mg/L de hierro total.

2.5.8 Aluminio. El aluminio es una especie química contenida en el agua por el aporte de sales de sulfato y/o polímeros coagulantes, empleados para remover la turbiedad del agua. El contenido de aluminio en el agua se determina a partir de un método colorimétrico utilizándose un espectrofotómetro, se expresa en mg/L de aluminio.

2.5.9 Porcentaje de lodo. El contenido de lodos en el tratamiento del agua por clarificación, se debe principalmente a la presencia de partículas coloidales y sólidos suspendidos, los cuales luego de sufrir una desestabilización de cargas eléctricas mediante un proceso fisicoquímico a partir del uso de agentes coagulantes y floculantes precipitan formándose sedimentos de mayor densidad que son retirados del agua mediante la decantación.

A partir de un método gravimétrico y/o volumétrico se puede determinar la cantidad cuantitativa de material precipitado en el agua clarificada.

2.6 MODELO DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

La modelación de procesos que involucran un gran número de variables como es el caso de la clarificación del agua, requiere establecer funciones matemáticas multivariadas.

La modelación matemática enuncia correlaciones, proposiciones de hecho, o parametrización valiéndose de formulación matemática conocida –i.e. funciones lineales, logarítmicas, etc. –, para modelar correspondencias complejas en entornos difíciles de observar en la realidad (MOLINERO, 2002)

Ahora bien, el modelo de regresión lineal múltiple se emplea para estimar una probable relación entre una variable de respuesta y múltiples variables explicativas –regresores–; las ecuaciones estimadas se utilizan como funciones de aproximación. Es decir, se ignora la verdadera relación funcional entre las variables, sin embargo, sobre determinados intervalos predictores el modelo lineal constituye una aproximación procedente; los modelos que tienen una estructura

más compleja con frecuencia pueden analizarse con las técnicas de regresión lineal múltiple (MONTGOMERY & RUNGER, 1996)

Generalmente, un modelo de regresión que sea lineal en los regresores β_j será un modelo de regresión, independientemente de la forma de la superficie que genere.

2.6.1 Pruebas de hipótesis en regresión lineal múltiple. En la modelación de regresión múltiple, hay determinadas pruebas de hipótesis aplicadas a los coeficientes que resultan necesarias para estimar el ajuste del mismo. Las regresiones con base en más de 15 observaciones con p variables no exigen que las perturbaciones de error ε tengan distribuciones normales e independientes. La prueba para la significancia de la regresión es una prueba para determinar si no se puede descartar una relación lineal entre la variable de respuesta y al menos una de las variables de regresión:

X_1, X_2, \dots, X_k . Las hipótesis asociadas son:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0 \quad j \in \cup [1, k]$$

El rechazo de la hipótesis nula significa que, al menos, uno de los regresores tiene una contribución significativa al modelo.

2.6.2 Contraste. Sobre los coeficientes individuales de regresión. Este test es aconsejable para determinar el valor potencial de cada una de las variables de regresión. A saber, el modelo estimado puede resultar más eficiente con la inclusión de variables adicionales, o quizás con la eliminación de uno o más de las variables presentes en el modelo. El contraste de hipótesis asociado es:

$$H_0: \beta_j = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0$$

Si no se rechaza la hipótesis de nulidad en algún coeficiente individual β_j significa que la respectiva variable X_j no es suficientemente significativo, lo cual tiene dos posibles causas:

- Es mejor no utilizarla como regresor del modelo, porque no contribuye a explicar el comportamiento de la variable dependiente o,

- En realidad, sí contribuye a explicar el comportamiento de la variable dependiente, pero en una forma matemática funcional diferente a la que se supuso en el modelo estimado.

Esto se conoce como prueba parcial o marginal, debido a que el coeficiente de regresión β_j , depende de todas las demás variables de regresión X_i ($i \neq j$) que están en el modelo (MONTGOMERY & RUNGER, 1996).

2.7 ANÁLISIS ECONÓMICO

La toma de decisión implica un riesgo. Al preparar y evaluar un proyecto se está disminuyendo la incertidumbre de las distintas variables que pueden influir en su viabilidad. Es aquí donde se determinan las ventajas y desventajas que significa la asignación de recursos a una determinada idea y se le denomina evaluación de proyectos.

Para este caso en particular se ha tomado el método de análisis de flujo de caja diferencial para comparar los costos de operación de la unidad U2900 con y sin implementación de la alternativa aquí evaluada.

En este método se desarrollan dos flujos de caja. Uno considerando que no se lleva a cabo el proyecto. Por lo tanto se registra las entradas y salidas de dinero manteniéndose la situación actual. Y el segundo registrando en él los ingresos y egresos que se estiman se producirán si se implementa el proyecto. Se aplica las técnicas de evaluación de inversiones para ambos flujos. Si el flujo con proyecto resulta más atractivo que el flujo sin proyecto, es recomendable implementarlo.

Para el caso en particular se tomó el criterio de la tasa interna de retorno (TIR) que evalúa el proyecto en función de una única tasa de rendimiento por período con la cual la totalidad de los beneficios actualizados son exactamente iguales a los desembolsos expresados en moneda actual.

La TIR representa la tasa de interés más alta que un inversionista podría pagar sin perder dinero, si todos los fondos para el financiamiento de la inversión se tomaran prestados y el préstamo se pagará con las entradas en efectivo de la inversión a medida que se fuesen produciendo.

Si la TIR es mayor que la rentabilidad exigida al proyecto, el proyecto debe aceptarse y si menor, debe rechazarse.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 TOMA DE LAS MUESTRAS

Con el fin de realizar las pruebas de jarras, se tomaron muestras provenientes del río Magdalena y ciénaga San Silvestre. Las muestras se tomaron en los puntos de entrada a la planta para garantizar que estas no tuvieran ningún tratamiento previo.

Cabe resaltar que las muestras se tomaron una vez por semana durante cinco semanas, teniéndose en cuenta que cada semana se realizaba la toma de la muestra para un día diferente (lunes a viernes). Posteriormente se llevaban estas muestras al laboratorio de la planta, donde se procede a la preparación de las mezclas de acuerdo a la proporción deseada.

3.2 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Con las muestras de agua proveniente del río Magdalena y ciénaga San Silvestre, se prepararon las relaciones volumétricas río-Ciénaga 30% y 100%. Con el propósito de estudiar el comportamiento de los coagulantes se realizaron pruebas adicionales con relaciones de 20%,40%,50% y 70%, cuyos resultados se presentan en el Anexo B. Resultados Pruebas de Jaras

El día en que se tomaba las muestras, era necesario el almacenamiento de 120 litros de agua del río Magdalena y 120 litros de agua de la ciénaga San Silvestre, las cuales se disponían en recipientes plásticos de cinco galones (se necesitaron en total seis recipientes para cada tipo de agua), esto con el propósito de realizar las mezclas, la caracterización y los ensayos de jarras durante la semana.

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

3.3.1 Determinación de turbiedad. Para cada mezcla se tomó un volumen de muestra de 1000 ml, posteriormente se agitó vigorosamente para evitar posible sedimentación de la materia orgánica presente en la misma, se esperó a que desaparecieran las burbujas ocasionadas por la agitación, luego se procedió a verter la muestra en la celda del turbidímetro previamente lavada con agua destilada para evitar interferencias en el análisis. Una vez llenada la celda con la muestra, esta se ingresó al equipo y por último se leyó el valor de turbiedad en

escala de unidades nefelométricas de turbiedad (NTU). La medición de turbiedad de cada una de las muestras se realizó en un equipo turbidímetro de marca Hach 2100N.

3.3.2 Determinación de alcalinidad. Para cada mezcla se tomó un volumen de muestra de 50 ml en una probeta y esta alícuota se vertió en un Erlenmeyer de 250 ml, luego se agregaron cinco (5) gotas de reactivo indicador (en este caso se utilizó verde de bromo cresol) agitando la muestra constantemente a 30 rpm (revoluciones por minuto) aproximadamente. Después se procedió a titular la muestra con solución de ácido sulfúrico 0,02 N manteniéndose la agitación, agregando gota a gota hasta que se observó un viraje a color verde y se registró el volumen de solución de ácido gastado. La alcalinidad de la muestra se calculó multiplicando por 20 el gasto de solución de ácido, y se expresó como alcalinidad total equivalente a “x” mg de CaCO_3 por litro (CaCO_3 /L).

3.3.3 Determinación de color. Para cada mezcla se tomó un volumen de muestra de 100 ml y 50 ml de agua destilada, posteriormente a esto se adicionó 25 ml de agua destilada en una de las celdas del espectrofotómetro, esta se utilizó como blanco y se llevó a cero unidades de platino cobalto (UPC) para usarse como referencia, una vez hecho esto se procedió a verter 25 ml de la muestra en la celda y se leyó el valor de color en U.P.C. Esta medición se realizó en un espectrofotómetro de marca Hach DR2800.

3.3.4 Determinación del pH. Para cada mezcla se tomó un volumen de muestra de 50 ml en un vaso de precipitados previamente lavado con agua destilada. A continuación, se insertó el electrodo del medidor de pH (anteriormente lavado con agua destilada) en la muestra de agua, y finalmente se leyó el valor de pH; esta determinación se realizó en un medidor de pH de marca Mettler Toledo S20 previamente calibrado.

3.3.5 Determinación de dureza. Para cada mezcla se tomó un volumen de muestra de 50 ml en una probeta y esta alícuota se vertió en un Erlenmeyer de 250 ml, luego se agregaron cinco (5) gotas de reactivo indicador (en este caso se utilizó negro de eriocromo) y se adiciona 2ml de agente Buffer amoniacal agitando la muestra constantemente a 30 rpm (revoluciones por minuto) aproximadamente. Después de esto se procedió a titular la muestra con solución de EDTA (Ácido Etilendiamino Tetracético) 0,02 N manteniéndose la agitación, agregando gota a gota hasta que se observó un viraje a color violeta y se registró el volumen de solución de EDTA gastado. La dureza de la muestra se calculó multiplicando por 20 el gasto de solución de EDTA, y se expresó como dureza total equivalente a “x” mg de CaCO_3 por litro (CaCO_3 /L).

3.3.6 Determinación de la conductividad. Para cada mezcla se tomó un volumen de muestra de 50 ml en un vaso de precipitados lavado previamente con agua destilada. A continuación, se introdujo el electrodo del medidor de conductividad (previamente lavado con agua destilada), y se leyó el valor de conductividad; esta determinación se realizó en un medidor de conductividad de marca Hach portable previamente calibrado.

3.3.7 Determinación de hierro. Para cada mezcla se tomaron dos muestras de 25 ml en celdas previamente lavadas con agua destilada, se adicionó reactivo para la determinación de la concentración de hierro (una papeleta de Ferrover) agitando la muestra constantemente a 30 rpm aproximadamente, posteriormente se inserta el blanco (muestra sin Ferrover) y se selecciona como el cero para el análisis, transcurridos cinco minutos se inserta la muestra con reactivo (Ferrover) y se realiza la respectiva lectura en el espectro DR2800, se registra la lectura que proporciona el equipo en mg/L de hierro total.

3.3.8 Determinación de aluminio. Para cada mezcla se tomaron dos muestras de 25 ml en celdas previamente lavadas con agua destilada, se adiciona reactivo para la determinación de la concentración de Aluminio (una papeleta de Aluver) agitando la muestra constantemente a 30 rpm (revoluciones por minuto) aproximadamente, posteriormente se inserta el blanco (muestra sin Aluver) y se selecciona como el cero para el análisis, transcurridos quince minutos se inserta la muestra con reactivo (Aluver) y se realiza la respectiva lectura en el espectro DR2800, se registra la lectura que proporciona el equipo en mg/L de Aluminio.

3.3.9 Determinación del porcentaje de lodo. Una vez se haya realizado la prueba de jarra, se procede a tomar una muestra de 100 ml de lodo precipitado contenido en el fondo de la jarra con la ayuda de una jeringa graduada, esta muestra es llevada a una probeta graduada de 200 ml y después de 10 minutos de haber estado la muestra en la probeta (tiempo suficiente para observar la mezcla de lodo y agua), se mide el volumen de lodo precipitado y se calcula la fracción de lodos dividiendo, el volumen de lodos precipitado por 100 (muestra inicial de lodos).

Las unidades de las respectivas mediciones realizadas para la caracterización del agua cruda se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Unidades de variables del modelo

Medida	Unidades
Turbiedad	Unidades nefelométrías de Turbidez [NTU]
Color	Unidades de Platino Cobalto [UPC]
pH	Unidades de pH
Alcalinidad	$\left[\frac{mg\ CaCO_3}{L} \right]$
Conductividad	$\left[\frac{\mu S}{cm} \right]$
Contenido de lodos	[% volumen]
Aluminio	$\left[\frac{mg\ Al}{L} \right]$
Hierro	$\left[\frac{mg\ Fe}{L} \right]$

Fuente. El autor

En el Anexo B, se Muestra la caracterización del agua cruda y clarificada para cada una de las pruebas de jarras.

3.4 PRUEBA DE JARRAS

Las pruebas de jarras se realizaron con tres tipos de coagulantes poliméricos los cuales se nombran en este documento como PAC1, PAC2 y PAC3, el nombre comercial y densidad de estos productos se especifican en la Tabla 3. Cada tipo de coagulante se utilizó para cuatro diferentes concentraciones (10, 20, 30 y 40 ppm), las cuales fueron escogidas por heurística, aportada por los operadores de planta de Servicios Industriales Balance.

Tabla 3. Coagulantes poliméricos

Coagulante	Nombre comercial	Densidad(g/cm ³)
PAC1	FLOCTREAT WW 9536	0.65
PAC2	FLOCTREAT W70	1,12
PAC3	FONGRAFLOC	1,33

Fuente. El autor

Es importante resaltar que al agua clarificada de cada ensayo de jarras se le midió: turbiedad, color, alcalinidad, dureza, conductividad, pH, hierro y aluminio. De igual forma, los lodos producidos se les determinaron porcentaje en volumen de lodo.

En total se realizaron 360 ensayos de jarras, cuyos resultados se pueden ver en el Anexo B.

La velocidad, el tiempo de mezcla y el tiempo de sedimentación que se empleó para cada prueba de jarras se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros pruebas de jarras

Parámetro	Velocidad (rpm)	Tiempo (min)
Mezcla Rápida	100	1
Mezcla Lenta	40	15
Sedimentación	0	15

Fuente. El autor

4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DESCRIPTIVO

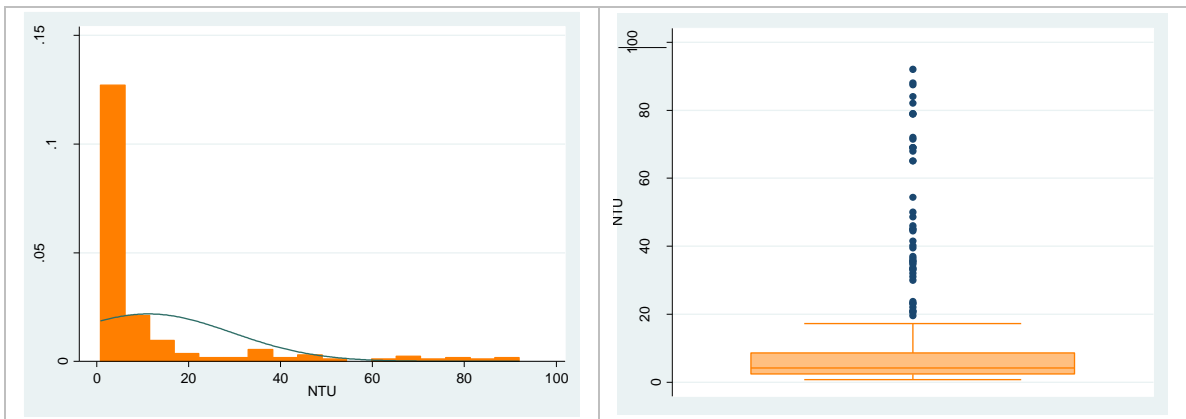
4.1 VARIABLES DE MODELACIÓN

A continuación, se presenta una descripción estadística de las variables físico-químicas, las cuales son consideradas endógenas al experimento (prueba de jarras), que se usaron para la estimación del modelo experimental. Al final del análisis descriptivo se muestra una gráfica 1. Resumen con todos los resultados obtenidos.

4.1.1 Turbiedad. Una vez se llenó la celda con la muestra a evaluar, esta se ingresa al equipo de medición de turbiedad (turbidímetro) y se leyó la medida en escala de unidades nefelométricas de turbidez: NTU⁹.

El histograma de frecuencias y el diagrama de caja y bigotes de turbiedad residual posterior a las pruebas de jarras.

Grafica 1. Turbiedad, histograma de frecuencias y diagrama de caja y bigotes.



Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

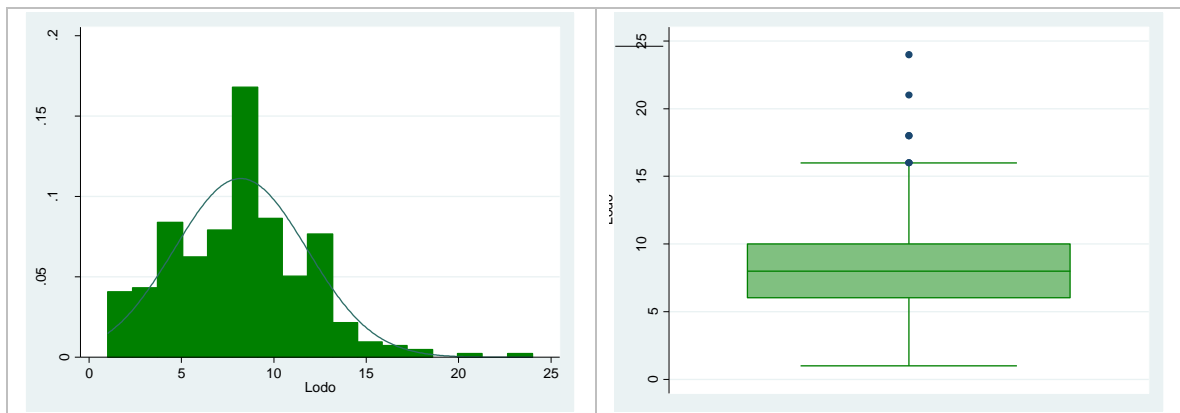
En la Grafica 1, se evidencia que la distribución de frecuencias de la turbiedad no tiene un comportamiento normalmente distribuido (simétrico y mesocúrtico). Por el contrario, presenta una tendencia fuertemente sesgada hacia la izquierda,

⁹ *United States Environmental Protection Agency*, referenciado en septiembre de 2015.

acumulándose más del 75% de los datos por debajo de la media (11.20 NTU). Asimismo, en el diagrama de caja y bigotes, se evidencia que los valores de turbiedad por encima de 20 NTU son atípicos y podrían no tenerse en cuenta en caso de un modelo con una baja determinación¹⁰; de hecho, el máximo valor de turbiedad registrado fue de 92 NTU (Grafica 2.). En consecuencia, la cantidad de datos atípicos es significativa implicando una curtosis extrema de 9.86¹¹.

4.1.2 Porcentaje de Lodo. El histograma de frecuencias y el diagrama de caja y bigotes del porcentaje de lodo posterior a las pruebas de jarras.

Grafica 2. Porcentaje de Lodo, distribución de frecuencias y diagrama de caja y bigotes.



Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

En la Grafica 2 se aprecia que la distribución de frecuencias del *porcentaje de lodo* resultó ser más predecible que la turbiedad residual, ya que se ajusta mejor a la distribución normal. Pese a esto, los datos destacan una ligera asimetría positiva con un coeficiente de asimetría de 0.45. Asimismo, las frecuencias son leptocúrticas¹² (3.93) con solo cuatro valores atípicos, esto indica que para diferentes relaciones río-Ciénaga el porcentaje de lodo presenta un comportamiento más homogéneo que la turbiedad residual.

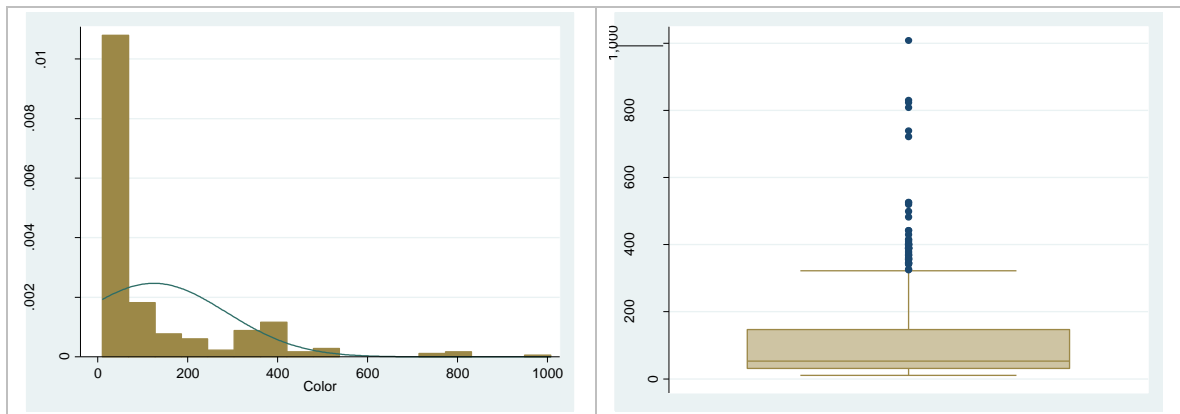
¹⁰ La calidad del ajuste se mide con el coeficiente de determinación R².

¹¹ Una curtosis, o apuntamiento, extrema implica gran concentración de datos alrededor de la media, esto hace aún menos significativos a los datos atípicos.

¹² Curtosis leptocúrtica: apuntamiento alto, implica una concentración alta alrededor de la tendencia central.

4.1.3 Color. El histograma de frecuencias y el diagrama de caja y bigotes del porcentaje de lodo posterior a las pruebas de jarras.

Grafica 3. Valor de Color, distribución de frecuencias y diagrama de caja y bigotes.



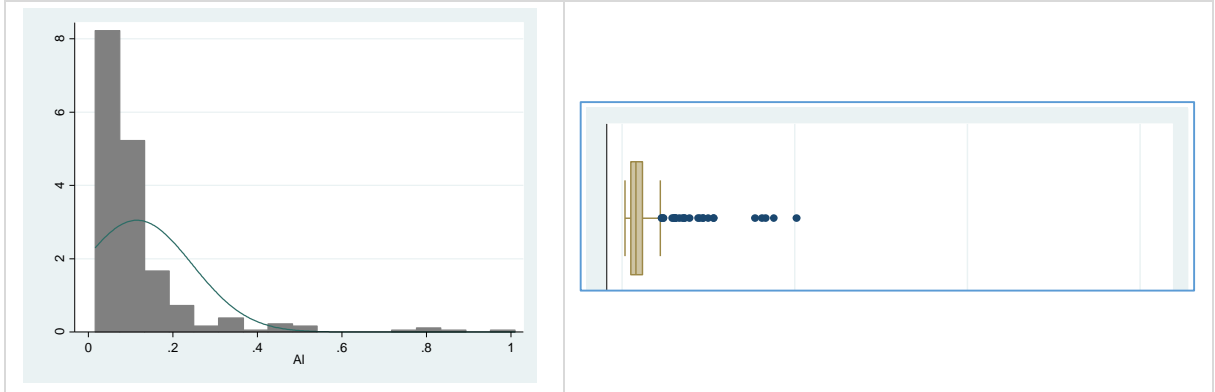
Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

En la Grafica 3, se observa que el valor de color medido en unidades de platino cobalto (UPC), tiene, al igual que la turbiedad, un estrecho rango intercuartílico¹³ sesgado a la izquierda: lo que indica una mayoría de muestras de agua con bajo color. Sin embargo, la atipicidad general (datos atípicos y asimetría) es menor que en la turbiedad. Dentro marco experimental, se concluye que el rango aceptable de medidas de color llega hasta los 380 UPC. En casos extremos se registraron valores de hasta 1008 unidades.

4.1.4 Hierro y Aluminio. Los histogramas de frecuencias y diagramas de caja y bigotes del residual de hierro y aluminio.

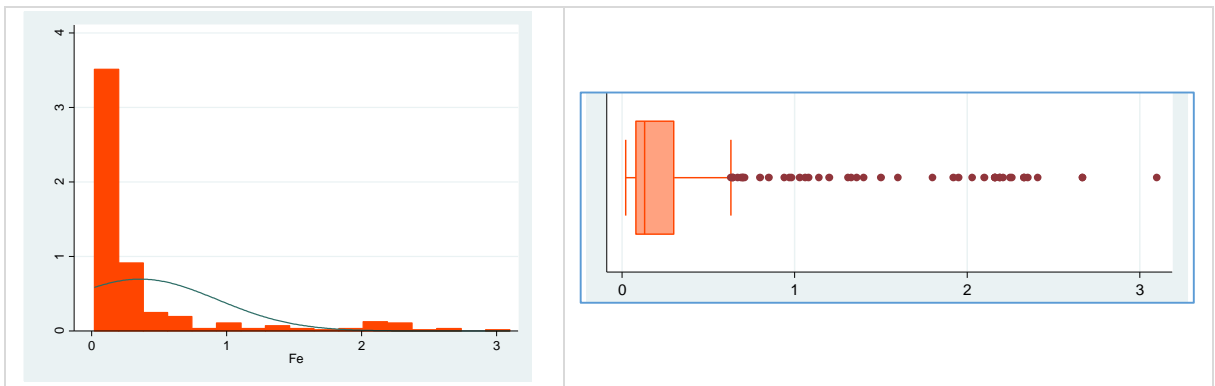
Grafica 4. Aluminio, distribución de frecuencias y diagrama de caja y bigotes.

¹³ Siendo el rango intercuartílico la diferencia entre los valores extremos típicos.



Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Grafica 5. Hierro, distribución de frecuencias y diagrama de caja y bigotes.



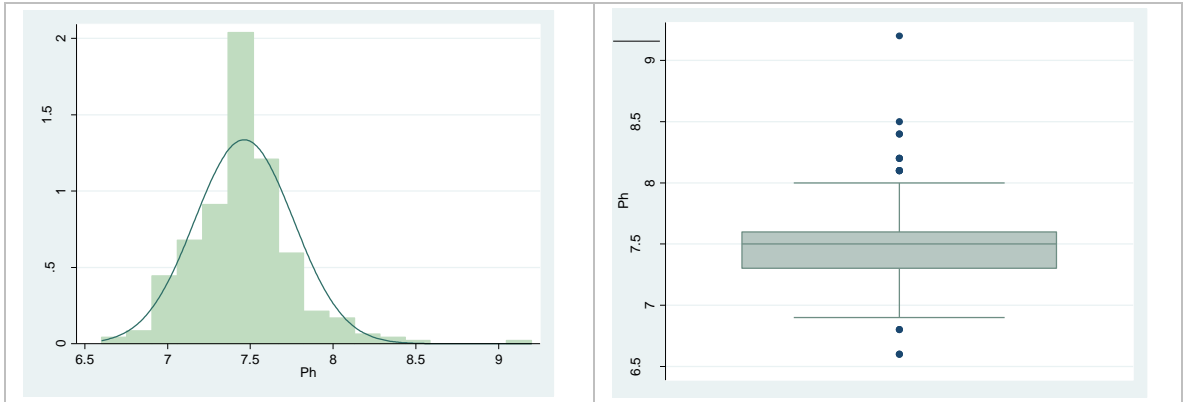
Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

En la Grafica 4 y 5 se aprecia que las concentraciones de hierro y aluminio en las muestras de agua son, en general, bajas gracias a las propiedades fisicoquímicas del Río Magdalena y Ciénaga San Silvestre; por lo tanto, es habitual que los histogramas tengan cierto sesgo a la izquierda.

El contenido de hierro es mucho más atípico que el de aluminio debido a que este se encuentra presente en el agua a tratar mientras que el aluminio es incorporado con la adición del coagulante, cabe resaltar que en el conjunto de datos analizados se presentó una relación aluminio: hierro de 1:2.65, Por ende, el hierro es una de las estimaciones con mayor dispersión respecto a la mediana.

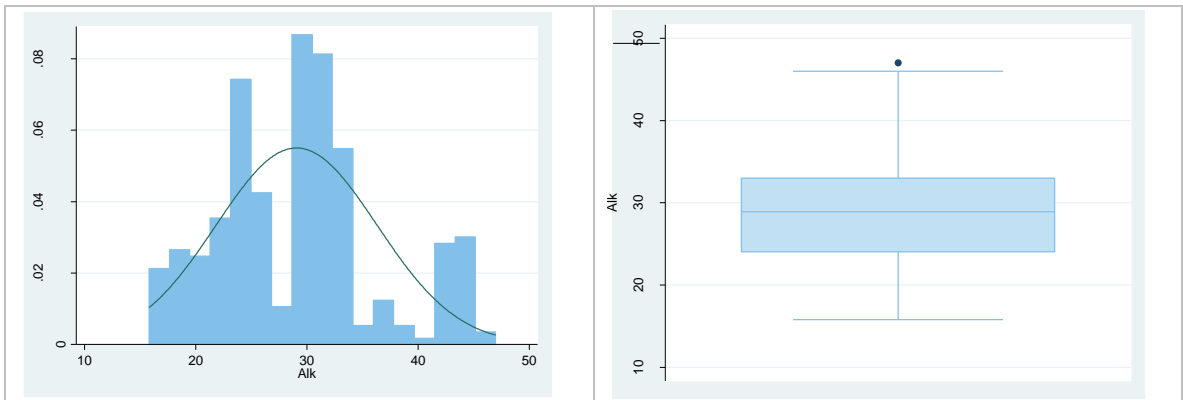
4.1.5 Alcalinidad y pH. Los histogramas de frecuencias y diagramas de caja y bigotes de la alcalinidad y pH.

Grafica 6. pH, distribución de frecuencias y diagrama de caja y bigotes.



Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Grafica 7. Alcalinidad, distribución de frecuencias y diagrama de caja y bigotes.



Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

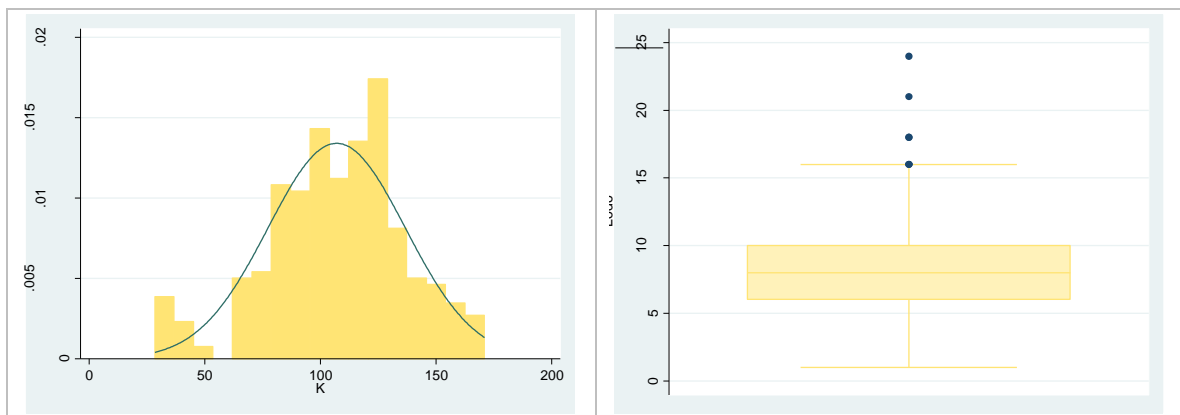
En la Grafica 6 se observa que el pH, por su bondad de ajuste¹⁴ normal, es una de las variables mejor distribuidas, pues conserva una simetría balanceada y su curtosis no es extrema. Análogamente, en la Figura 8 se evidencia que la

¹⁴ Entiéndase bondad de ajuste como la similitud entre dos distribuciones: experimental *versus* ideal.

alcalinidad es más platicúrtica¹⁵, lo que obedece a las múltiples relaciones río-Ciénaga. Ambas variables, evidencian que se experimentó sobre un amplio espectro de muestreo, suficiente para modelar y establecer inferencias, ello obedece a un tamaño de muestra de 360 medidas¹⁶ para cada una de las variables y en múltiples relaciones de río-Ciénaga. Por ende, el sesgo evidenciado en medidas como la turbiedad residual y la concentración de Hierro y Aluminio, no es resultado de un muestreo escaso o mal estratificado, sino de la naturaleza de tales medidas en el Río Magdalena y Ciénaga San Silvestre.

4.1.6 Conductividad. El histograma de frecuencias y el diagrama de caja y bigotes para la conductividad.

Grafica 8. Conductividad, distribución de frecuencias y diagrama de caja y bigotes.



Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

En la Grafica 8, se aprecia que la conductividad tiene una distribución de frecuencias aproximadamente normal con mínima asimetría (coeficiente asimétrico de -0.43). En virtud del apuntamiento positivo, los valores se concentran alrededor del promedio de 107.04 conllevando una dispersión y varianza bajas¹⁷.

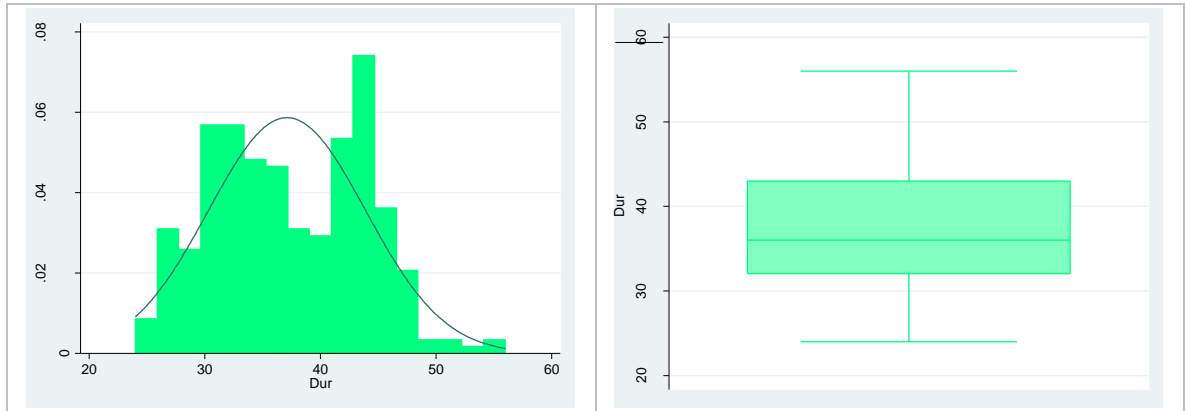
4.1.7 Dureza. El histograma de frecuencias y el diagrama de caja y bigotes para la dureza.

¹⁵ Función de densidad más plana que lo normal, implica baja concentración.

¹⁶ En estadística, se considera un tamaño de muestra mínimo de 30 datos para modelar.

¹⁷ Una varianza baja, como medida de dispersión, conlleva a valores más homogéneos.

Grafica 9. Dureza, distribución de frecuencias y diagrama de caja y bigotes.



Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

En la Grafica 9 se evidencia que la variable muestra baja asimetría, baja dispersión y ausencia de atipicidad y una tendencia central alrededor de 37.12 ppm CaCO_3 ¹⁸.

Se muestran todas las medidas de resumen de las variables experimentales en la Tabla 5.

¹⁸ Partes por millón de Carbonato de Calcio.

Tabla 5. Medidas estadísticas de resumen de las variables.

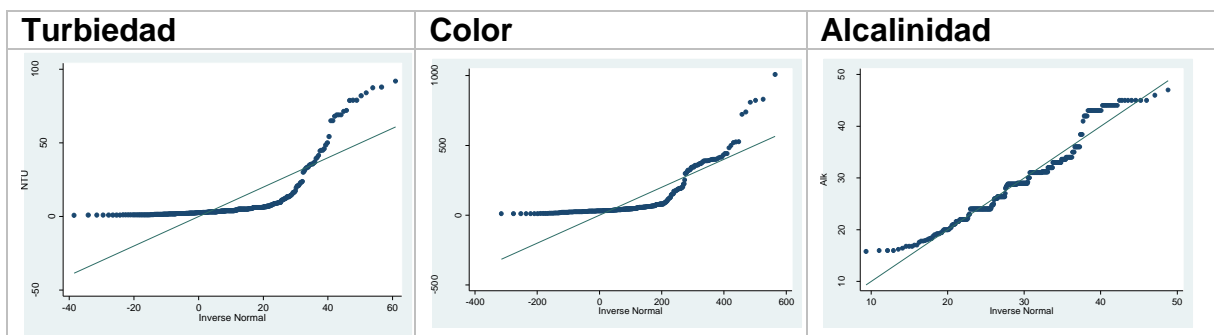
	<i>Turbiedad</i>	<i>Color</i>	<i>Alcalinidad</i>	<i>Dureza</i>	<i>K</i>	<i>pH</i>	<i>Al</i>	<i>Fe</i>	<i>%Lodo</i>
Media	11.20	124.63	29.07	37.12	107.04	7.46	0.11	0.36	8.20
Mediana	4.15	53.5	28.9	36	110	7.5	0.08	0.13	8
Moda	4	30	24	32	119	7.5	0.04	0.12	8
Desv. Std.	18.25	161.51	7.25	6.80	29.75	0.30	0.13	0.57	3.59
Varianza	333.06	26083.90	52.57	46.23	884.99	0.09	0.02	0.33	12.86
Curtosis	6.99	6.17	-0.11	-0.80	0.30	4.20	17.80	6.70	0.97
Asimetría	2.73	2.31	0.53	0.13	-0.43	0.85	3.80	2.70	0.45
Rango	91.21	997.6	31.2	32	142.6	2.6	0.994	3.08	23
Mínimo	0.79	10.4	15.8	24	28.4	6.6	0.016	0.02	1
Máximo	92	1008	47	56	171	9.2	1.01	3.1	24

Fuente. El autor

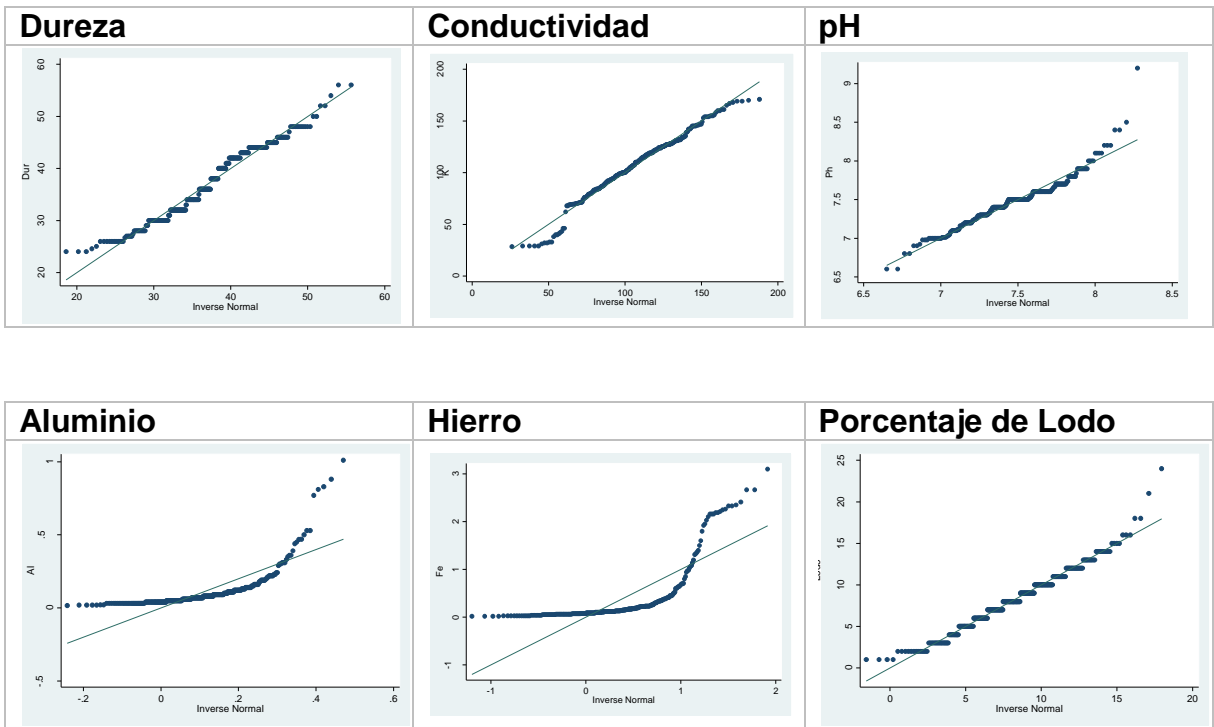
4.2 CRITERIO DE NORMALIDAD

Los gráficos de cuantiles¹⁹ de las nueve variables se agrupan

Grafica 10. Gráficos de cuantiles, QQ-Plot



¹⁹ Los gráficos de cuantiles QQ-Plot comparan cada variable contra su distribución normal ideal. Mientras más se aproximen los puntos a una tendencia lineal más similitud existe.



Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Se evidencia que aquellas variables con distribuciones simétricas y mesocúrticas tienen un mejor ajuste que sus contrapartes. Las variables no normales resultaron fuertemente sesgadas, así, su comportamiento es predecible y puede estimarse un modelo que las incluya.

5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO INFERENCIAL

5.1 PROCESO DE ESTIMACIÓN ESTADÍSTICA

Determinación de las variables explicativas y la variable de respuesta. Una vez obtenidos los datos de la prueba de jarras con las diferentes muestras de agua clarificada, se procedió a determinar las variables explicativas, las cuales se describen en este capítulo.

Escogencia del método a utilizar para la estimación del modelo. Partiendo de la naturaleza descriptiva del experimento fisicoquímico se decidió crear un modelo empírico usando regresión lineal múltiple con variables explicativas o regresores.

Elección de los predictores estadísticamente significativos. Se contrastaron pruebas de hipótesis para comprobar la significancia estadística de cada uno de los factores con relación al porcentaje de lodo en agua; los estadísticos de prueba matemáticos fueron calculados en el *software* estadístico STATA® 12.

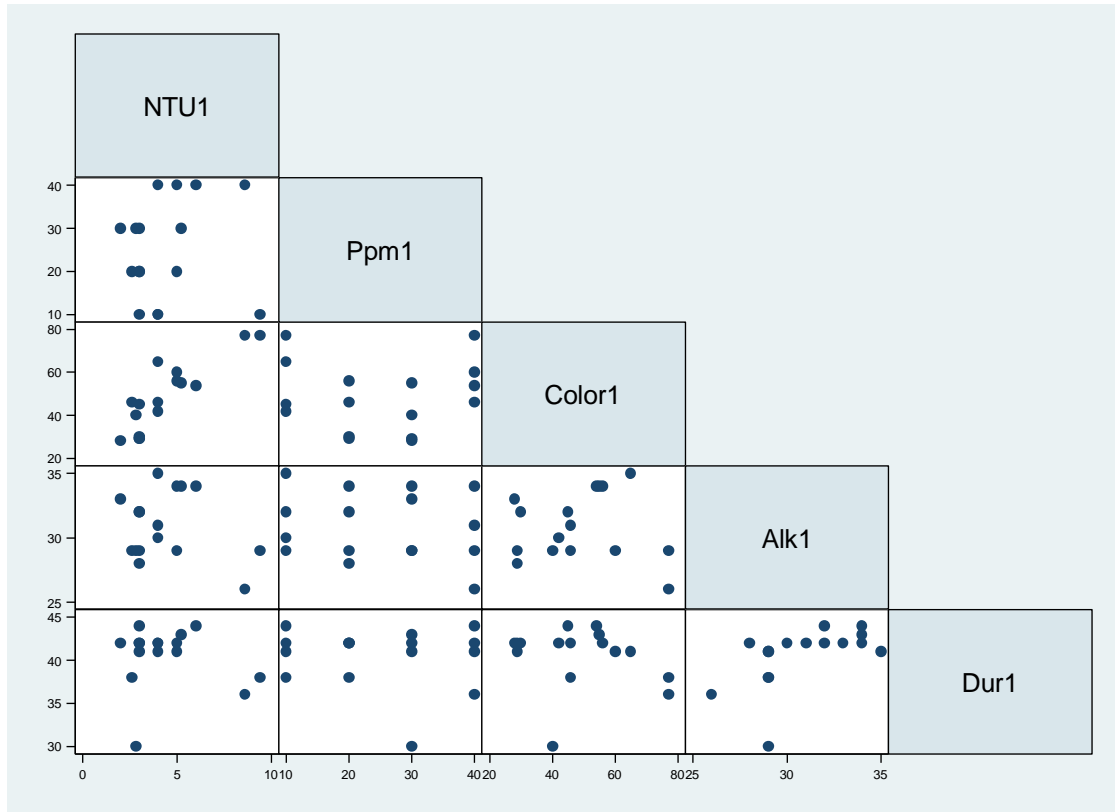
Estudio de las posibles interacciones entre los predictores. Por último, una vez establecidas cuáles variables explicativas son significativas, se determinaron las mejores interacciones entre cada una de ellas de modo que resulte en el mejor ajuste lineal posible.

Ecuación para hallar la dosificación de PAC. Teniendo establecido el modelo matemático con mejor ajuste, se despejó la ecuación en términos de dosis de polícloruro de aluminio líquido para la relación de mezcla actualmente utilizada (30% río -70% Ciénaga) y la que se utilizará en un futuro (100% río). Una vez obtenidos estos valores de concentración, se determina la ecuación para estimar el porcentaje en volumen de lodos.

5.2 MATRIZ DE CORRELACIÓN GRÁFICA

Una aproximación inicial a la naturaleza funcional del modelo se puede evidenciar en una matriz de correlación gráfica: en la cual se compara el grupo de variables explicativas entre sí.

Figura 2. Primera matriz de correlación gráfica.



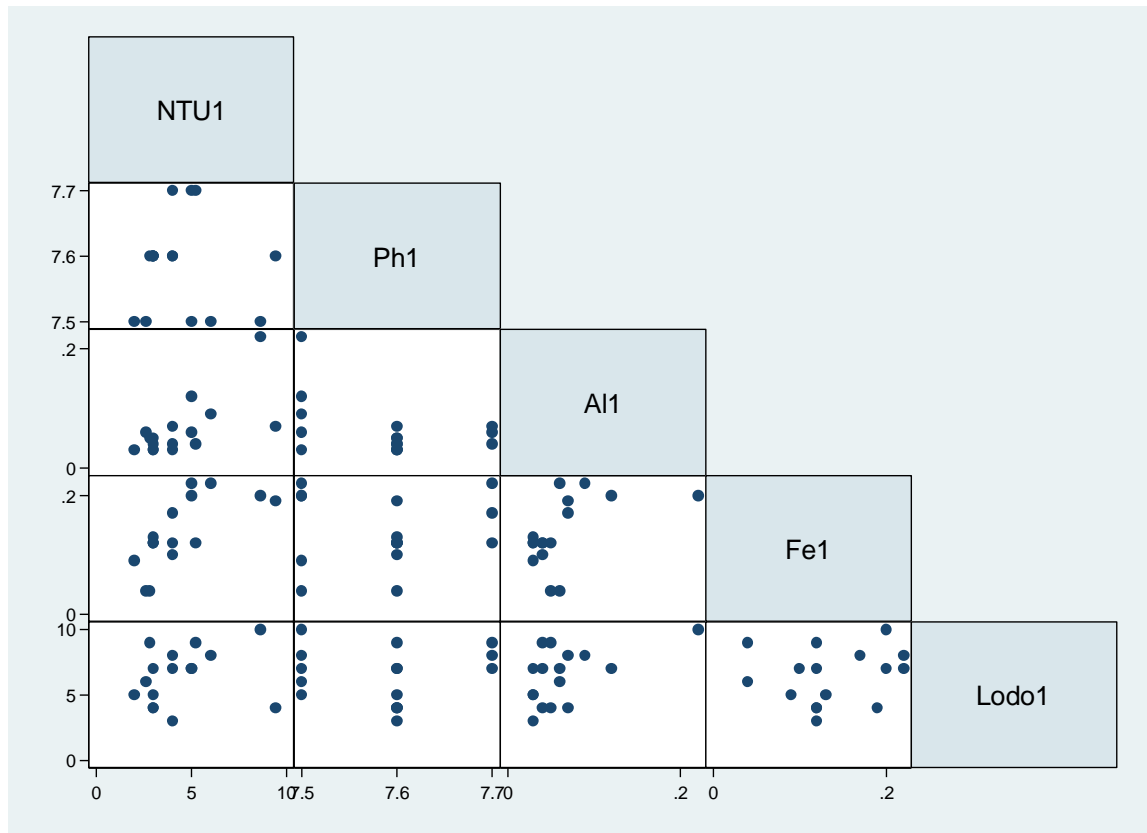
Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

La anterior matriz muestra la relación de la turbiedad con los primeros cinco regresores²⁰, y de estos entre sí, en forma de dispersión de puntos. Particularmente, la variable ppm –correspondiente a las partes por millón de coagulante del tipo hidroxiclورو de aluminio– toma valores discretos categóricos²¹, por eso los diagramas de dispersión asociados lucen como grupos de puntos. En contraste, las tendencias más claras son el aumento de la Turbiedad en función del Color y la proporcionalidad inversa de la Alcalinidad. Los diagramas de dispersión para Dureza son menos explicativos, en el posterior análisis inferencial se propondrá una relación significativa.

²⁰ Regresor: variable explicativa en un modelo de regresión lineal.

²¹ 10, 20, 30 y 40 partes por millón.

Figura 3. Segunda matriz de correlación gráfica.



Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Análogamente, la variable asociada al pH evidencia su relación directa con la turbiedad. Asimismo, son proporcionales las correlaciones del aluminio, hierro y porcentaje de lodo. Por otra parte, la concentración de hierro y aluminio se correlaciona positivamente con el porcentaje de lodo.

5.3 ESTIMACIÓN DE MODELOS LINEALES

En esta sección, se estimaron múltiples modelos lineales, según el tipo de coagulante PAC a partir de los datos registrados. Las variables dependientes son aquellas de principal interés en el contexto del diseño experimental: turbiedad residual, porcentaje de lodo, color, concentración de aluminio; las variables independientes son todas las restantes, pudiendo estas actuar también como covariables (Las covariables no son necesariamente explicativas, pero se correlacionan con la variable dependiente).

Convenientemente, las medidas en éste estudio son endógenas al modelo puesto que toman valores determinísticos dentro la teoría físico-química; por ello se espera ajustes altos. Para determinar la fiabilidad de los modelos, se usa el coeficiente de determinación R^2 cuyos resultados²² están en la siguiente tabla 6.

Tabla 6. Coeficientes de determinación de las regresiones.

Relación R/L	Tipo de Coagulante	R^2 Turbiedad	R^2 Lodo	R^2 Color	R^2 AI
20/80	PAC1	0.9980	0.9762	0.9018	0.9905
	PAC2	0.9716	0.7655	0.6891	0.9531
	PAC3	0.8549	0.9738	0.8022	0.8661
30/70	PAC1	0.9952	0.9259	0.9940	0.9216
	PAC2	0.9823	0.8972	0.9595	0.9670
	PAC3	0.9732	0.8662	0.9685	0.9307
40/60	PAC1	0.9753	0.7300	0.9914	0.9150
	PAC2	0.9961	0.8866	0.9940	0.8529
	PAC3	0.9991	0.9075	0.9993	0.8958
50/50	PAC1	0.9663	0.9406	0.9301	0.6716
	PAC2	0.9734	0.9043	0.9839	0.9686
	PAC3	0.9636	0.8831	0.9531	0.5705
70/30	PAC1	0.8932	0.9084	0.9153	0.9357
	PAC2	0.6325	0.8700	0.7783	0.6349
	PAC3	0.8942	0.9313	0.8624	0.7344
100/0	PAC1	0.9663	0.9434	0.7965	0.8227
	PAC2	0.9734	0.9406	0.9117	0.8727
	PAC3	0.9636	0.9531	0.9448	0.8946
Promedio		0.9429	0.9002	0.9098	0.8555

Fuente. El autor

5.4 CALIDAD DE LA ESTIMACIÓN

Grosso modo, la determinación es muy alta: todos los modelos son significativos en conjunto, y de esta forma, las variables independientes explican globalmente la turbiedad en las fuentes de agua evaluadas. Para los tres tipos de coagulante PAC1, PAC2, PAC3 los coeficientes R^2 promedio son: **91.53%**, 89.13% y 89.20%, respectivamente. La mejor explicatividad se obtiene con el **PAC1**.

²² Los modelos calculados desde el software STATA® están en el capítulo de Anexos de regresión.

A modo de prueba de calidad se retiraron regresores de la ecuación y **–en todos los casos–** se obtenían coeficientes R^2 inferiores. Por tanto, se concluye que usar todas las variables del experimento arroja el mejor modelo posible, obteniéndose una estimación muy completa, además de determinística, explicativa y válida para pronosticar.

5.5 ESTIMACIÓN DEL MEJOR COAGULANTE

El criterio de decisión para determinar cuál coagulante es el mejor, en cada relación, son las correlaciones entre las reducciones porcentuales de cada variable con respecto a su estado inicial en el agua cruda. Es importante considerar la reducción porcentual por tratarse de una variación relativa y no una absoluta: si se considera sólo la diferencia aritmética se incurriría en un error de punto de referencia.

En virtud, se calcularon las siguientes matrices de correlación²³ según relación río-Ciénaga, priorizando una fuerte reducción conjunta entre **turbiedad, color** y trazas de **aluminio** y **hierro** –ya que estos parámetros físico-químicos son los más importantes al momento de la seleccionar el coagulante óptimo.

En la Planta de Servicios Industriales Balance de la Refinería de Barrancabermeja, se considera que el agua clarificada debe presentar las siguientes características de calidad:

Tabla 7. Valores Máximos admisibles principales parámetros de agua clarificada.

Parámetro	Unidades	Valor Máximo Admisible
Turbiedad	Unidades nefelométrías de Turbidez [NTU]	5
Color	Unidades de Platino Cobalto [UPC]	50
Aluminio	$\frac{mg\ Al}{L}$	0.15
Hierro	$\frac{mg\ Fe}{L}$	0.20

Fuente. El autor

²³ Estas matrices contienen los coeficientes de correlación R entre las reducciones porcentuales de las variables. Calculadas en STATA®, versión 12.

En términos generales, los coagulantes evaluados pueden ser utilizados para la clarificación del agua, debido a que en concentraciones superiores a 10 ppm los resultados obtenidos en las pruebas de jarras cumplen con los valores admisibles.

Los coagulantes evaluados presentaron resultados óptimos en la remoción de turbiedad, por lo que la selección del mejor coagulante se realizó mediante el análisis de las variables restantes.

Por lo anterior, se definió el mejor coagulante para cada relación río-ciénaga, considerando las mayores reducciones para las variables de: color, Hierro y residual de Aluminio en el agua clarificada.

Es importante aclarar que los valores positivos indican que hay una reducción, mientras que los valores negativos indican que hay un incremento con la adición del coagulante, como es el caso del residual de Aluminio. De igual forma, los subíndices numéricos que acompañan cada parámetro indica el coagulante PAC utilizado (1,2 y 3).

Los resultados del análisis estadístico inferencial, para las relaciones 20%-80%, 40%-60%, 50%-50%, 70%-30%, se muestran en el Anexo D.

Los resultados de la reducción de principales variables físico-químicas del agua clarificada para una relación 30% río a 70% ciénaga, se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de reducción en la relación 30/70

PAC1		PAC2		PAC3	
	ntu1		ntu2		ntu3
ntu1	1.0000	ntu2	1.0000	ntu3	1.0000
color1	0.9775	color2	0.9573	color3	0.9658
Al1	-0.8315	Al2	-0.9244	Al3	-0.0628
Fe1	0.8208	Fe2	0.9525	Fe3	0.9654

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

En la Tabla 8 se evidencia que, en la relación 30/70 el PAC3 logra buenas reducciones conjuntas con la ventaja de una mínima aparición de aluminio.

Los resultados de la reducción de principales variables físico-químicas del agua clarificada para una relación 100% río a 0% ciénaga, se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados de reducción en la relación 100/0.

PAC1		PAC2		PAC3	
	ntu1		ntu2		ntu3
ntu1	1.0000	ntu2	1.0000	ntu3	1.0000
color1	0.9176	color2	0.4384	color3	-0.0783
Al1	-0.6837	Al2	-0.3809	Al3	0.0636
Fe1	0.6514	Fe2	0.7324	Fe3	-0.2631

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

En la Tabla 9, se aprecia que el PAC1 supera significativamente a los otros coagulantes en la remoción de hierro y color. Los resultados de los ensayos realizados con el PAC3 para esta relación no son lo suficientemente satisfactorios, a pesar de que el residual de aluminio fué muy bajo.

En la tabla 10 se muestra el coagulante óptimo de acuerdo a la relación de mezcla.

Tabla 10. Mejor coagulante para cada relación de mezcla

Relación río/ciénaga	Mejor coagulante
20/80	PAC3
30/70	PAC3
40/60	PAC1,2,3
50/50	PAC2
70/30	PAC1
100/0	PAC1

Fuente. El autor

De acuerdo con los resultados obtenidos, para relaciones de río-lago menor a 40 el PAC3 es el mejor coagulante, Para el caso en que las relaciones de mezcla sean iguales o superiores a 70 se recomienda el uso del PAC1.

Con base en lo anterior, para las condiciones actuales de la planta se considera conveniente utilizar el PAC3 como coagulante, ya que la relación de mezcla más empleada es 30% río y 70% ciénaga.

En un futuro donde se prevé el uso exclusivo de agua del río en el proceso de clarificación, se recomienda utilizar como coagulante el PAC1.

El análisis del comportamiento del pH y la alcalinidad, así como las funciones para estimar la dosis óptima de coagulante y el porcentaje en volumen de lodos que se presentan en los siguientes numerales, se determinaran para estas dos relaciones de mezcla (30% río-70% ciénaga y 100% río).

5.6 COMPORTAMIENTO DEL pH y ALCALINIDAD

Para las relaciones río-Ciénaga 30/70 y 100/0, la reducción de alcalinidad y pH del agua clarificada según el coagulante se muestra en la Tabla 11 y 12 respectivamente.

Tabla 11. Reducción de alcalinidad y pH del agua clarificada para una relación 30% río - 70%.

Variable	Obs	Mean	Variable	Obs	Mean
Ph1	16	-.0131136	alk1	16	.2077097
Ph2	20	-.0746946	alk2	20	.1790566
Ph3	20	-.0631837	alk3	20	.2093151

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Tabla 12. Reducción de alcalinidad y pH del agua clarificada para una relación 100% río - 0%.

Variable	Obs	Mean	Variable	Obs	Mean
Ph1	16	.0241009	alk1	16	.1712344
Ph2	12	.0184552	alk2	12	.0799015
Ph3	12	.01518	alk3	12	.0742396

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

En la Tabla 11 y 12 se puede observar que la reducción del pH no es significativa (equivalente a cero) usando cualesquiera de los coagulantes PAC para las relaciones 30/70 y 100/0, sin embargo, la reducción de alcalinidad es más

evidente en la relación río–ciénaga (30/70) en comparación con la relación 100/0, lo cual nos indica en términos generales que los coagulantes PAC evaluados no modifican el pH del agua clarificada con respecto al agua cruda y el contenido de alcalinidad se puede ver reducido en el agua clarificada en un veinte por ciento (20%) aproximadamente para la mezcla actual de río-ciénaga (30/70) con respecto al agua cruda.

Para relaciones de mezcla (100/0), la reducción de alcalinidad en el agua clarificada es muy baja y es menor del veinte por ciento (20%).

5.7 FUNCIONES DE ESTIMACIÓN DE DOSIS ÓPTIMA PARA EL MEJOR COAGULANTE

Las ecuaciones obtenidas, de alto ajuste, que pueden usarse para inferir las partes por millón de cada coagulante óptimo por relación, se presentan a continuación²⁴:

Cabe resaltar que para utilizar estas ecuaciones es necesario calcular la disminución fraccional de cada variable, previo conocimiento del valor del agua cruda y clarificada, esta última de acuerdo valores máximos admisibles registrados en la tabla 13.

A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo para determinar disminución fraccional de turbiedad

$$Turbiedad = \frac{(Turbiedad\ del\ agua\ cruda - Turbiedad\ del\ agua\ clarificada)}{Turbiedad\ del\ agua\ cruda}$$

Turbiedad del agua cruda: 300 NTU

Turbiedad del agua clarificada 5 NTU (Tabla 13.)

$$Turbiedad = \frac{(300\ NTU - 5\ NTU)}{300\ NTU} = 0.98$$

²⁴ Regresión para las partes por millón como variable dependiente, coagulante PAC3 y PAC1 relaciones río-Ciénaga 30/70 y 100/0, respectivamente. Software STATA® versión 12.

Tabla 13. Valores de reducción fraccional para alcalinidad (ALK), dureza (DUR), conductividad (K) y pH, en las relaciones río-ciénaga más utilizadas.

RELACIÓN RÍO-CIÉNAGA	COAGULANTE	DISMINUCIÓN FRACCIONAL			
		ALK	DUR	K	pH
100/0	PAC1	0.08	0.06	0.16	-0.004
30/70	PAC3	0.21	0.06	0.14	0.01

Fuente. El autor

5.7.1 Función dosis óptima PAC 3, relación 30/70

$$\text{ppm}_{R30,PAC3} = 37.59 + 30.97 \cdot \text{Turbiedad} - 96.63 \cdot \text{Color} + 18.57 \cdot \text{Al} + 47.02 \cdot \text{Fe} - 52.14 \cdot \text{pH} - 34.76 \cdot \text{Alcalinidad} - 40.19 \cdot \text{Dureza} + 30.80 \cdot \text{Conductividad}$$

Reemplazando los valores de la tabla 13. Se obtiene la función simplificada

$$\text{ppm}_{R30,PAC3} = 31.67 + 30.97 \cdot \text{Turbiedad} - 96.63 \cdot \text{Color} + 18.57 \cdot \text{Al} + 47.02 \cdot \text{Fe}$$

Tabla 14. Modelo estimado ppm para PAC3, relación 30/70

```

.import excel "Data_Reduction.xls", sheet("R30") firstrow
. reg ppm ntu3 color3 alk3 dur3 K3 Ph3 Al3 Fe3

```

Source	SS	df	MS			
Model	1549.7894	8	193.723675	Number of obs =	16	
Residual	450.210598	7	64.3157996	F(8, 7) =	3.01	
Total	2000	15	133.333333	Prob > F =	0.0820	
				R-squared =	0.7749	
				Adj R-squared =	0.5176	
				Root MSE =	8.0197	

ppm	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
ntu3	30.97569	84.38767	0.37	0.724	-168.5694	230.5208
color3	-96.62854	43.14529	-2.24	0.060	-198.6509	5.393842
alk3	-34.76315	29.26508	-1.19	0.274	-103.9641	34.43778
dur3	-40.1927	48.80378	-0.82	0.437	-155.5953	75.2099
K3	30.80822	19.43525	1.59	0.157	-15.14884	76.76528
Ph3	-52.14057	41.16563	-1.27	0.246	-149.4818	45.20069
Al3	18.56571	25.89451	0.72	0.497	-42.66508	79.7965
Fe3	47.02367	53.06537	0.89	0.405	-78.456	172.5033
_cons	37.59772	8.583444	4.38	0.003	17.30109	57.89434

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

5.7.2. Función dosis óptima PAC 1, relación 100/0

$$\text{ppm}_{R100,PAC1} = 305.02 - 292.59 \cdot \text{Turbiedad} - 71.25 \cdot \text{Color} + 213.22 \cdot \text{Al} + 80.87 \cdot \text{Fe} - 1158.36 \cdot \text{pH} - 215.36 \cdot \text{Alcalinidad} - 211.81 \cdot \text{Dureza} - 56.90 \cdot \text{Conductividad}$$

Reemplazando los valores de la se obtiene la siguiente función simplificada

$$\text{ppm}_{R100,PAC1} = 270.61 - 292.59 \cdot \text{Turbiedad} - 71.25 \cdot \text{Color} + 213.22 \cdot \text{Al} + 80.87 \cdot \text{Fe}$$

Tabla 15. Modelo estimado ppm para PAC1, relación 100/0

```
. import excel "Data_Reduction.xls", sheet("R100") firstrow
. reg ppm ntus3 color3 alk3 dur3 K3 Ph3 Al3 Fe3
```

Source	SS	df	MS	Number of obs = 12		
Model	1246.17965	8	155.772456	F(8, 3) =	1.84	
Residual	253.820351	3	84.6067835	Prob > F =	0.3337	
Total	1500	11	136.363636	R-squared =	0.8308	
				Adj R-squared =	0.3796	
				Root MSE =	9.1982	

ppm	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
ntu1	-292.5918	134.332	-2.18	0.118	-720.0963	134.9126
color1	-71.24914	330.6957	-0.22	0.843	-1123.671	981.1722
alk1	215.3597	247.524	0.87	0.448	-572.3721	1003.091
dur1	-211.8117	86.64561	-2.44	0.092	-487.5567	63.93334
K1	-56.90291	62.27971	-0.91	0.428	-255.1047	141.2989
Ph1	-1158.358	580.3172	-2.00	0.140	-3005.186	688.4707
Al1	213.2167	140.3544	1.52	0.226	-233.4536	659.8869
Fe1	80.87172	203.0006	0.40	0.717	-565.1669	726.9104
_cons	305.0168	320.7002	0.95	0.412	-715.5944	1325.628

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Las pruebas de supuestos para las funciones obtenidas, se encuentran en el Anexo C.

5.8 FUNCIÓN DE ESTIMACIÓN DE LODO (% VOLUMEN)

A continuación, se presentan las funciones que pueden emplearse para estimar la generación de lodo (% volumen) a partir del mejor coagulante en su dosis óptima. Para utilizar estas funciones es necesario:

- Calcular la dosis óptima con las funciones matemáticas (ver capítulo 5.7).
- Calcular la disminución porcentual de cada variable (Ver capítulo 5.7).

5.8.1 Función estimación de lodo PAC 3, relación 30/70

$$\%Lodo_{R30,PAC3} = -1.44 - 8.95 \cdot \text{Turbiedad} + 18.76 \cdot \text{Color} - 10.35 \cdot \text{Al} - 1.69 \cdot \text{Fe} + 10.25 \cdot \text{Alcalinidad} + 0.13 \cdot \text{PPM}_{R30,PAC3}$$

Tabla 16. Modelo estimado porcentaje de lodo para PAC3, relación 30/70

Source	SS	df	MS	Number of obs = 16		
Model	182.689569	6	30.4482615	F(6, 9) =	8.75	
Residual	31.310431	9	3.47893678	Prob > F =	0.0024	
Total	214	15	14.2666667	R-squared =	0.8537	
				Adj R-squared =	0.7561	
				Root MSE =	1.8652	

lodo3	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
ppm	.1297403	.0739808	1.75	0.113	-.037616	.2970966
ntu3	-8.948984	19.31885	-0.46	0.654	-52.65125	34.75328
color3	18.7612	9.312688	2.01	0.075	-2.305559	39.82797
Al3	-10.35334	6.05679	-1.71	0.122	-24.05475	3.348075
Fe3	-1.692685	12.62518	-0.13	0.896	-30.25282	26.86745
alk3	10.25031	4.807609	2.13	0.062	-.6252559	21.12588
_cons	-1.444513	2.272058	-0.64	0.541	-6.584266	3.695241

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

5.8.2 Función estimación de lodo PAC 1, relación 100/0

$$\%Lodo_{R100,PAC1} = -45.10 + 7.32 \cdot \text{Turbiedad} + 50.62 \cdot \text{Color} - 29.42 \cdot \text{Al} \\ + 14.50 \cdot \text{Fe} - 37.87 \cdot \text{Alcalinidad} + 0.0028 \cdot \text{PPM}_{R100,PAC1}$$

Tabla 17. Modelo estimado porcentaje de lodo para PAC1, relación 100/0

Source	SS	df	MS	Number of obs = 12		
Model	17.126267	6	2.85437783	F(6, 5) =	7.97	
Residual	1.79039968	5	.358079936	Prob > F =	0.0189	
Total	18.9166667	11	1.71969697	R-squared =	0.9054	
				Adj R-squared =	0.7918	
				Root MSE =	.5984	

lodo3	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
ppm	.002879	.0197125	0.15	0.890	-.0477935	.0535515
ntu1	7.324099	6.026847	1.22	0.279	-8.168404	22.8166
color1	50.6168	17.63856	2.87	0.035	5.275431	95.95818
Al1	-29.41665	8.137235	-3.62	0.015	-50.33408	-8.499227
Fe1	14.50264	9.825999	1.48	0.200	-10.7559	39.76117
alk1	-37.86564	11.17368	-3.39	0.019	-66.5885	-9.14279
_cons	-45.10295	14.8126	-3.04	0.029	-83.17996	-7.025948

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

5.9 DOSIS ÓPTIMA Y GENERACIÓN DE LODOS A PARTIR DE LAS FUNCIONES OBTENIDAS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Utilizando el valor promedio de las características del agua cruda para la relación río-ciénaga 30/70 y 100/0 (ver Anexo B), los valores máximos admisibles para agua clarificada (Tabla 7) y los valores de reducción fraccional para alcalinidad (ALK), dureza (DUR), conductividad (K) y pH (Tabla 13), Se obtiene las dosis óptimas y los porcentajes del contenido de lodos generados, los cuales se pueden ver en la tabla 18 y 19.

Tabla 18. Dosis óptima relación 30/70 utilizando PAC3.

Relación 30/70 río-ciénaga	NTU	COLOR	ALK	DUR	K	pH	Fe	Al
Valor promedio agua cruda	179	1311	31	34	89	7.0	4	N.A.
Valor agua clarificada objetivo	5.0	50.0	-	-	-	-	0.20	0.15
Valor de reducción fraccional	0.97	0.96	0.21	0.06	0.14	0.01	0.94	0.15
Dosis óptima PAC3 (ppm)²⁵	16							
Contenido de lodos (%v/v)²⁶	9.0							

Fuente. El autor

Tabla 19. Dosis óptima relación 100/0 utilizando PAC1.

Relación 100/0 río-ciénaga	NTU	COLOR	ALK	DUR	K	pH	Fe	Al
Valor promedio agua cruda	440	2300	47	52	189	7.7	3.6	
Valor agua clarificada objetivo	5.0	50.0	-	-	-	-	0.20	0.15
Valor de reducción fraccional	0.99	0.98	0.08	0.06	0.16	-0.004	0.94	0.15
Dosis óptima PAC1 (ppm)²⁷	20							
Contenido de lodos (%v/v)²⁸	18							

Fuente. El autor

En la Tabla 18 y 19 se pueden ver los valores promedio de turbiedad, color, alcalinidad, dureza, conductividad, Hierro y pH para el agua cruda en la relación 30% río y 70% ciénaga utilizando PAC3 y para agua cruda 100% río utilizando PAC1, respectivamente, además se pudo determinar que la dosis óptima de coagulante y porcentaje en volumen de lodos es de 16 ppm / 9% Y 20ppm / 18%, respectivamente. Cabe indicar que las dosis de coagulantes estimadas cumplen con el propósito de garantizar una calidad de agua clarificada acorde con lo establecido en la tabla 7.

Las funciones matemáticas obtenidas en este capítulo, son una herramienta para que el operador de planta de Servicios Industriales Balance pueda determinar la dosis óptima de coagulante PAC1 y PAC3 y su respectivo contenido porcentual de lodos, para una relación de mezcla actual y futura de agua cruda.

²⁵ Dosis óptima de coagulante PAC3 a partir de la función obtenida en el numeral 5.8.1

²⁶ Contenido de lodos (% volumen) a partir de la función obtenida en el numeral 5.10.1

²⁷ Dosis óptima de coagulante PAC1 a partir de la función obtenida en el numeral 5.8.2

²⁸ Contenido de lodos (% volumen) a partir de la función obtenida en el numeral 5.10.2

6. COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SULFATO DE ALUMINIO VERSUS PAC

Los resultados de la comparación del desempeño del sulfato de aluminio versus PAC se muestran en la tabla 20.

Tabla 20. Comparación sulfato de aluminio-PAC

TIPO DE AGUA	Coagulante	R/L	Dosis óptima (ppm)	NTU	Color	Alk	Dur	K	pH	Al	Fe	%Lodo
				PROMEDIO								
CRUDA	N.A.	30/70		180	1300	31	34	89	7.5	N.A	4	N.A
		100/0		440	2300	47	52	189	7.7	N.A	3.6	N.A
CLARIFICADA	Sulfato de aluminio	30/70	120	4.2	38.4	7.8	32.0	89.6	5.6	0.15	0.22	15.9
	PAC3		16	2.6	38.2	23.2	32.0	74.7	7.5	0.1	0.1	9.0
	Sulfato de aluminio	100/0	180	6.2	54.5	17.5	55.3	200.3	6.0	0.10	0.20	35.7
	PAC1		20	4.3	50.2	43.7	43.3	141.3	7.5	0.1	0.2	18.0

Fuente. El autor

En la Tabla 20 se puede observar que el uso de policloruro de aluminio (PAC) requiere dosificaciones menores (88,7% menos) en comparación con el sulfato de aluminio para una remoción de turbiedad y color similares. Entre las principales diferencias al utilizar coagulantes tipo PAC es su desempeño a valores de pH más altos y forma flóculos más grandes y estables, de mejor tamaño que facilitan la sedimentación.

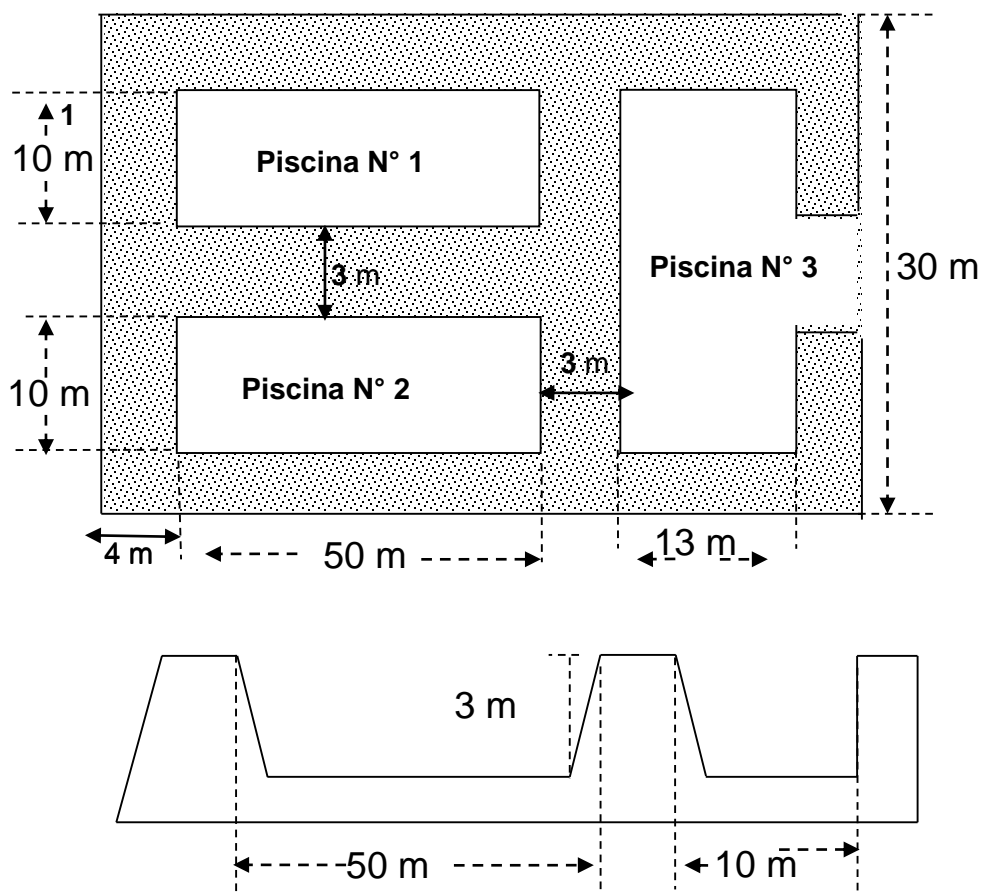
Además, los coagulantes tipo PAC no reducen significativamente alcalinidad, esto implica que no hay alteración del pH y por lo tanto no es necesario el uso de Cal para estabilizarlo; condición necesaria con el sulfato de aluminio, que si consume alcalinidad y por lo tanto disminuye el pH.

Cabe resaltar que los parámetros de dureza, conductividad, hierro y aluminio del agua clarificada son similares con el uso del sulfato de aluminio y coagulantes tipo PAC's, caso contrario sucede con el porcentaje de generación de lodos el cual se reduce en 46,48% en promedio cuando se utiliza coagulante tipo PAC.

7. COMPARACIÓN DEL TIEMPO DE LLENADO DE LA PISCINA DE LODO

Los lodos generados en el proceso de clarificación del agua en la unidad de Servicios Industriales Balance son dispuestos en tres piscinas de sedimentación distribuidas de acuerdo a la siguiente figura.

Figura 4. Piscinas de sedimentación de lodos



Fuente. Especificaciones técnicas de retiro de lodos vigencia 2015 Ecopetrol S.A. - Departamento de Servicios Industriales Balance

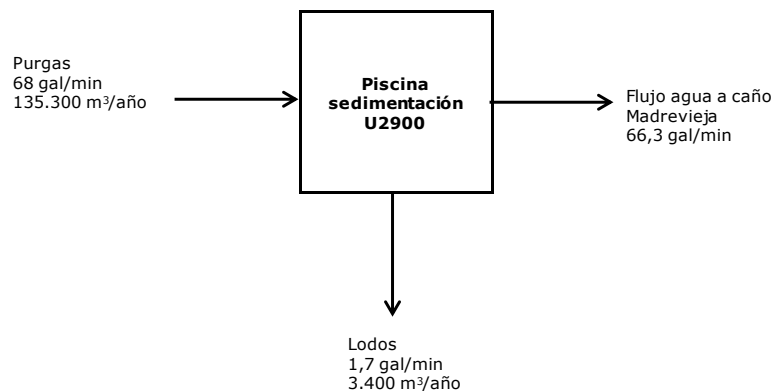
Actualmente se procesan alrededor de 3200 GPM de agua cruda en los clarificadores a partir de una relación de mezcla de 30% río y 70% ciénaga y una dosificación óptima de coagulante (sulfato de aluminio) de 120 ppm,

produciéndose aproximadamente 512 GPM de lodo, de los cuales sólo se extraen mediante el uso de purgas 68 GPM.

Las purgas son direccionadas hacia las piscinas de sedimentación, las cuales proporcionan el tiempo suficiente para la separación del lodo y el agua sobrenadante presente en este.

Los lodos que se decantan en el fondo de las piscinas (ver figura 14) son aproximadamente 1,7 GPM y el agua sobrenadante corresponde a 66,3 GPM (ver figura 15).

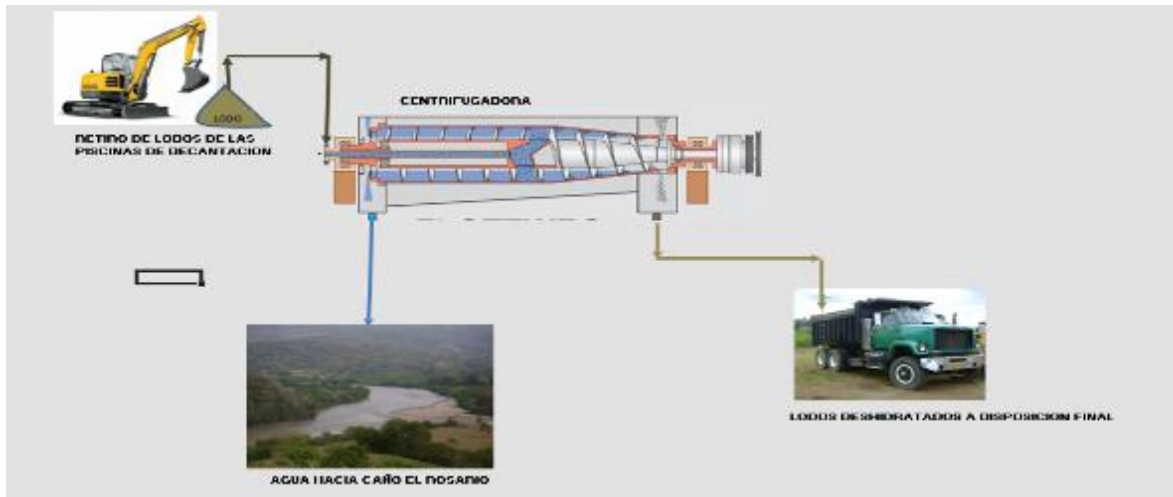
Figura 5. Balance volumétrico de lodos en piscinas de sedimentación



Fuente. Especificaciones técnicas de retiro de lodos vigencia 2015 Ecopetrol S.A.
- Departamento de Servicios Industriales Balance

La capacidad de las piscinas N° 1 y 2 son de 1500 m³ cada una y la de la piscina No 3 es de 1200 m³, lo que indica que las piscinas se deben limpiar anualmente. Posterior a la extracción de lodos se realiza una deshidratación mediante el uso de una centrifuga, con lo cual se garantiza una humedad adecuada del lodo para ser dispuesto en una escombrera Municipal.

Figura 6. Tratamiento y disposición de lodos



Fuente. Especificaciones técnicas de retiro de lodos vigencia 2015 Ecopetrol S.A. - Departamento de Servicios Industriales Balance

Las características promedio del lodo de las piscinas de decantación de la unidad U2900 se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Características físico-químicas promedio del lodo en las piscinas de decantación

Componente	Unidad	Resultado
Humedad a 105 GR °C	%peso	De 14 a 30
pH (1:1) SUELO/AGUA	N/A	6,02
NITROGENO	mg/Kg	1234
BARIO	mg/Kg	26,93
VANADIO	mg/Kg	39,52
PLOMO	mg/Kg	7,06
NIQUEL	mg/Kg	12,37
CROMO	mg/Kg	14,28
ARSENICO	microg/Kg	347,3
MERCURIO	microg/Kg	<7,22
FOSFORO DISPONIBLE	mg/Kg	16,22
CADMIO	mg/Kg	<1,03
HIDROCARBUROS TOTALES	%peso	1,47

Fuente. Especificaciones técnicas de retiro de lodos vigencia 2015 Ecopetrol S.A. - Departamento de Servicios Industriales Balance

De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas de jarras, se determina que el porcentaje de reducción de lodos utilizando los coagulantes tipos PAC es 46,48% con respecto al lodo generado a partir del uso del sulfato de aluminio (ver tabla 20), determinándose que el tiempo de llenado de las piscinas de sedimentación utilizando PAC es de dos años.

Cabe mencionar que los resultados obtenidos deben validarse una vez se realicen las pruebas con el coagulante tipo PAC en planta.

8. REQUERIMIENTOS PARA EL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN

Los requerimientos necesarios para la dosificación del policloruro de aluminio en el sistema de clarificación del agua así como la descripción de las características principales de las bombas dosificadoras se muestran en la Tabla 22 y 23 respectivamente.

Las memorias de cálculo para la selección de estas bombas se encuentran en el Anexo G.

Tabla 22. Requerimientos sistema de dosificación

Descripción	Cantidad
Bombas dosificadoras	2 un.
Tubería PVC ,diámetro =1 in	200 ft
Tubería PVC ,diámetro =0.5 in	100 ft
Codos de 90°	10 un.
Válvula globo de ½ “ ,	8 un.
Válvula bloque de 1”	4 un.

Fuente. El autor

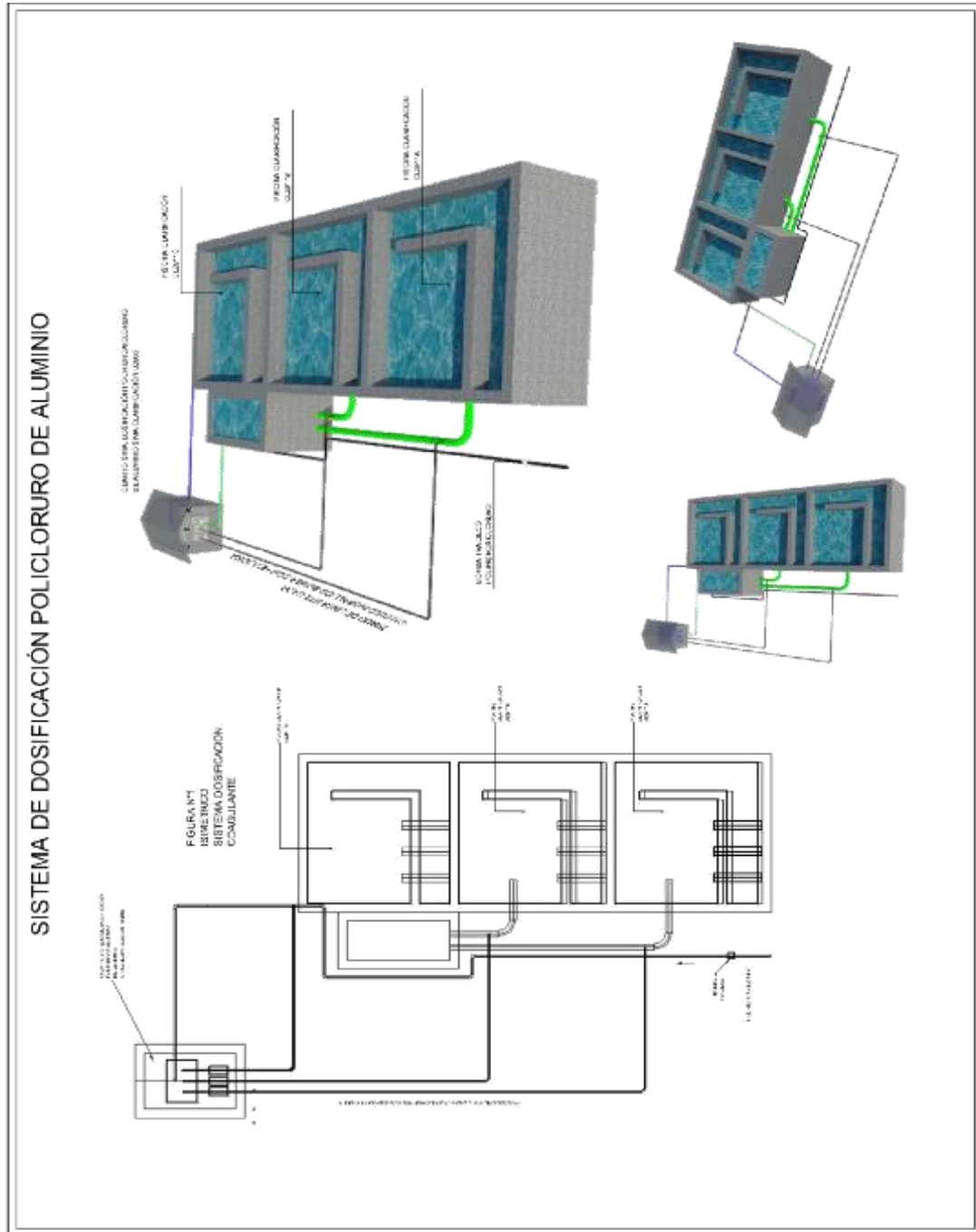
Tabla 23. Características bombas de dosificación

Fluido a transportar	Policloruro de Aluminio Liquido
Caudal	0,10 GPM
Temperatura	30 °C
Gravedad Específica	1,3
Viscosidad	300 cP
Diámetro de succión	1 pulgada
Diámetro de descarga	1/2 pulgada
Presión de Succión	1,85 psig
Presión de Descarga	16 psig
Potencia de Diseño	1/3 HP

Fuente. El autor

8.1 ISOMÉTRICO SISTEMA DE DOSIFICACIÓN POLICLORURO DE ALUMINIO

Figura 7. Sistema de dosificación.



Fuente. El autor

9. ANÁLISIS ECONÓMICO

En este capítulo se estudia la viabilidad desde el punto de vista económico, de la implementación del coagulante tipo PAC en el sistema de clarificación del agua de la Unidad de Servicios Industriales Balance, el propósito de realizar el cambio de coagulante tradicional (Sulfato de Aluminio líquido) por un coagulante polimérico tipo policloruro de Aluminio, no sólo es obtener agua clarificada de buena calidad sino también reducir los costos del tratamiento que se pueden ver reflejados en el ahorro por tarifa del kilogalón de agua tratada.

A partir de los resultados experimentales se determinó el mejor PAC para la relación de mezcla actual (30% río y 70% ciénaga) y futura (100% río), así como la dosis óptima y el porcentaje en volumen de lodos generados. En el presente análisis económico se considerará la relación actual de mezcla y se comparará con la dosis óptima de Sulfato de aluminio versus dosis óptima del coagulante tipo PAC que mostró mejor desempeño en las pruebas de jarras.

9.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN

A continuación, se muestran las condiciones actuales de operación, para las cuales se analizará las dos alternativas de dosificación

Tabla 24. Condiciones actuales de operación de la planta de tratamiento

Parámetro	Valor
Caudal	3200 GPM ²⁹
Relación río-ciénaga	30/70
Horas de operación / día	24
Días de operación / mes	30

Fuente. El autor

²⁹ Fuente: Base de datos planta de servicios industriales balance

9.2 COSTO INSUMOS QUÍMICOS, ENERGÍA ELÉCTRICA, TRATAMIENTO Y DISPOSICION DE LODOS

Los costos de los insumos químicos incluido el costo del transporte se encuentra de energía eléctrica, tratamiento y disposición de lodos.

Los valores fueron suministrados por la empresa Clariant de Colombia S.A. quienes actualmente son los responsables del suministro y dosificación de los insumos químicos utilizados en la Unidad de Servicios Industriales Balance.

Tabla 25. Costo de kilogramo de insumo químico incluido costo de transporte

Producto	Costo total /Kilogramo ³⁰
Sulfato de Aluminio liquido tipo B	505 ³¹
Cal	796 ³²
Policloruro de aluminio	2916 ³³

Fuente. El autor

Tabla 26. Costo de energía, tratamiento y disposición de lodos

Servicio	Unidad	Valor
Energía	KW-H	230 ³⁴
Retiro, deshidratación y disposición de lodos	\$/m ³	94100 ³⁵

Fuente. El autor

Los costos fijos relacionados con la mano de obra, mantenimiento y otros gastos administrativos no se tuvieron en cuenta en el presente análisis por considerarse que estos serán iguales para ambas alternativas.

³⁰ Costo total incluye IVA

³¹ Fuente: Costo de mercado suministrados por Clariant de Colombia

³² Ibip

³³ Ibip

³⁴ Fuente: SAP, Marzo

³⁵ Fuente: Bases presupuestales Ecopetrol 2016

9.3 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO EVALUADAS

Se evaluaron y compararon dos alternativas de tratamiento:

1. Dosificación de sulfato de Aluminio y ajuste de pH (condición actual)
2. Dosificación de Policloruro de aluminio, el ajuste de pH no es necesario.

En la tabla 27, se muestra las condiciones de dosificación de los coagulantes, definidos a partir de los resultados obtenidos en las pruebas de jarras y la dosificación de cal para el ajuste de pH del agua clarificada fue obtenida con base en los registros de operación de la planta.

Tabla 27. Condiciones de dosificación y consumo de kilogramo por mes

Alternativa de dosificación	Producto	Dosificación (ppm)	Dosificación /día (Kg)	Dosificación /mes (Kg)
1. Condición actual	Sulfato de Aluminio liquido tipo B	120 ³⁶	2093	62789
	Cal	0.4 ³⁷	7.0	210
2. PAC3	Policloruro de aluminio	16.3 ³⁸	284	8520

Fuente. El autor

Tabla 28. Estimación de consumo de energía y generación de lodos

Alternativa de dosificación	Consumo de energía eléctrica / mes (KW-H)	Generación de lodos / mes (m ³)
1. Condición actual	644.28 ³⁹	284 ⁴⁰
2. PAC3	161.07 ⁴¹	142 ⁴²

Fuente. El autor

³⁶ Fuente: Base de datos planta de servicios industriales balance

³⁷ lbip

³⁸ Fuente: tabla 18

³⁹ Fuente: Base de datos planta de servicios industriales balance

⁴⁰ Fuente: Bases presupuestales Ecopetrol 2016

⁴¹ Fuente: Estimación requerimientos con base oferta comercial

⁴² Fuente: Pruebas de jarras ver tabla 20

9.4 COSTO DE INVERSIÓN

Para la dosificación del policloruro de aluminio en la Unidad de Servicios Industriales Balance es necesario realizar la siguiente inversión:

Tabla 29. Costo de Inversión

CONCEPTO	Valor estimado ⁴³
SUMINISTRO TUBERÍA (Tubería PVC 1 y 1/2", válvulas, codos)	\$ 2,222,189
BOMBAS DOSIFICADORAS	\$ 13,888,680 ⁴⁴
INSTALACIÓN BOMBAS	\$ 13,194,246
INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL	\$ 2,499,962
SUBTOTAL	\$ 31,805,077
AIU CONTRATISTA (30%)	\$ 12,722,031
INGENIERÍAS Y OTROS ESTUDIOS	\$ 3,498,558
TOTAL	\$ 48,025,667

Fuente. El autor

9.5 AHORRO ESTIMADO SOBRE LA TARIFA DE AGUA TRATADA

De acuerdo a los resultados obtenidos en el flujo de caja (Anexo H), se estima que el ahorro sobre la tarifa del agua tratada, por el cambio de coagulante para la relación actual de mezcla (30% río y 70% ciénaga) es de \$131.64 por kilo-galón de agua tratada, lo cual equivale a un ahorro de \$221 millones por año.

El costo de inversión es bajo y el retorno de la inversión (TIR) es muy alto (461%), lo que indica que este proyecto es viable económicamente y el retorno de la inversión es inferior a los seis (6) meses.

⁴³ Fuente: Software institucional Ecopetrol- estimación de costo de inversión

⁴⁴ Fuente: Oferta comercial

10. CONCLUSIONES

Se utiliza 0,87 veces menos coagulante PAC´ con respecto al sulfato de aluminio (Mayor poder coagulante de los PAC´s a menor dosis), para obtener similares resultados de remoción de turbiedad y color en el proceso de clarificación del agua.

Para las mismas condiciones físico-químicas del agua cruda, los PAC´s disminuyen la generación de lodos hasta en un 46,48% y forman flóculos estables, compactos y de fácil sedimentación con respecto al sulfato de aluminio.

Los PAC´s son efectivos a intervalos de pH más amplios, no reducen la alcalinidad y no hay alteración del pH, por lo que no es necesario el uso de cal en el proceso de pretratamiento del agua cruda.

Posibilidad de implementación en la Unidad de Servicios Industriales Balance debido al bajo costo de la inversión (\$M48) y al muy alto retorno de la inversión (TIR) (461%), lo que indica que este proyecto es viable económicamente y el retorno de la inversión es inferior a los seis (6) meses.

El cambio del sulfato de aluminio por PAC´s en el proceso de clarificación del agua, para la relación actual de mezcla (30% río y 70% ciénaga) equivale a un ahorro de \$221 millones por año.

BIBLIOGRAFIA

Andía, Y. Tratamiento de agua: coagulación y floculación. Documento técnico. Planta de Tratamiento de Agua., Sedapal, Lima, 2000.

Arboleda Valencia, J. Teoría y Práctica de la Purificación del Agua, "Tomo 1", Editorial Mc Graw Hill – Interamericana, 3ra Edición. Bogotá, Colombia, 2000.

Causa, E., & Pinto, C. Investigación sobre procesos de coagulación-floculación de aguas en plantas de tratamiento. Santiago de Chile. 1974.

Cartwright, P. Tratamiento y reuso del agua en aplicaciones comerciales e industriales. Agua Latinoamérica, 9 (1), 20-24, 2009.

Cogollo Flores, J.M. Clarificación de Aguas usando coagulantes polimerizados: Caso del Hdroxicloruro de Aluminio. Rev. Dyna, 78 (165), 18-27., 2011

Kemmer, Frank., & Macallion, J. Manual del agua, tratamiento y aplicaciones (1 ed.). (N. c. company, Ed.) Mexico, Mexico: Mc Graw Hill. 1989

_____, Nalco Chemical Company. The NALCO Water Handbook, Second Edition. McGraw-Hill, Inc., 1988

Molinero, L. Construcción de modelos de regresión multivariantes. Alce Ingeniería, 2002

Montgomery, Douglas y Runger, George, Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. Primera edición. Ed. Mc Graw Hill. México. ISBN 970-10- 1017-5. Página 1 a 43, 1996

Pernitsky, D.J. and Edzwald, J.K. Selection of alum and polyaluminum coagulants: principles and applications. Journal of Water Supply: Research and Technology, 55 (2), 121-141, 2006.

Torra, A., & Valero, F. Investigación sobre procesos de coagulación-floculación de aguas en plantas de tratamiento. Tecnología del Agua, 1998

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). National Management Measures to Control Nonpoint Source Pollution from Urban Areas (Vols. EPA 841-B-05-004), Noviembre 2005

Washington, D.C. Obtenido de <https://www.epa.gov/aboutepa/about-office-water#wetlands>

Westfall, P. Kurtosis as Peakedness. The American Statistician 68, 191–195. Obtenido de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4321753>, 2014

ANEXOS

Anexo A. Procedimiento para Realizar Prueba de Jarras

A continuación, se indica la secuencia de pasos que se estableció para la realización de las pruebas de jarras diarias:

- a)** Se afora cada jarra con 1000 ml de muestra de agua cruda previamente caracterizada.
- b)** Se adaptaron las jarras en el respectivo equipo y se inició la mezcla rápida.
- c)** Se dosificó el coagulante con una micro-pipeta, en cantidades progresivas profundamente dentro de la muestra (no debe dejarse caer la solución de coagulante en la superficie del agua, esto desmejora la eficiencia de la mezcla rápida).
- d)** Posteriormente, se dejó actuar el coagulante durante un minuto en la mezcla rápida.
- e)** Finalizada la mezcla rápida, se disminuyó la velocidad de rotación de las paletas a 40 rpm durante 15 minutos (este proceso se conoce como mezcla lenta o floculación).
- f)** Transcurridos los 15 minutos, se suspendió la agitación y se dejó sedimentar la muestra por 15 minutos.
- g)** Por último, se tomó un volumen de muestra de 1000 ml para cada una de las jarras, y se realizó la caracterización del agua clarificada.

Anexo B. Resultados Pruebas de Jarras

A continuación, se adjuntan los resultados de las pruebas de jarras según relación río/Ciénaga y tipo de coagulante: Sulfato de aluminio, PAC1, PAC2 y PAC3.

Relación 20/80

Tabla 30. Características del agua cruda. Relación 20/80

Semana	NTU	Color	Alk	Dur	K	pH	Fe
1	133	1056	24	33	76.4	7	3
2	159	1198	24	30	82.5	7.1	3.6
3	164	1170	26	38	77.1	7.11	3.4
4	121	1156	19.2	26	69.5	6.94	3.3
5	134	1257	23.9	25	71.7	7.1	5.7

Fuente. El autor

Tabla 31. Características del agua clarificada utilizando sulfato de aluminio líquido tipo B. Relación 20/80

Semana	Dosis óptima	NTU	Color	Alk	Dur	K	pH	Al	Fe	%Lodo
1	120	2.25	40	7.5	33	74	5.4	0.12	0.17	12.6
2		4.2	18	7.5	31	81	5.5	0.15	0.19	12.2
3		3.4	45.5	9.5	35	78.4	5.25	0.13	0.11	12.4
4		2.9	17	7	28	62	6.05	0.08	0.09	11.3
5		3.6	40	8	21	68	5.4	0.12	0.17	12.8

Fuente. El autor

Tabla 32. Características del agua clarificada utilizando PAC1. Relación 20/80

Semana	ppm	NTU	Color	Alk1	Dur1	K1	pH1	Al1	Fe1	%Lodo
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	10	65	739	19.2	28	69.4	7.11	0.16	2.25	1
	20	4.5	66	17.8	28	70.3	7.36	0.04	0.23	10
	30	2.4	29	18.2	30	71	7.31	0.03	0.09	12
	40	1.89	23	21.6	26	74.1	7.25	0.04	0.08	15
2	10	23	192	25.8	30	81.4	7.54	0.14	0.8	3
	20	1.27	21	24.8	32	83.1	7.46	0.04	0.05	7
	30	1.05	11	22.2	34	84.7	7.4	0.03	0.03	10
	40	1.28	11	22.8	32	86.3	7.32	0.04	0.02	13
3	10	69	174	20.1	33	71.4	7.2	0.19	2.16	2
	20	3.3	19.3	18.3	30	69.6	7.24	0.03	0.11	10
	30	2.6	10.4	18	30	68.9	7.29	0.03	0.07	11
	40	2.2	10.9	19.4	31	69.3	7.25	0.03	0.07	14
4	10	71.4	196	19.2	26	86.7	7.21	0.19	2.19	2
	20	2.97	55	18.7	26	76.1	7.18	0.03	0.09	7
	30	1.68	37	16.8	24	77.5	7.11	0.02	0.04	11
	40	1.53	30	16.4	26.7	76.3	7.12	0.02	0.03	13
5	10	65	186	20.4	29	79.4	7.33	0.21	2.26	4
	20	3.7	59	17.6	27	77.3	7.24	0.03	0.13	8
	30	1.19	26	17.9	24	76.7	7.16	0.03	0.03	13
	40	1.21	29	18.3	24.6	76.1	7.19	0.03	0.03	16

Fuente. El autor

Tabla 33. Características del agua clarificada utilizando PAC2. Relación 20/80

ppm2	NTU2	Color2	Alk2	Dur2	K2	pH2	Al2	Fe2	%Lodo2
10	92	1008	24	32	74.3	7.39	0.23	2.67	1
20	14.7	178	20	32	80.9	7.42	0.1	0.67	16
30	1.5	56	20	32	87	7.29	0.04	0.13	18
40	1.9	26	19.2	32	93	7.22	0.03	0.08	24
10	32	176	21.8	34	87	7.6	0.14	2.16	2
20	1.7	24	24.8	36	93.7	7.6	0.08	0.09	7
30	1.06	16	24.8	36	99.6	7.6	0.07	0.06	12
40	1.09	16	24.6	36	108	7.4	0.08	0.08	13
10	79	79	23	36	84.1	7.41	0.16	2.33	2
20	13.4	13.4	20	34	83.7	7.36	0.04	0.04	5
30	1.6	10.6	20	34	84.6	7.29	0.03	0.06	13
40	1.4	14.4	21	32	84	7.26	0.03	0.03	15
10	87.4	147	31	28	89	7.31	0.2	2.41	4
20	13.4	194	16.8	26	85.2	7.05	0.04	0.09	6
30	1.88	40	16.8	26	95	7.01	0.03	0.07	11
40	1.49	39	16.2	27.4	96.7	7.01	0.03	0.02	15
10	72	191	22	31	83	7.29	0.22	2.1	3
20	14	12.4	21	29	79	7.08	0.03	0.09	6
30	1.1	13.9	21	27	84	7.01	0.03	0.05	10
40	1	13	20	27	83	7	0.02	0.04	12

Fuente. El autor

Tabla 34. Características del agua clarificada utilizando PAC3. Relación 20/80

ppm3	NTU3	Color3	Alk3	Dur3	K3	pH3	Al3	Fe3	%Lodo3
10	44.9	414	20.8	30	69.3	7.18	0.13	2.16	1
20	1.49	27	17.8	26	92	7.32	0.03	0.16	9
30	0.94	23	15.8	26	116	7.3	0.05	0.14	12
40	3.47	42	16	26	131	7.33	0.06	0.18	14
10	37	38	26.4	34	93.1	7.42	0.16	2.19	2
20	1.6	33	24	34	94.3	7.39	0.07	0.09	10
30	0.94	30	24.2	36	89.6	7.36	0.04	0.05	13
40	1.7	30	24	36	91.4	7.36	0.04	0.05	15
10	36.3	397	21.1	35	71.3	7.2	0.16	2.21	2
20	1.2	22	19.8	29	69.4	7.3	0.09	0.13	7
30	0.97	20	19.4	25	70.6	7.3	0.07	0.11	14
40	1.4	23	20.3	27	70	7.4	0.07	0.1	18
10	54.3	153	22	31	97	7.23	0.11	1.31	3
20	1.6	29	17	28	84	7.11	0.09	0.11	6
30	1.1	23	16	26	80	7.04	0.04	0.03	9
40	1.1	30	16	24	79	7	0.03	0.02	14
10	84	171	25	33	68	7.16	0.12	2.03	3
20	9	11.7	24	28	71	7.03	0.08	0.1	7
30	1.2	10.4	24	27	69	7.01	0.06	0.06	9
40	1	10.4	23	28	70	6.98	0.04	0.04	14

Fuente. El autor

Relación 30/70

Tabla 35. Características del agua cruda. Relación 30/70

Semana	NTU	Color	Alk	Dur	K	pH	Fe
1	295	1229	31	34	102	7	3.21
2	249	2090	28	34	87	7.1	4.74
3	122	1201	29	34	84.7	6.9	4.7
4	110	1071	34	36	88	7	3
5	120	965	34	30	82	7	4

Fuente. El autor

Tabla 36. Características del agua clarificada utilizando sulfato de aluminio líquido tipo B. Relación 30/70

Semana	Dosis óptima	NTU	Color	Alk	Dur	K	pH	Al	Fe	%Lodo
1	120	3.2	53.0	10.5	30	102	5.8	0.16	0.18	15.8
2		3.5	28.0	9.0	32	91	5.7	0.18	0.20	16.3
3		5.5	48.0	5.0	33	86	5.4	0.16	0.30	15.6
4		3.2	22	7.5	35	86	5.7	0.12	0.16	16.1
5		5.4	41.0	7.0	30	83	5.4	0.15	0.24	15.7

Fuente. El autor

Tabla 37. Características del agua clarificada utilizando PAC1. Relación 30/70

ppm1	NTU1	Color1	Alk1	Dur1	K1	pH1	Al1	Fe1	%Lodo1
10	10.4	146	26.4	32	91.9	7.53	0.09	0.45	5
20	1.02	31	24	32	103.6	7.33	0.03	0.06	7
30	0.79	27	24	32	127.3	7.24	0.03	0.03	9
40	1.16	24	21.6	34	158.3	7.09	0.04	0.03	10
10	11.3	121	28.8	32	83.4	6.9	0.02	3.1	9
20	2.1	36	28.8	30	62.1	6.6	0.021	0.47	12
30	1.7	29	26.4	34	71.7	6.6	0.033	0.53	11
40	4	51	26.4	34	79.8	6.8	0.016	0.5	14
10	45	526	24	36	85	7.5	0.44	2.35	3
20	4.6	78	19	36	40	7.5	0.05	0.38	11
30	3.3	52	24	38	41	7.4	0.05	0.26	13
40	5.3	80	22	36	38	7.3	0.11	0.41	12
10	33	357	26	26	80	6.8	0.24	1.4	3
20	1.7	32	24	28	90	6.9	0.05	0.12	10
30	2.8	21	24	30	92	7	0.16	0.1	10
40	11.1	15	22	26	94	7	0.33	0.41	13

Fuente. El autor

Tabla 38. Características del agua clarificada utilizando PAC2. Relación 30/70

ppm2	NTU2	Color2	Alk2	Dur2	K2	pH2	Al2	Fe2	%Lodo2
10	68	430	31	36	105	8.5	0.18	1.8	3
20	4.9	58	29	36	112	8.2	0.1	0.17	7
30	2.2	31	29	38	119	8	0.07	0.07	10
40	1.9	20	29	42	126	7.8	0.09	0.07	13
10	33.3	392	29	36	97	7.42	0.15	1.2	3
20	2.8	62	24	38	106	7.3	0.07	0.18	9
30	1.51	33	24	40	132.6	7.23	0.04	0.05	14
40	1.15	22	24	44	160	7.16	0.04	0.05	12
10	48.6	359	28.8	30	86.6	7	0.31	2.67	3
20	3.7	74	24	28	89	7.1	0.06	0.51	8
30	1.5	43	24	30	91	7	0.05	0.32	9
40	2	59	24	34	94	7	0.07	0.35	12
10	50	525	24	32	99	7.8	0.31	2.33	5
20	7.8	115	24	28	42	7.9	0.16	0.38	11
30	2.5	46	24	30	31	7.7	0.12	0.18	12
40	1.2	32	22	34	28.4	7.6	0.12	0.12	10
10	46	520	24	32	82	7.4	0.21	1.6	1
20	4	64	24	32	92	7.4	0.11	0.2	13
30	2.1	39	24	32	100	7.5	0.11	0.08	16
40	2.2	44	22	36	105	7.45	0.11	0.08	21

Fuente. El autor

Tabla 39. Características del agua clarificada utilizando PAC3. Relación 30/70

ppm	NTU3	Color3	Alk3	Dur3	K3	pH3	Al3	Fe3	%Lodo3
10	79	30	31	34	95	9.2	0.45	1.95	6
20	3.7	25	24	32	98	8.2	0.35	0.19	9
30	3.4	120	26	32	99	7.9	0.16	0.13	8
40	2.2	376	24	30	102	7.6	0.36	0.15	5
10	1.7	34	26.4	34	90.7	6.98	0.05	0.09	7
20	1.16	22	24	32	106.5	7.02	0.03	0.06	10
30	9.31	116	21.6	32	135.5	6.98	0.198	0.37	14
40	33.6	398	21.6	32	154.6	6.92	0.469	1.03	10
10	5	76	28.8	30	92.5	7	0.05	0.35	8
20	1.7	33	24	34	86.1	7.4	0.06	0.1	10
30	4.4	71	24	32	87.9	7.4	0.05	0.42	12
40	31	403	29.2	30	93.7	7.4	0.057	0.71	8
10	5.5	91	24	30	88	7.7	0.12	0.26	7
20	4.9	68	22	30	40	7.4	0.11	0.24	10
30	20.5	253	22	30	32	7.2	0.47	1.14	8
40	41.5	499	22	28	29	7.1	0.81	1.92	3
10	1.7	38	22	34	68	7.2	0.03	0.07	8
20	1.5	43	22	32	43	7.3	0.09	0.09	12
30	13.4	187	17	30	32	7.3	0.31	0.64	10
40	30	367	19	30	29	7.3	0.5	1.06	6

Fuente. El autor

Relación 40/60

Tabla 40. Características del agua cruda. Relación 40/60

Semana	NTU	Color	Alk	Dur	K	pH	Fe
1	212	1462	33.6	34	101	7.7	3.2
2	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato
3	129	1116	33.6	32	95.2	7.5	2.2
4	147	1210	33.6	40	106.9	7.7	2.37
5	158	1044	31.2	32	92.1	7.7	2.71

Fuente. El autor

Tabla 41. Características del agua clarificada utilizando sulfato de aluminio líquido tipo B. Relación 40/60

Semana	Dosis óptima	NTU	Color	Alk	Dur	K	pH	Al	Fe	%Lodo
1	120	4.5	23	10	33	104	6.05	0.09	0.13	18
2		Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato
3		13	143	10	39	94	5.7	0.15	0.22	18.3
4		3.85	32	12	32	105	5.8	0.13	0.17	17.9
5		3.2	32.5	12	33	95	5.9	0.1	0.16	18.3

Fuente. El autor

Tabla 42. Características del agua clarificada utilizando PAC1. Relación 40/60

ppm1	NTU1	Color1	Alk1	Dur1	K1	pH1	Al1	Fe1	%Lodo1
10	79	30	31	34	95	9.2	0.45	1.95	6
20	3.7	25	24	32	98	8.2	0.35	0.19	9
30	3.4	120	26	32	99	7.9	0.16	0.13	8
40	2.2	376	24	30	102	7.6	0.36	0.15	5
10	1.7	34	26.4	34	90.7	6.98	0.05	0.09	7
20	1.16	22	24	32	106.5	7.02	0.03	0.06	10
30	9.31	116	21.6	32	135.5	6.98	0.198	0.37	14
40	33.6	398	21.6	32	154.6	6.92	0.469	1.03	10
10	5	76	28.8	30	92.5	7	0.05	0.35	8
20	1.7	33	24	34	86.1	7.4	0.06	0.1	10
30	4.4	71	24	32	87.9	7.4	0.05	0.42	12
40	31	403	29.2	30	93.7	7.4	0.057	0.71	8
10	5.5	91	24	30	88	7.7	0.12	0.26	7
20	4.9	68	22	30	40	7.4	0.11	0.24	10
30	20.5	253	22	30	32	7.2	0.47	1.14	8
40	41.5	499	22	28	29	7.1	0.81	1.92	3
10	1.7	38	22	34	68	7.2	0.03	0.07	8
20	1.5	43	22	32	43	7.3	0.09	0.09	12
30	13.4	187	17	30	32	7.3	0.31	0.64	10
40	30	367	19	30	29	7.3	0.5	1.06	6

Fuente. El autor

Tabla 43. Características del agua clarificada utilizando PAC2. Relación 40/60

ppm2	NTU2	Color2	Alk2	Dur2	K2	pH2	Al2	Fe2	%Lodo2
10	35.2	341	33.6	32	100	7.4	0.13	0.94	11
20	3.6	29	24	34	106	7.4	0.04	0.12	8
30	3.8	13	26.4	40	114	7.5	0.05	0.07	8
40	3.7	17	31.2	48	125	7.5	0.05	0.07	4
10	20.9	222	31.2	36	98.5	7.4	0.12	0.7	6
20	3.1	32	31.2	36	103.1	7.3	0.04	0.12	5
30	2.3	20	28.8	40	110	7.2	0.08	0.1	5
40	2.7	23	26.4	40	121	7.6	0.1	0.17	7
10	16.3	171	28.8	38	110	7.4	0.15	0.63	9
20	2.6	33	28.8	34	117	7.4	0.04	0.09	6
30	2.4	44	26.4	34	119.6	7.2	0.06	0.09	5
40	2.9	48	26.4	40	132	7.3	0.09	0.05	8
10	16.4	150	28.4	32	100	7.4	0.08	0.61	10
20	5.1	44	28.4	36	107	7.5	0.07	0.1	7
30	4.2	53	24	38	114	7.5	0.05	0.06	8
40	6	29	26.4	40	122.6	7.3	0.07	0.1	10

Fuente. El autor

Tabla 44. Características del agua clarificada utilizando PAC3. Relación 40/60

ppm3	NTU3	Color3	Alk3	Dur3	K3	pH3	Al3	Fe3	%Lodo3
10	2.7	30	24	28	94	7.2	0.021	0.1	9
20	5.6	48	28.8	30	97.5	7.3	0.078	0.16	8
30	34.7	326	31.2	34	101.5	7.3	0.29	0.26	5
40	88	808	31.2	34	104.5	7.1	0.53	0.69	2
10	6.7	68	26.4	32	95.3	7.4	0.08	0.11	6
20	8.7	80	28.8	34	97.5	7.4	0.14	0.29	5
30	35.6	380	28.8	34	100	7.1	0.22	0.97	5
40	69	722	28.8	34	102.3	7.1	0.77	1.33	3
10	4	33	28.8	36	107.4	7.1	0.09	0.11	10
20	8.4	108	28.8	38	114.5	7.4	0.24	0.45	8
30	44.5	482	31.2	40	114.8	7.4	0.53	1.08	7
40	82	830	31.2	40	117	7	0.88	1.5	7
10	5.8	67	28.8	30	106	7.3	0.08	0.1	11
20	7.6	83	28.6	30	110	7.4	0.19	0.39	8
30	39.4	442	28.8	32	112.7	7.5	0.17	0.98	6
40	78.8	823	31.2	32	117.4	7.2	0.83	1.36	6

Fuente. El autor

Relación 50/50

Tabla 45. Características del agua cruda. Relación 50/50

Semana	NTU	Color	Alk	Dur	K	pH	Fe
1	197	1218	38	50	116	7.5	2.94
2	243	1539	36	42	116	7.88	2.59
3	211	1167	38	40	110	7.5	2.8
4	285	1806	38.4	50	132	7.8	3.69
5	427	3332	38	36	99.7	7.6	5.64

Fuente. El autor

Tabla 46. Características del agua clarificada utilizando sulfato de aluminio líquido tipo B. Relación 50/50

Semana	Dosis óptima	NTU	Color	Alk	Dur	K	pH	Al	Fe	%Lodo
1	130	1.7	13	23	53	118	6.4	0.11	0.1	20
2		2.6	10	21	37	115	6.6	0.1	0.1	20.9
3		2	38	21	39	116	6.4	0.12	0.08	21.4
4		2.25	17.5	22	42	128	5.45	0.15	0.13	22
5		1.2	26	23	34	102	5.95	0.12	0.12	20.4

Fuente. El autor

Tabla 47. Características del agua clarificada utilizando PAC1. Relación 50/50

ppm1	NTU1	Color1	Alk1	Dur1	K1	pH1	Al1	Fe1	%Lodo1
10	3	42	33	42	121	7.74	0.04	0.1	2
20	2.2	29	33	44	122	7.65	0.03	0.14	6
30	2	29	31	44	126	7.53	0.03	0.13	7
40	6.3	60	29	44	125	7.45	0.1	0.3	8
10	3.6	48	33	44	117	7.51	0.1	0.12	3
20	2.5	31	31	42	119	7.55	0.06	0.07	5
30	1.16	25	26	42	124	7.52	0.08	0.05	7
40	6.1	55	29	42	124	7.48	0.13	0.14	8
10	9.4	77	29	38	118	7.16	0.07	0.19	4
20	2.6	46	29	38	46	7.26	0.06	0.04	6
30	2.8	40	29	30	33	7.28	0.05	0.04	9
40	8.6	77	26	36	29	7.2	0.22	0.2	10
10	6.5	60	38.4	46	127	7.9	0.08	0.23	6
20	2.8	20	36	44	129	7.9	0.04	0.05	8
30	4.2	24	31	46	130	8	0.04	0.06	9
40	4.9	37	31	46	134	8.1	0.07	0.06	10
10	17.2	81	28.8	36	99.6	7.7	0.07	0.37	9
20	7.6	30	31	36	102	7.7	0.05	0.07	10
30	5.2	44	31	36	105	7.7	0.04	0.06	10
40	7.3	43	28.8	36	109	7.5	0.14	0.21	11

Fuente. El autor

Tabla 48. Características del agua clarificada utilizando PAC2. Relación 50/50

ppm2	NTU2	Color2	Alk2	Dur2	K2	pH2	Al2	Fe2	%Lodo2
10	5.2	64	33	48	128	7.64	0.07	0.3	2
20	2.5	35	31	48	132	7.53	0.06	0.09	6
30	2	30	31	52	139	7.52	0.06	0.07	7
40	2.9	34	29	50	140	7.43	0.06	0.07	9
10	9.3	102	33	42	117	7.71	0.08	0.3	2
20	2.2	40	31	44	124	7.66	0.05	0.06	5
30	1.2	38	31	48	131	7.63	0.05	0.03	8
40	2.56	22	26	52	142	7.59	0.05	0.06	9
10	19.5	171	29	40	115	8.4	0.09	0.31	4
20	12.3	127	31	44	121	7.7	0.08	0.08	8
30	2.5	51	29	44	127	7.7	0.05	0.03	8
40	1.9	36	29	56	134	7.6	0.06	0.03	10
10	16.6	187	38.4	44	132	7.9	0.13	0.64	3
20	2.1	57	36	48	139	7.8	0.08	0.09	7
30	2	31	36	50	146	7.8	0.07	0.12	8
40	1.7	23	33.6	54	154	7.8	0.07	0.06	10
10	40.1	226	36	40	107	8.1	0.1	0.85	6
20	4.9	23	31.2	40	112	7.9	0.05	0.15	10
30	3.5	28	31.2	46	119	7.8	0.04	0.05	12
40	3.1	22	31.2	44	128	7.7	0.04	0.06	10

Fuente. El autor

Tabla 49. Características del agua clarificada utilizando PAC3. Relación 50/50

ppm3	NTU3	Color3	Alk3	Dur3	K3	pH3	Al3	Fe3	%Lodo3
10	3.4	75	33	48	110	7.62	0.05	0.25	2
20	2.1	46	31	46	110	7.84	0.05	0.12	5
30	1.16	47	33	46	110.5	7.8	0.04	0.23	6
40	1.77	34	31	44	116	7.74	0.06	0.07	8
10	6.15	85	33	40	114	7.55	0.07	0.23	3
20	2.2	46	31	42	116	7.67	0.05	0.06	6
30	2.3	42	29	42	118	7.66	0.05	0.06	7
40	1.65	30	31	42	119	7.62	0.05	0.05	8
10	5.3	55	29	40	110	8.2	0.23	0.12	2
20	3	51	33.6	38	111	8.1	0.39	0.09	5
30	8	79	31	38	113	8	0.36	0.16	7
40	12.7	128	30	42	115	7.9	1.01	0.41	6
10	5.4	47	38.4	44	127	7.2	0.11	0.18	5
20	3.6	30	36	46	131	7.5	0.07	0.06	8
30	3.2	23	36	46	132	7.5	0.09	0.1	8
40	4.3	67	33.6	46	132	7.4	0.15	0.22	9
10	13.6	76	36	38	100	8	0.09	0.38	8
20	6.2	40	33.6	38	103	7.9	0.06	0.12	11
30	6.7	35	33.6	36	105	7.8	0.07	0.28	11
40	23.7	191	31.2	36	107	7.7	0.13	0.7	9

Fuente. El autor

Relación 70/30

Tabla 50. Características del agua cruda. Relación 70/30

Semana	NTU	Color	Alk	Dur	K	pH	Fe
1	220	1300	35	45	125	7.8	3.4
2	283	1612	37	40	132	7.8	3.31
3	211	1167	38	40	110	7.7	2.72
4	312	1769	39	48	141	7.8	2.98
5	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato

Fuente. El autor

Tabla 51. Características del agua clarificada utilizando sulfato de aluminio líquido tipo B. Relación 70/30

Semana	Dosis óptima	NTU	Color	Alk	Dur	K	pH	Al	Fe	%Lodo
1	150	2.9	16.5	9	36	128	6	0.11	0.13	32
2		3.5	20.5	9	35	129	6.15	0.14	0.14	33.8
3		3.5	31	9	38	108	5.7	0.12	0.15	32.2
4		6.15	61.5	8	43	138	5.9	0.12	0.20	33.1
5		Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato

Fuente. El autor

Tabla 52. Características del agua clarificada utilizando PAC1. Relación 70/30

ppm1	NTU1	Color1	Alk1	Dur1	K1	pH1	Al1	Fe1	%Lodo1
10	4	42	30	42	120	7.6	0.03	0.12	3
20	3	29	28	42	122	7.6	0.03	0.13	5
30	3	29	29	41	120	7.6	0.03	0.12	7
40	5	60	29	41	122	7.5	0.12	0.2	7
10	3	45	32	44	128	7.6	0.05	0.12	4
20	3	30	32	42	124	7.6	0.04	0.12	4
30	2	28	33	42	125	7.5	0.03	0.09	5
40	4	46	31	42	126	7.6	0.04	0.1	7
10	9.4	77	29	38	118	7.6	0.07	0.19	4
20	2.6	46	29	38	46	7.5	0.06	0.04	6
30	2.8	40	29	30	33	7.6	0.05	0.04	9
40	8.6	77	26	36	29	7.5	0.22	0.2	10
10	4	65	35	41	131	7.7	0.07	0.17	8
20	5	56	34	42	130	7.7	0.06	0.22	7
30	5.2	55	34	43	130	7.7	0.04	0.12	9
40	6	54	34	44	131	7.5	0.09	0.22	8

Fuente. El autor

Tabla 53. Características del agua clarificada utilizando PAC2. Relación 70/30

ppm2	NTU2	Color2	Alk2	Dur2	K2	pH2	Al2	Fe2	%Lodo2
10	5	60	32	44	126	7.6	0.05	0.21	3
20	2	30	31	44	128	7.56	0.05	0.14	7
30	3	32	30	45	129	7.5	0.06	0.12	6
40	4	32	27	48	127	7.48	0.06	0.17	8
10	4	59	32	42	122	7.6	0.07	0.23	2
20	5	44	33	40	124	7.6	0.05	0.05	4
30	3	40	31	41	123	7.6	0.04	0.06	6
40	3	43	32	42	122	7.6	0.14	0.06	5
10	5	55	29	40	115	8.4	0.09	0.12	4
20	5	45	31	44	121	7.7	0.08	0.02	8
30	4	46	29	44	127	7.7	0.05	0.06	8
40	5	55	29	56	134	7.6	0.06	0.05	10
10	5	57	35	44	107	8.1	0.1	0.13	7
20	6	65	34	42	112	7.9	0.05	0.09	8
30	3	58	33	46	119	7.8	0.04	0.08	11
40	4	60	34	44	128	7.7	0.04	0.06	12

Fuente. El autor

Tabla 54. Características del agua clarificada utilizando PAC3. Relación 70/30

ppm3	NTU3	Color3	Alk3	Dur3	K3	pH3	Al3	Fe3	%Lodo3
10	3.3	80	31	47	120	7.5	0.07	0.21	3
20	2	47	32	44	119	7.6	0.08	0.17	6
30	2.1	43	33	45	119	7.5	0.09	0.15	7
40	2.4	45	30	43	118	7.5	0.08	0.13	7
10	4	55	31	43	127	7.6	0.06	0.13	5
20	2	45	32	41	125	7.6	0.08	0.17	6
30	3	48	33	41	124	7.5	0.07	0.17	8
40	3	45	32	40	127	7.6	0.06	0.18	9
10	4	55	32	40	110	7.6	0.12	0.12	6
20	4	50	34	38	111	7.5	0.07	0.09	5
30	4	57	33	38	113	7.6	0.08	0.15	7
40	5	62	34	42	115	7.5	0.12	0.16	9
10	6	65	34	38	125	7.5	0.08	0.23	6
20	5	63	33	38	125	7.6	0.08	0.15	8
30	6	58	34	36	123	7.6	0.09	0.17	9
40	5	80	35	36	124	7.7	0.12	0.22	9

Fuente. El autor

Relación 100/0

Tabla 55. Características del agua cruda. Relación 100/0

Semana	NTU	Color	Alk	Dur	K	pH	Fe
1	347	1800	45	50	150	7.7	3.6
2	516	2750	50	55	220	7.6	3.45
3	456	2345	47	51	198	7.7	3.72
4	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato
5	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato

Fuente. El autor

Tabla 56. Características del agua clarificada utilizando sulfato de aluminio líquido tipo B. Relación 100/0

Semana	Dosis óptima	NTU	Color	Alk	Dur	K	pH	Al	Fe	%Lodo	
1	180	4.1	43.5	8.5	55	157	5.6	0.17	0.22	35.6	
2		8.5	71	20	58	240	6.0	0.12	0.21	36.4	
3		6.1	49	24	53	204	6.3	0.11	0.18	35.1	
4		Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato
5		Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato

Fuente. El autor

Tabla 57. Características del agua clarificada utilizando PAC1. Relación 100/0

ppm1	NTU1	Color1	Alk1	Dur1	K1	pH1	Al1	Fe1	%Lodo1
10	15	300	43	45	145	7.5	0.22	0.34	5
20	5	180	41	43	134	7.5	0.19	0.22	7
30	6	200	43	45	135	7.6	0.12	0.25	8
40	6	148	42	43	129	7.5	0.13	0.16	12
10	12	400	45	43	145	7.5	0.11	0.22	9
20	4	312	43	44	144	7.5	0.09	0.15	8
30	5	298	45	42	143	7.4	0.14	0.16	9
40	7	300	45	43	142	7.3	0.3	0.12	10
10	9	62	46	44	145	7.5	0.08	0.12	10
20	4	35	47	43	146	7.5	0.09	0.08	9
30	5	26	43	44	147	7.4	0.11	0.06	9
40	6	80	44	45	145	7.5	0.19	0.12	12

Fuente. El autor

Tabla 58. Características del agua clarificada utilizando PAC2. Relación 100/0

ppm2	NTU2	Color2	Alk2	Dur2	K2	pH2	Al2	Fe2	%Lodo2
10	22	370	42	43	154	7.6	0.11	0.6	12
20	5	321	43	42	135	7.5	0.04	0.12	11
30	5	342	43	43	142	7.5	0.09	0.1	12
40	6	324	42	48	149	7.5	0.1	0.14	10
10	11	389	43	43	156	7.5	0.08	0.23	10
20	7	356	45	45	155	7.5	0.07	0.18	7
30	6	370	44	45	153	7.5	0.05	0.22	8
40	6	345	45	43	161	7.5	0.07	0.12	10
10	20.9	322	43	45	146	7.5	0.11	0.34	11
20	3.1	356	44	43	147	7.6	0.09	0.4	12
30	2.3	321	45	45	147	7.5	0.09	0.23	10
40	2.7	360	43	43	145	7.6	0.12	0.19	11

Fuente. El autor

Tabla 59. Características del agua clarificada utilizando PAC3. Relación 100/0

ppm3	NTU3	Color3	Alk3	Dur3	K3	pH3	Al3	Fe3	%Lodo3
10	14	390	43	42	155	7.5	0.08	0.34	11
20	6	388	44	41	165	7.6	0.13	0.23	10
30	7	345	42	42	170	7.5	0.15	0.33	9
40	6	387	44	48	169	7.6	0.11	0.45	11
10	12	410	43	45	160	7.5	0.09	0.13	11
20	7	389	44	44	154	7.6	0.12	0.23	11
30	6	442	44	48	161	7.5	0.12	0.12	11
40	6	400	45	48	154	7.6	0.09	0.12	13
10	6.7	415	44	44	171	7.5	0.14	0.11	12
20	8.7	389	43	45	167	7.6	0.08	0.22	12
30	35.6	345	44	44	168	7.6	0.09	0.12	14
40	69	400	45	43	169	7.5	0.12	0.13	12

Fuente. El autor

Anexo C. Pruebas de Supuestos de Regresión Lineal. Relación 100/0

Relación 30-70

En esta sección probaremos los supuestos básicos de una regresión de mínimos cuadrados ordinarios en la en el modelo R30:

$$pmm = \beta_0 + \beta_1nut3 + \beta_2color3 + \beta_3alk3 + \beta_4dur3 + \beta_5k3 + \beta_6pH3 + \beta_7Al3 + \beta_8Fe3 + U$$

✓ Normalidad

El primer supuesto planteado en toda regresión de tipo MCO (Mínimos Cuadrados Ordinarios) es la normalidad de las variables explicativas, que básicamente propone que las variables usadas, sin importar las transformaciones matemáticas hechas para ajustar el modelo, se distribuyan de manera normal con media μ y varianza σ^2 , para probar la normalidad de las variables de control usaremos dos metodologías: la primera será una prueba de normalidad general según sesgo y curtosis, y la segunda será una prueba de tipo grafico en función del ajuste a una función normal.

✓ Prueba de normalidad:

Tabla 60. Prueba de normalidad. Relación 30/70

Skewness/Kurtosis tests for Normality						
Variable	Obs	Pr(Skewness)	Pr(Kurtosis)	joint		
				adj	chi2(2)	Prob>chi2
ntu3	20	0.0022	0.1032	9.71		0.0078
color3	20	0.0044	0.1659	8.41		0.0150
alk3	20	0.8062	0.0870	3.40		0.1825
dur3	20	0.9598	0.9904	0.00		0.9987
K3	20	0.2255	0.1393	3.96		0.1383
Ph3	20	0.0005	0.0025	15.45		0.0004
Al3	20	0.0207	0.1696	6.54		0.0381
Fe3	20	0.0116	0.4677	6.30		0.0429

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

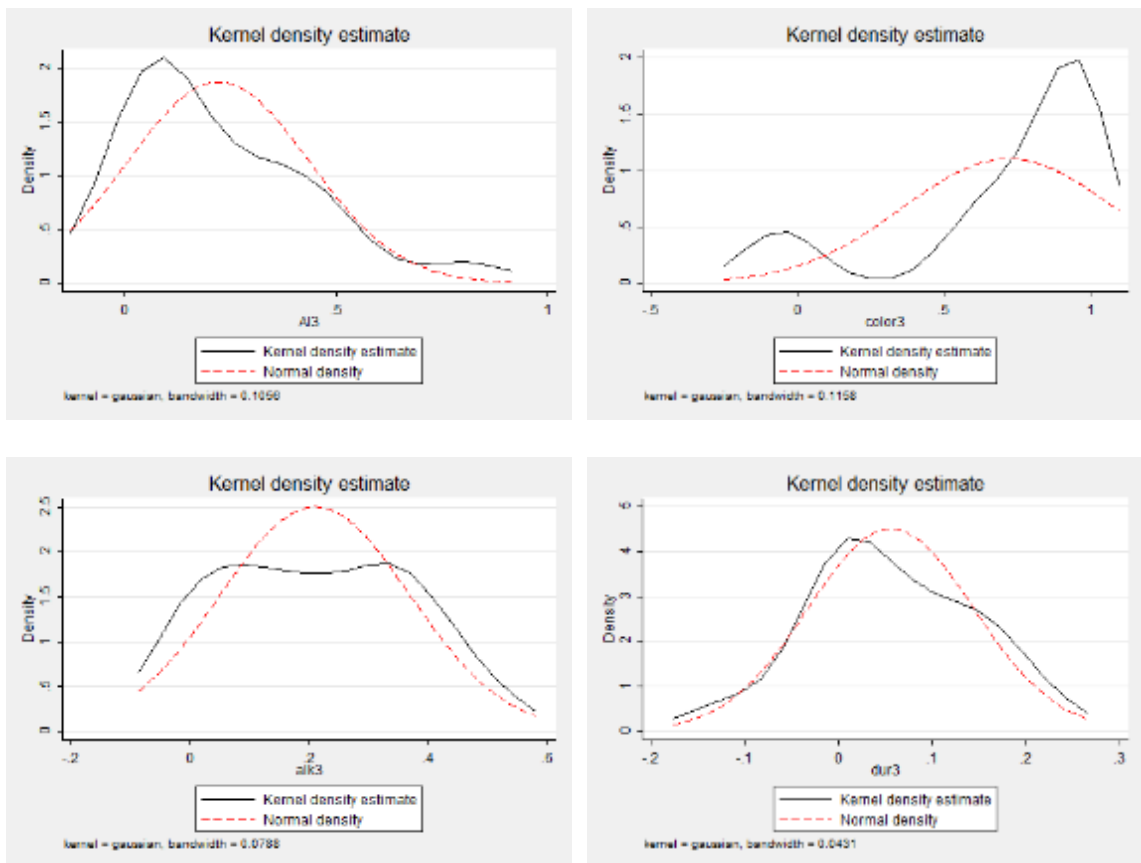
Este tipo de prueba normalidad consta de 3 partes, la primera es una medición de la simetría, en donde se analiza si existe mucha diferencia entre la cantidad de

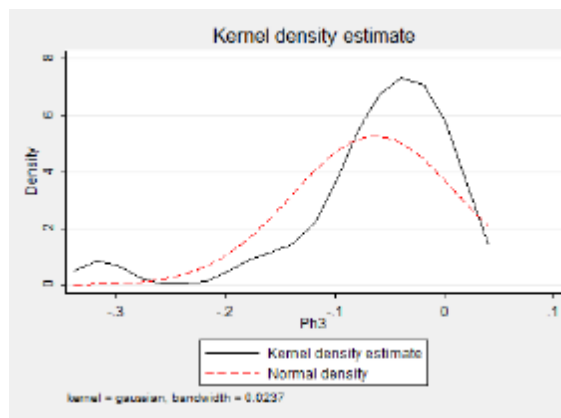
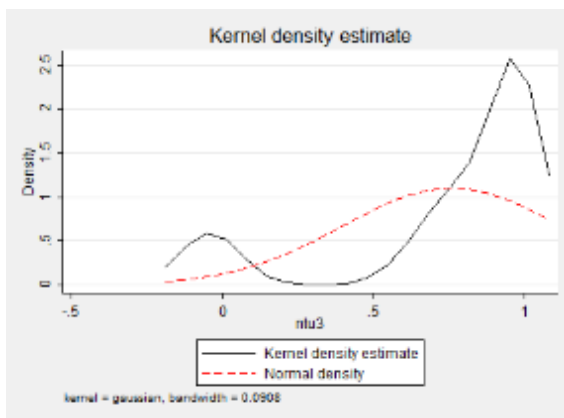
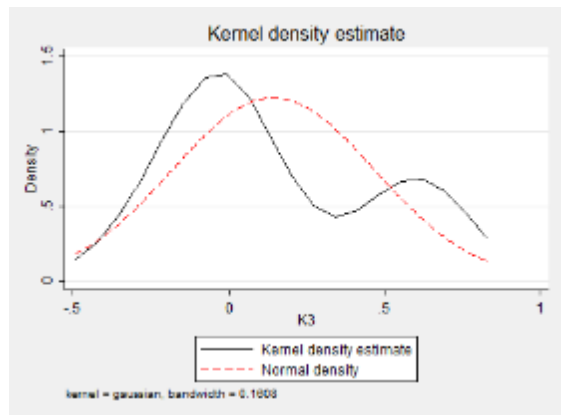
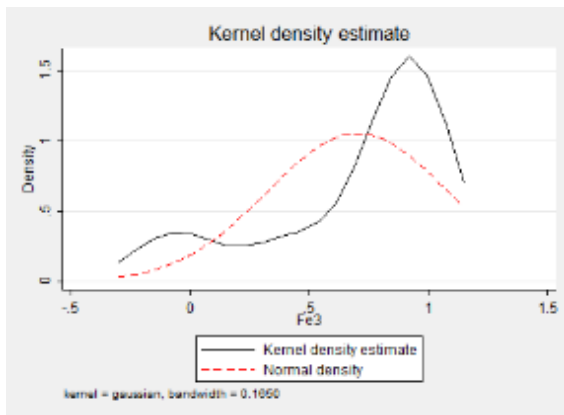
datos que se acumulan en la cola izquierda de la función con respecto a la derecha. También analizamos la curtosis, en donde se mide el peso relativo de las colas. Con estos dos indicadores como parámetros de control este test lo que hace es crear una prueba de hipótesis en donde se analiza si la variable utilizada puede asumirse como normal.

Como resultado tenemos que en este caso específico, solo las variables dur3, alk3 y k3 poseen estricta normalidad, además la variable Fe3 está muy cerca de ser normal.

✓ **Pruebas gráficas:**

Grafica 11. La forma funcional.



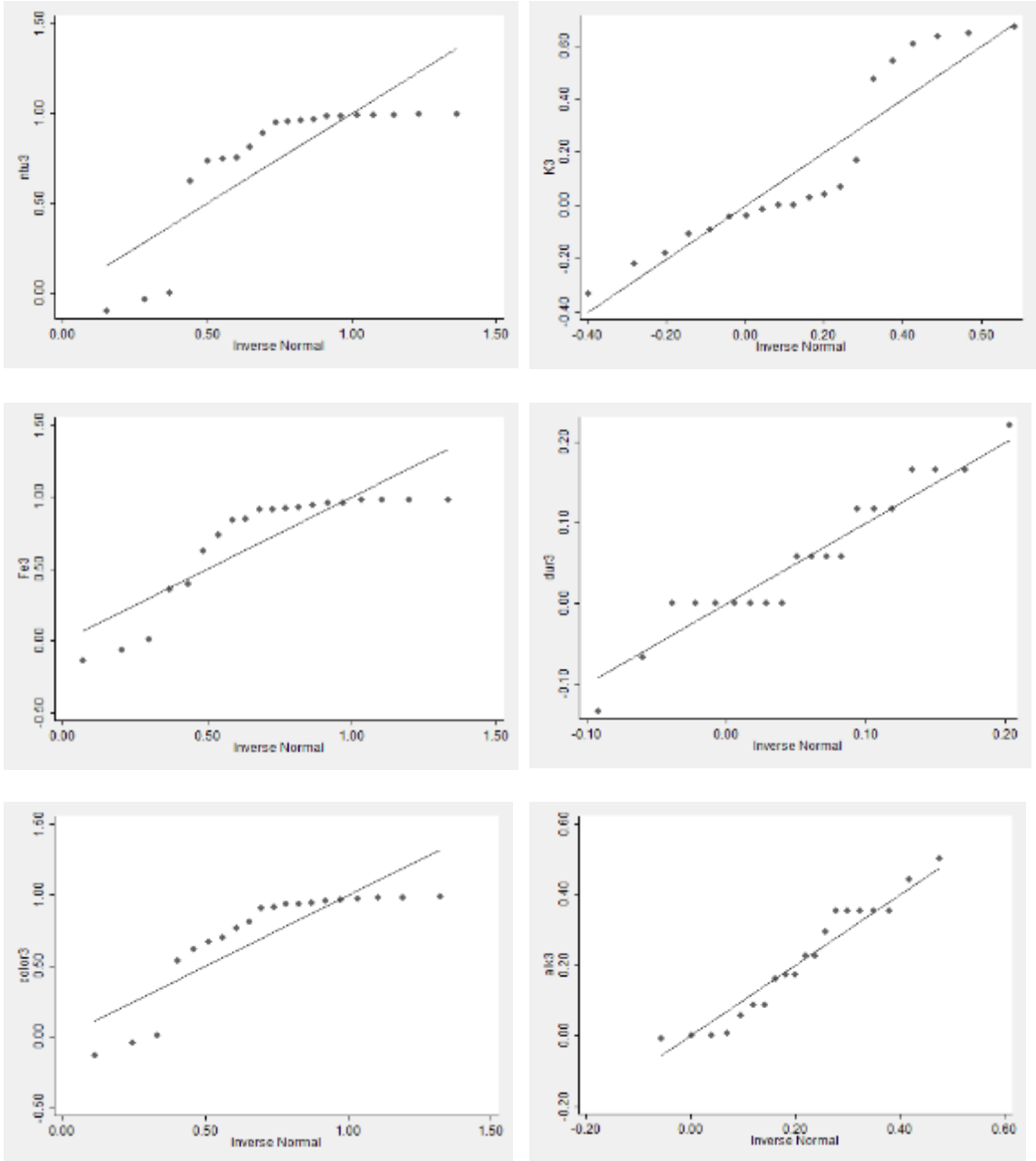


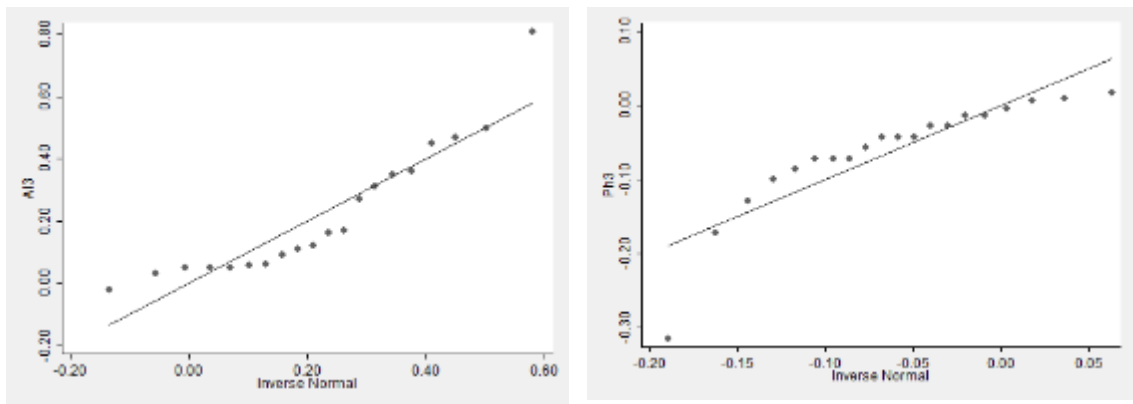
Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Por definición, la forma funcional de toda distribución normal tiende a asemejarse a una campana simétrica asintótica a 0. En este análisis podemos ver un cierto nivel de ajuste en las variables AI3 alk3 dur3 y a pesar del sesgo existente en Ph3 no está demasiado lejos de asemejarse a una distribución normal.

Otra manera gráfica de evaluar la normalidad sería ver la dispersión de los datos en contraste con el esperado de una distribución normal:

Grafica 12. La forma normal.





Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

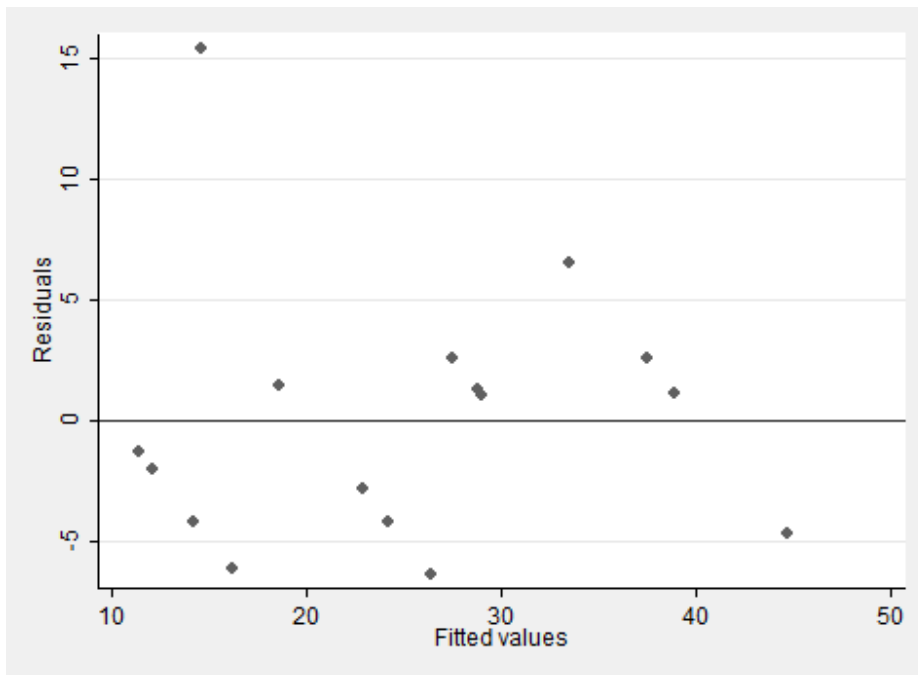
En esta evaluación, en cuanto más se ajuste la dispersión de los datos a la línea esperada, más normalidad presenta la variable, según estos gráficos existe un alto ajuste en términos de los datos y los percentiles esperados, que en conjunto con una disponibilidad de datos menor a lo planteado en el teorema del límite central y la regla empírica planteada por Ronald Fisher, que plantea la posibilidad de asumir normalidad en una función después de los 30 datos, nos lleva a no rechazar el que las variables distribuyen de manera normal.

✓ **Homocedasticidad:**

Por definición la Homocedasticidad es una propiedad que plantea que la varianza del error de una variable es constante en toda la función, esto implica que la varianza de los errores es un parámetro constante que no se ve afectada por el tiempo o cualquier otra variable de control.

En este trabajo analizaremos la Homocedasticidad general con un gráfico en el que se contrastara la varianza de los residuales con los valores ajustados:

Grafica 13. Homocedasticidad



Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Como no se percibe acumulación de observaciones en los extremos de manera progresiva, asumimos Homocedasticidad.

✓ **Colinealidad:**

En estadística la Colinealidad es un fenómeno que se caracteriza por una fuerte correlación entre las variables explicativas de tal manera que estas variables sean dependientes entre sí, en caso de presentar Colinealidad en el modelo, lo más importante es entender cuál es la variable que más peso tiene en el modelo original omitiendo las que se pueden explicadas por las de mayor peso.

En este experimento se evaluará la Colinealidad por el método de la correlación, la significancia en el modelo y el método del factor de inflación de la varianza (VIF)

$$VIF = \frac{1}{1-r_{x_1x_2}^2}.$$

Tabla 61. Colinealidad

Source	SS	df	MS	
Model	1549.7894	8	193.723675	Number of obs = 16
Residual	450.210598	7	64.3157996	F(8, 7) = 3.01
Total	2000	15	133.333333	Prob > F = 0.0820
				R-squared = 0.7749
				Adj R-squared = 0.5176
				Root MSE = 8.0197

ppm	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
ntu3	30.97569	84.38767	0.37	0.724	-168.5694	230.5208
color3	-96.62854	43.14529	-2.24	0.060	-198.6509	5.393842
alk3	-34.76315	29.26508	-1.19	0.274	-103.9641	34.43778
dur3	-40.1927	48.80378	-0.82	0.437	-155.5953	75.2099
K3	30.80822	19.43525	1.59	0.157	-15.14884	76.76528
Ph3	-52.14057	41.16563	-1.27	0.246	-149.4818	45.20069
Al3	18.56571	25.89451	0.72	0.497	-42.66508	79.7965
Fe3	47.02367	53.06537	0.89	0.405	-78.456	172.5033
_cons	37.59772	8.583444	4.38	0.003	17.30109	57.89434

Source	SS	df	MS	
Model	1549.7894	8	193.723675	Number of obs = 16
Residual	450.210598	7	64.3157996	F(8, 7) = 3.01
Total	2000	15	133.333333	Prob > F = 0.0820
				R-squared = 0.7749
				Adj R-squared = 0.5176
				Root MSE = 8.0197

ppm	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
ntu3	30.97569	84.38767	0.37	0.724	-168.5694	230.5208
color3	-96.62854	43.14529	-2.24	0.060	-198.6509	5.393842
alk3	-34.76315	29.26508	-1.19	0.274	-103.9641	34.43778
dur3	-40.1927	48.80378	-0.82	0.437	-155.5953	75.2099
K3	30.80822	19.43525	1.59	0.157	-15.14884	76.76528
Ph3	-52.14057	41.16563	-1.27	0.246	-149.4818	45.20069
Al3	18.56571	25.89451	0.72	0.497	-42.66508	79.7965
Fe3	47.02367	53.06537	0.89	0.405	-78.456	172.5033
_cons	37.59772	8.583444	4.38	0.003	17.30109	57.89434

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

En la regresión r30 al analizar el $P > |t|$ vemos que en su gran mayoría las variables son estadísticamente no significativas, esto junto con un r^2 relativamente alto, nos da el primer diagnóstico de linealidad.

✓ **Matriz de correlación**

Tabla 62. Matriz de correlación

	ntu3	color3	alk3	dur3	K3	Ph3	Al3	Fe3
ntu3	1.0000							
color3	0.9658	1.0000						
alk3	0.3797	0.2845	1.0000					
dur3	0.0692	0.0025	0.0246	1.0000				
K3	0.3733	0.3292	0.8427	0.1836	1.0000			
Ph3	-0.3230	-0.4450	0.1386	0.0012	0.0433	1.0000		
Al3	-0.0628	-0.0980	0.3612	0.3525	0.5665	-0.2057	1.0000	
Fe3	0.9654	0.9032	0.3452	-0.0004	0.2666	-0.1900	-0.2476	1.0000

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

En esta matriz de correlación se plasma el coeficiente de correlación entre las variables exógenas, en esta matriz vemos una fuerte correlación positiva entre el nivel de ntu3 y el Fe3, al igual que entre el Fe3 y el color 3, y añadido a esto la variable alk3 está fuertemente correlacionada con el valor de K3, es decir, existe una correlación fuerte en mínimo 4 de las 8 variables de control, sin embargo, es necesario realizar una prueba más por el criterio del VIF:

Tabla 63. Criterio del VIF

Variable	VIF	1/VIF
ntu3	261.03	0.003831
Fe3	110.12	0.009081
color3	67.47	0.014821
K3	7.74	0.129277
Al3	7.58	0.131852
alk3	3.50	0.285839
dur3	2.99	0.334409
Ph3	2.80	0.357427

Variable	VIF	1/VIF
ntu3	261.03	0.003831
Fe3	110.12	0.009081
color3	67.47	0.014821
K3	7.74	0.129277
Al3	7.58	0.131852
alk3	3.50	0.285839
dur3	2.99	0.334409
Ph3	2.80	0.357427

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Como era de esperarse, el VIF de ntu3, Fe3 y color 3 es mayor que 10 lo que por obligación nos plantea una Colinealidad existente en entre estas variables explicativas.

En síntesis, estos son los 3 supuestos principales a probar en una regresión de mínimos cuadrados ordinarios, en cuanto a la normalidad no se puede demostrar en algunas variables una distribución normal. El supuesto de Homocedasticidad se cumple de manera general en esta regresión, a pesar de que existe Colinealidad en la mitad de las variables explicativas.

Relación 100/0

En esta sección probaremos los supuestos básicos de una regresión de mínimos cuadrados ordinarios en la en el modelo R100:

$$ppm = \beta_0 + \beta_1nut1 + \beta_2color1 + \beta_3alk1 + \beta_4dur1 + \beta_5k1 + \beta_6pH1 + \beta_7Al1 + \beta_8Fe1 + U$$

✓ Normalidad

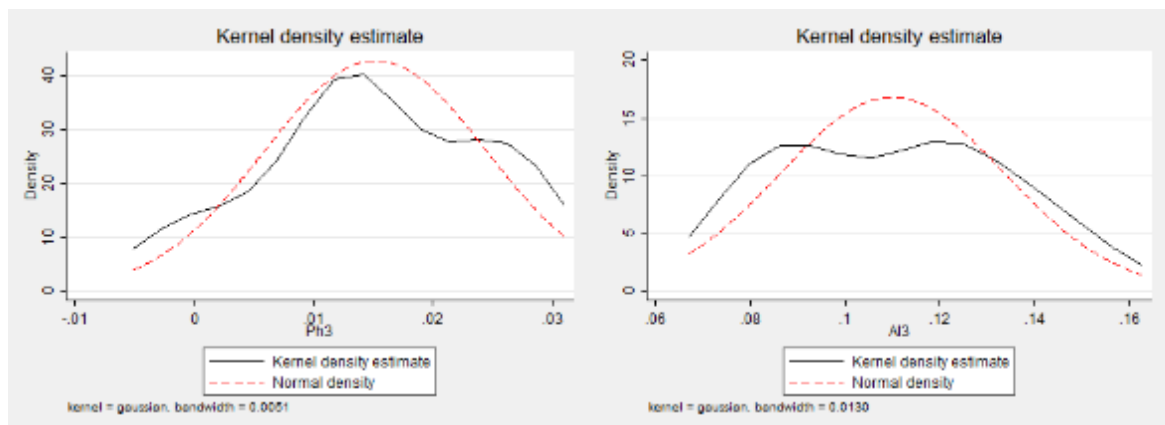
Tabla 64. Normalidad

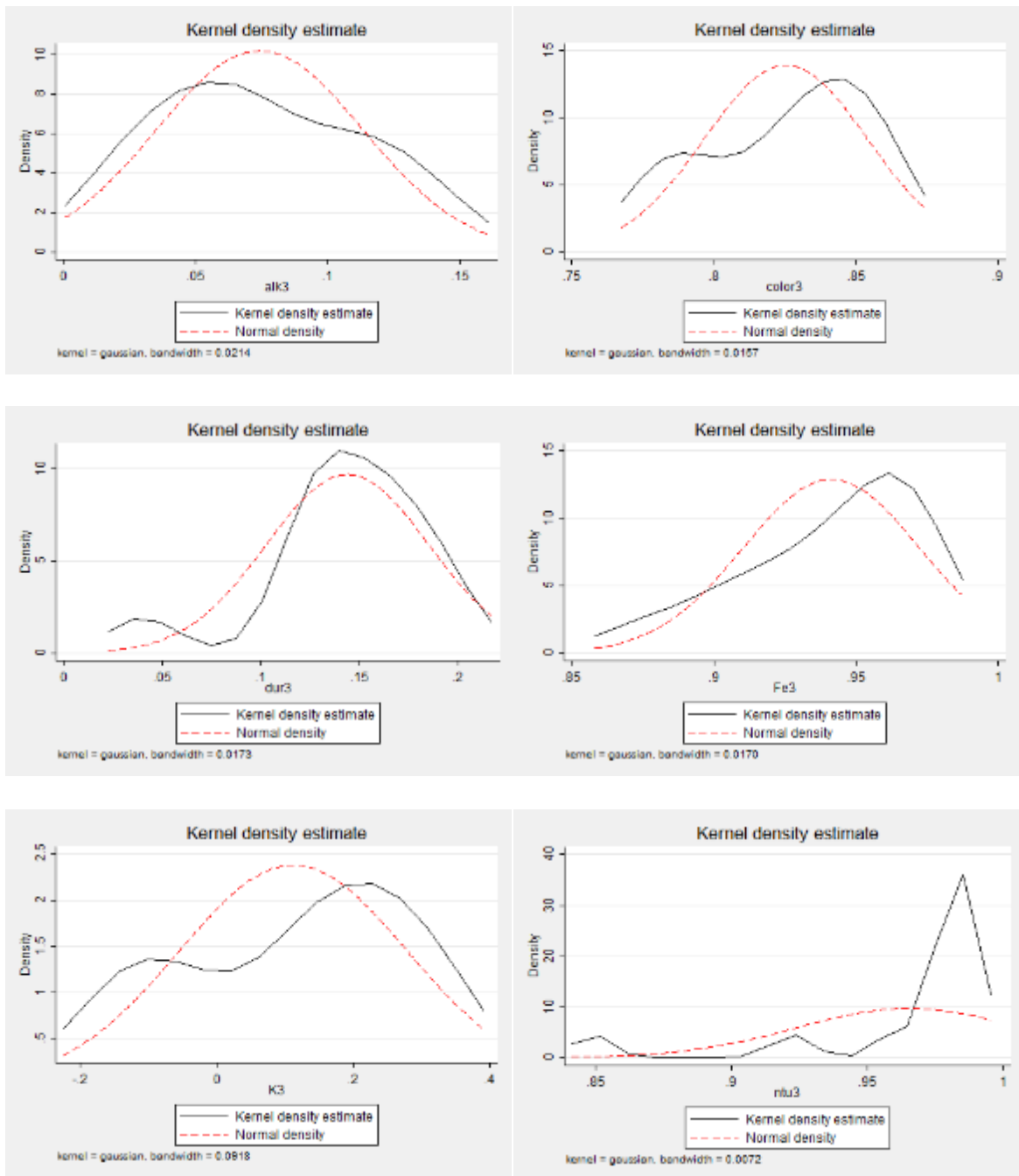
Skewness/Kurtosis tests for Normality					
Variable	Obs	Pr(Skewness)	Pr(Kurtosis)	adj chi2(2)	joint Prob>chi2
ntu1	16	0.0022	0.0324	10.79	0.0045
color1	16	0.0251	0.1995	6.12	0.0469
alk1	16	0.0554	0.3862	4.55	0.1028
dur1	16	0.9464	0.5272	0.41	0.8128
K1	16	0.0048	0.1806	8.16	0.0169
Ph1	16	0.7318	0.4284	0.80	0.6693
All	16	0.0002	0.0012	17.00	0.0002
Fe1	16	0.6328	0.1724	2.40	0.3014

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

En el análisis de normalidad en función de la simetría y la curtosis se ve que el principal problema de normalidad radica en la simetría, y que estos sesgos se pueden presentar por el número de observaciones que se tienen, aun así se tiene un criterio de normalidad relativamente significativo en la mayoría de las variables.

Grafica 14. Normalidad y curtosis

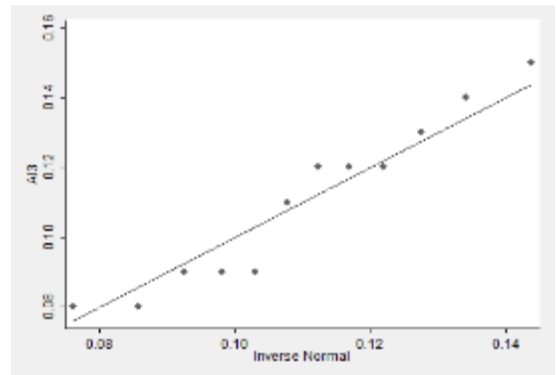
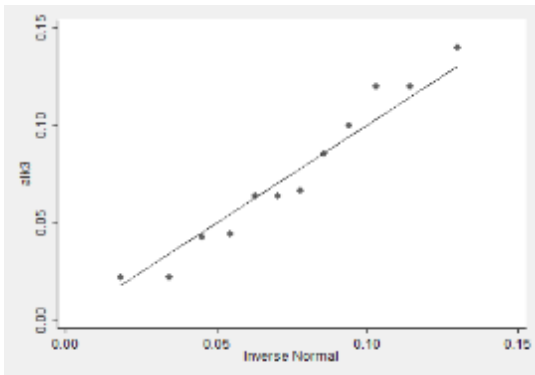
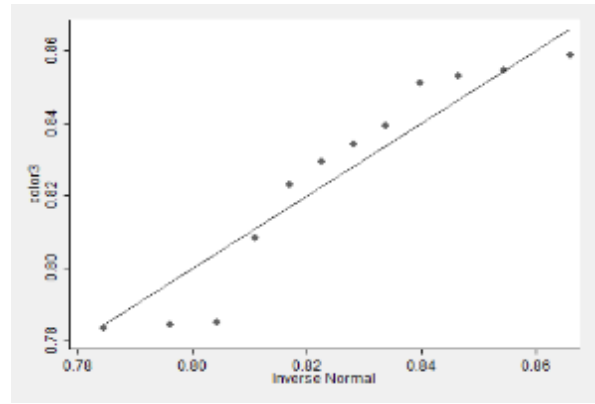
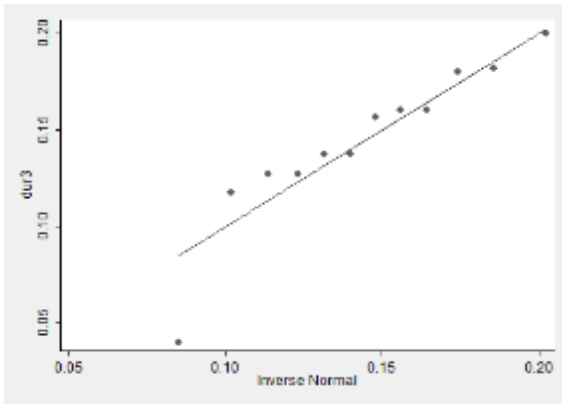
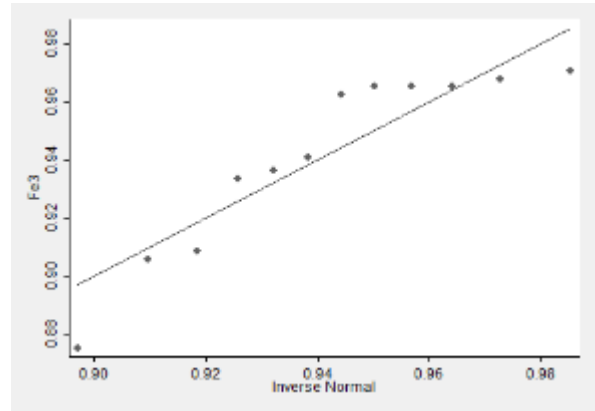
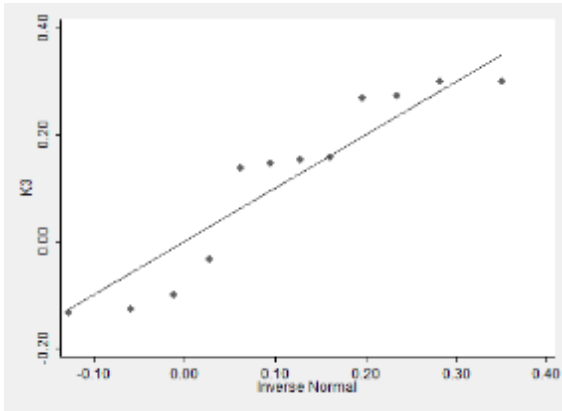


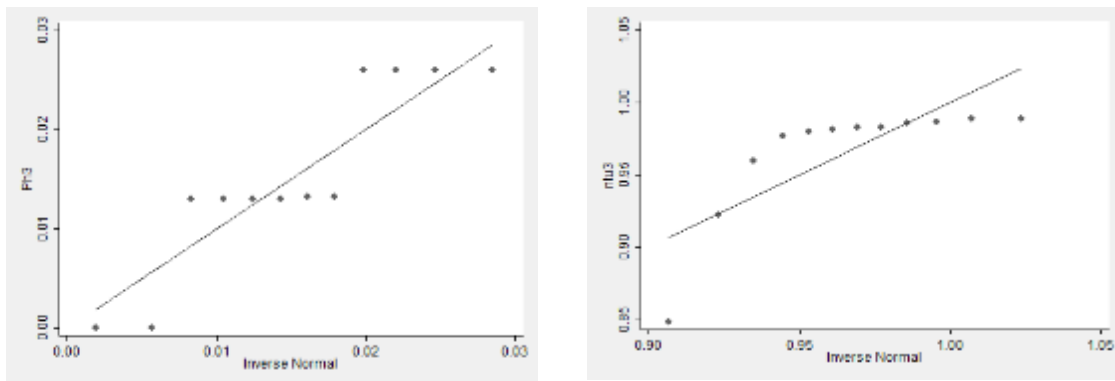


Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Al analizar la frecuencia y densidad de distribución de las variables explicativas la moda y la media tienden a igualarse dándonos una función con tendencia a ser simétrica de manera general, es descartable la normalidad.

Grafica 15. Frecuencia y densidad



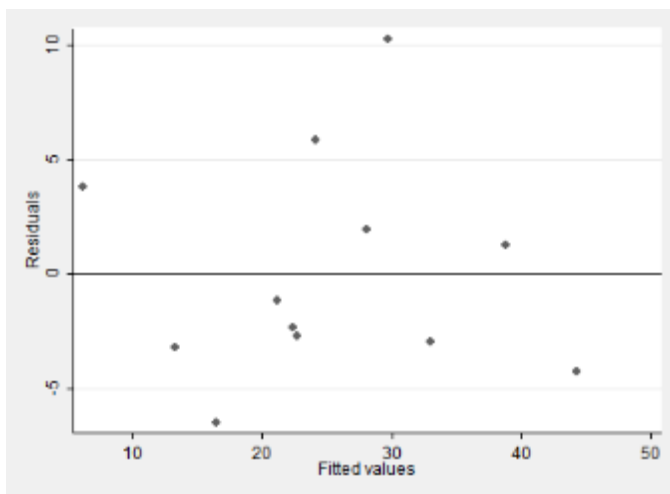


Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Nuevamente tenemos un escenario en el que el ajuste de los datos tiende a distribuir aproximadamente normal.

✓ **Homocedasticidad.** Al analizar la varianza de los errores del modelo nos encontramos con el siguiente escenario:

Figura 8. Homocedasticidad



Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Al analizar los residuales en contraste con los valores ajustados, no se puede identificar un patrón de acumulación de datos en los extremos, esto significa que no hay indicios de heterocedasticidad en este modelo.

✓ Colinealidad

Tabla 65. Colinealidad

Source	SS	df	MS			
Model	1124.31631	8	140.539538	Number of obs = 16		
Residual	875.683694	7	125.097671	F(8, 7) = 1.12		
				Prob > F = 0.4455		
				R-squared = 0.5622		
				Adj R-squared = 0.0618		
				Root MSE = 11.185		
Total	2000	15	133.333333			

ppm	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
ntu1	-1024.802	1188.865	-0.86	0.417	-3836.021	1786.416
color1	929.1044	712.2654	1.30	0.233	-755.1358	2613.345
alk1	-31.58282	140.7681	-0.22	0.829	-364.4465	301.2809
dur1	52.64304	46.75793	1.13	0.297	-57.9219	163.208
K1	-3.301467	33.87661	-0.10	0.925	-83.40692	76.80399
Ph1	435.1474	482.9264	0.90	0.397	-706.7921	1577.087
All	234.3354	215.4675	1.09	0.313	-275.1642	743.835
Fe1	309.9003	427.0242	0.73	0.492	-699.8514	1319.652
_cons	-184.5001	775.747	-0.24	0.819	-2018.85	1649.85

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Como primer síntoma tenemos un alto coeficiente moderado (R^2) y un valor de significancia ($P>|t|$) mayor al 5% en todos los $\hat{\beta}_i$, lo que sugiere ausencia de colinealidad. Ahora al evaluar el factor de inflación de la varianza (VIF) tenemos lo siguiente:

Tabla 66. Varianza (VIF)

Variable	VIF	1/VIF
ntu1	18.25	0.054780
All	12.99	0.077001
color1	12.61	0.079297
K1	9.19	0.108760
Fe1	9.05	0.110487
alk1	8.30	0.120511
Ph1	2.37	0.422790
dur1	2.02	0.494801
Mean VIF	9.35	

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Al analizar el VIF de las variables explicativas de manera individual, nos encontramos que por criterio existe Colinealidad en la variable $ntu1$, $AI1$ y $color1$, pues su valor $VIF > 10$ lo que indica que el r^2 de estas variables en función de las variables exógenas restantes es mayor al r^2 del modelo original. Sin embargo el VIF promedio de la regresión permanece por debajo de 10 por lo que puede suponerse ausencia de colinealidad.

Anexo D. Estimación del Mejor Coagulante

Para la relación 20/80, el mejor coagulante es el PAC3 pues conserva valores homogéneos de fuerza relativa con los demás coagulantes, pero logra la menor correlación negativa con el aluminio implicando baja aparición de este después del tratamiento.

Tabla 67 Estimación del Mejor Coagulante. Relación 20/80

PAC1		PAC2		PAC3	
	ntu1		ntu2		ntu3
ntu1	1.0000	ntu2	1.0000	ntu3	1.0000
color1	0.6955	color2	0.6416	color3	0.6108
Al1	-0.9534	Al2	-0.9244	Al3	-0.6903
Fe1	0.9641	Fe2	0.9139	Fe3	0.7435

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Para la relación 40/60, se observa una ligera similitud entre la remoción del hierro y color en los diferentes PAC's evaluados, pero se obtiene menor residual de aluminio con el PAC1.

Tabla 68 Estimación del Mejor Coagulante. Relación 40/60

PAC1		PAC2		PAC3	
	ntu1		ntu2		ntu3
ntu1	1.0000	ntu2	1.0000	ntu3	1.0000
color1	0.9577	color2	0.9864	color3	0.9847
Al1	-0.3259	Al2	-0.7717	Al3	-0.9441
Fe1	0.9036	Fe2	0.9747	Fe3	0.9056

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

En la relación 50/50 el PAC2 reduce satisfactoriamente el hierro y el color, aunque el menor aporte de aluminio lo genera el PAC1.

Tabla 69 Estimación del Mejor Coagulante. Relación 50/50

PAC1		PAC2		PAC3	
	ntu1		ntu2		ntu3
ntu1	1.0000	ntu2	1.0000	ntu3	1.0000
color1	0.7193	color2	0.8744	color3	0.7424
Al1	-0.5305	Al2	-0.7431	Al3	-0.6860
Fe1	0.7506	Fe2	0.8001	Fe3	0.8156

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

En la relación 70/30, el PAC1 logra una reducción de hierro y color muy superior a los otros coagulantes en esta relación, aunque el menor aporte de Aluminio lo hace el PAC2.

Tabla 70 Estimación del Mejor Coagulante. Relación 70/30

PAC1		PAC2		PAC3	
	ntu1		ntu2		ntu3
ntu1	1.0000	ntu2	1.0000	ntu3	1.0000
color1	0.9176	color2	0.7696	color3	0.6137
Al1	-0.6837	Al2	-0.0575	Al3	-0.4627
Fe1	0.6514	Fe2	0.0354	Fe3	0.2744

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Anexo E. Resultados Regresión: Porcentaje de Lodo

Tabla 71. Regresión con R/L 20

```
. reg Lodol NTU1 Ppm1 Color1 Alk1 Dur1 K1 Ph1 All Fe1
```

Source	SS	df	MS			
Model	400.051382	9	44.4501535	Number of obs =	20	
Residual	9.74861824	10	.974861824	F(9, 10) =	45.60	
Total	409.8	19	21.5684211	Prob > F =	0.0000	
				R-squared =	0.9762	
				Adj R-squared =	0.9548	
				Root MSE =	.98735	

Lodol	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
NTU1	-.2183692	.1765545	-1.24	0.244	-.6117572	.1750188
Ppm1	.3171809	.0372604	8.51	0.000	.2341597	.4002022
Color1	-.0081418	.0035395	-2.30	0.044	-.0160282	-.0002553
Alk1	.0032852	.2381428	0.01	0.989	-.52733	.5339004
Dur1	-.2834024	.1416645	-2.00	0.073	-.5990506	.0322459
K1	-.1038364	.056771	-1.83	0.097	-.23033	.0226573
Ph1	6.208761	5.825522	1.07	0.312	-6.77131	19.18883
All	-27.6232	33.77782	-0.82	0.433	-102.8849	47.63847
Fe1	8.782903	5.973519	1.47	0.172	-4.526925	22.09273
_cons	-26.47754	38.58189	-0.69	0.508	-112.4433	59.48827

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Tabla 72 Regresión con R/L 30

```
. reg Lodol NTU1 Ppm1 Color1 Alk1 Dur1 K1 Ph1 All Fel
```

Source	SS	df	MS	Number of obs =	16
Model	161.101704	9	17.9001893	F(9, 6) =	8.33
Residual	12.8982965	6	2.14971608	Prob > F =	0.0089
				R-squared =	0.9259
				Adj R-squared =	0.8147
Total	174	15	11.6	Root MSE =	1.4662

Lodol	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
NTU1	.2101534	.4257935	0.49	0.639	-.8317258	1.252033
Ppm1	.1066295	.0874256	1.22	0.268	-.1072933	.3205524
Color1	-.0332399	.0317652	-1.05	0.336	-.1109665	.0444868
Alk1	-.0353296	.2421238	-0.15	0.889	-.627785	.5571259
Dur1	.2537569	.2966342	0.86	0.425	-.4720808	.9795946
K1	-.0329598	.0144948	-2.27	0.063	-.0684274	.0025077
Ph1	-2.151205	2.459259	-0.87	0.415	-8.168796	3.866385
All	.0638008	10.77112	0.01	0.995	-26.29217	26.41977
Fel	.4678891	1.043499	0.45	0.670	-2.08546	3.021238
_cons	18.76204	18.57488	1.01	0.351	-26.68905	64.21313

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Tabla 73. Regresión con R/L 40

```
. reg Lodol NTU1 Ppm1 Color1 Alk1 Dur1 K1 Ph1 All Fel
```

Source	SS	df	MS	Number of obs =	16
Model	59.8569043	9	6.65076714	F(9, 6) =	1.80
Residual	22.1430957	6	3.69051595	Prob > F =	0.2437
				R-squared =	0.7300
				Adj R-squared =	0.3249
Total	82	15	5.46666667	Root MSE =	1.9211

Lodol	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
NTU1	-.8048936	.5311709	-1.52	0.180	-2.104622	.4948348
Ppm1	.1374433	.187306	0.73	0.491	-.3208779	.5957645
Color1	.1063389	.1104679	0.96	0.373	-.1639663	.3766441
Alk1	.8473535	.7289676	1.16	0.289	-.936366	2.631073
Dur1	1.104574	.4894418	2.26	0.065	-.0930471	2.302195
K1	-.2334465	.4032791	-0.58	0.584	-1.220235	.7533419
Ph1	-.8081989	12.27475	-0.07	0.950	-30.84343	29.22703
All	27.35214	24.71817	1.11	0.311	-33.13104	87.83533
Fel	-17.7445	28.6241	-0.62	0.558	-87.78514	52.29614
_cons	-25.83884	98.275	-0.26	0.801	-266.3091	214.6314

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Tabla 74. Regresión con R/L 50

```
. reg Lodol NTU1 Ppm1 Color1 Alk1 Dur1 K1 Ph1 All Fe1
```

Source	SS	df	MS	
Model	113.619327	9	12.6243697	Number of obs = 20
Residual	7.18067265	10	.718067265	F(9, 10) = 17.58
Total	120.8	19	6.35789474	Prob > F = 0.0001
				R-squared = 0.9406
				Adj R-squared = 0.8871
				Root MSE = .84739

Lodol	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
NTU1	.6931274	.186971	3.71	0.004	.2765301	1.109725
Ppm1	.1943773	.0294657	6.60	0.000	.1287237	.260031
Color1	-.0866755	.0291952	-2.97	0.014	-.1517264	-.0216246
Alk1	.2484631	.1292976	1.92	0.084	-.0396299	.5365561
Dur1	-.054243	.1069272	-0.51	0.623	-.2924916	.1840056
K1	-.02493	.0117467	-2.12	0.060	-.0511033	.0012432
Ph1	.3652863	2.00499	0.18	0.859	-4.102111	4.832683
All	-4.293759	7.239747	-0.59	0.566	-20.42492	11.8374
Fe1	-2.209828	4.717255	-0.47	0.650	-12.72053	8.300871
_cons	-2.158876	10.72077	-0.20	0.844	-26.04623	21.72848

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Tabla 75. Regresión con R/L 70

```
. reg Lodol NTU1 Ppm1 Color1 Alk1 Dur1 K1 Ph1 All Fel
```

Source	SS	df	MS	Number of obs =	16
Model	59.9001631	9	6.65557368	F(9, 6) =	6.61
Residual	6.03733686	6	1.00622281	Prob > F =	0.0161
				R-squared =	0.9084
				Adj R-squared =	0.7711
Total	65.9375	15	4.39583333	Root MSE =	1.0031

Lodol	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
NTU1	-.3460686	.3490649	-0.99	0.360	-1.2002	.5080624
Ppm1	.144674	.0312266	4.63	0.004	.0682652	.2210828
Color1	.0502984	.0518425	0.97	0.369	-.0765557	.1771525
Alk1	.1621199	.1691628	0.96	0.375	-.2518065	.5760464
Dur1	-.0012778	.1805265	-0.01	0.995	-.4430102	.4404546
K1	-.0354398	.0274157	-1.29	0.244	-.1025237	.031644
Ph1	15.45313	5.292132	2.92	0.027	2.503748	28.40251
All	1.206486	21.14451	0.06	0.956	-50.53227	52.94524
Fel	8.159595	13.5467	0.60	0.569	-24.98797	41.30716
_cons	-117.6621	40.68877	-2.89	0.028	-217.224	-18.10031

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Tabla 76. Regresión con R/L 100

```
. reg Lodol NTU1 Ppm1 Color1 Alk1 Dur1 K1 Ph1 Al1 Fe1
```

Source	SS	df	MS			
Model	39.6224621	9	4.40249579	Number of obs = 12		
Residual	2.37753793	2	1.18876896	F(9, 2) = 3.70		
				Prob > F = 0.2307		
				R-squared = 0.9434		
				Adj R-squared = 0.6887		
Total	42	11	3.81818182	Root MSE = 1.0903		

Lodol	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
NTU1	.5484701	.200793	2.73	0.112	-.3154726	1.412413
Ppm1	.1260629	.0599478	2.10	0.170	-.1318719	.3839977
Color1	.0048599	.0046251	1.05	0.404	-.0150402	.0247601
Alk1	-.0229173	.3426721	-0.07	0.953	-1.497316	1.451482
Dur1	-.5894937	.7615401	-0.77	0.520	-3.866136	2.687149
K1	-.0608516	.1399377	-0.43	0.706	-.6629547	.5412515
Ph1	23.79799	14.01525	1.70	0.232	-36.50475	84.10072
Al1	5.258843	11.32011	0.46	0.688	-43.44767	53.96536
Fe1	-39.61774	14.57049	-2.72	0.113	-102.3095	23.07402
_cons	-135.6333	89.06446	-1.52	0.267	-518.8467	247.5802

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Anexo F. Resultados Regresión: Turbiedad

Tabla 77. Regresión con R/L 20

Source	SS	df	MS			
Model	13578.4722	9	1508.71913	Number of obs =	20	
Residual	27.1246995	10	2.71246995	F(9, 10) =	556.22	
				Prob > F	= 0.0000	
				R-squared	= 0.9980	
				Adj R-squared	= 0.9962	
Total	13605.5969	19	716.084045	Root MSE	= 1.647	

NTU1	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
Ppm1	.1499824	.1720627	0.87	0.404	-.2333972	.5333621
Color1	-.0129815	.0060374	-2.15	0.057	-.0264337	.0004706
Alk1	.1529189	.3942852	0.39	0.706	-.7256033	1.031441
Dur1	.0319055	.2794379	0.11	0.911	-.5907209	.6545319
K1	.0202491	.1092088	0.19	0.857	-.2230833	.2635816
Ph1	-11.32426	9.608743	-1.18	0.266	-32.73388	10.08535
All	-3.73997	58.1849	-0.06	0.950	-133.384	125.9041
Fe1	31.12473	4.886023	6.37	0.000	20.23799	42.01146
Lodo1	-.6075937	.4912479	-1.24	0.244	-1.702162	.4869748
_cons	79.63559	60.84964	1.31	0.220	-55.94585	215.217

Source	SS	df	MS	Number of obs =	20
Model	19378.564	9	2153.17378	F(9, 10) =	38.00
Residual	566.636932	10	56.6636932	Prob > F =	0.0000
Total	19945.201	19	1049.74742	R-squared =	0.9716
				Adj R-squared =	0.9460
				Root MSE =	7.5275

NTU2	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
Ppm2	-.8538717	.4793339	-1.78	0.105	-1.921894	.2141508
Color2	.0134952	.0133125	1.01	0.335	-.0161669	.0431574
Alk2	1.899825	.8243964	2.30	0.044	.0629558	3.736695
Dur2	3.161932	1.282663	2.47	0.033	.3039799	6.019884
K2	.0230184	.3561824	0.06	0.950	-.7706054	.8166422
Ph2	-100.6691	28.06452	-3.59	0.005	-163.2007	-38.13745
Al2	142.7245	104.7487	1.36	0.203	-90.6701	376.1191
Fe2	15.71093	5.993019	2.62	0.026	2.357648	29.0642
Lodo2	.3459194	.5641496	0.61	0.553	-.9110843	1.602923
_cons	607.0739	156.8114	3.87	0.003	257.6763	956.4716

Source	SS	df	MS	Number of obs =	20
Model	9194.15185	9	1021.57243	F(9, 10) =	6.55
Residual	1560.04004	10	156.004004	Prob > F =	0.0035
Total	10754.1919	19	566.0101	R-squared =	0.8549
				Adj R-squared =	0.7244
				Root MSE =	12.49

NTU3	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
Ppm3	-1.854763	1.200428	-1.55	0.153	-4.529483	.8199564
Color3	-.0348031	.0524187	-0.66	0.522	-.1515991	.081993
Alk3	.3339278	1.75118	0.19	0.853	-3.567945	4.235801
Dur3	.2739134	1.550201	0.18	0.863	-3.180149	3.727976
K3	.1720392	.2557976	0.67	0.516	-.3979133	.7419918
Ph3	-61.51763	43.45452	-1.42	0.187	-158.3403	35.30507
Al3	-141.4029	187.9475	-0.75	0.469	-560.1759	277.3702
Fe3	35.01058	10.4908	3.34	0.008	11.63563	58.38553
Lodo3	4.055069	3.228166	1.26	0.238	-3.137734	11.24787
_cons	432.3429	287.5798	1.50	0.164	-208.4247	1073.111

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Tabla 78 Regresión con R/L 30

Source	SS	df	MS	
Model	2346.58719	9	260.73191	Number of obs = 16
Residual	11.3946039	6	1.89910065	F(9, 6) = 137.29
Total	2357.98179	15	157.198786	Prob > F = 0.0000
				R-squared = 0.9952
				Adj R-squared = 0.9879
				Root MSE = 1.3781

NTU1	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
Ppm1	.0706997	.0871388	0.81	0.448	-.1425213	.2839207
Color1	.0758223	.0097931	7.74	0.000	.0518593	.0997852
Alk1	-.0009748	.2279761	-0.00	0.997	-.5588123	.5568627
Dur1	-.4762245	.2222978	-2.14	0.076	-1.020168	.0677187
K1	-.001883	.0185732	-0.10	0.923	-.0473301	.0435641
Ph1	1.105589	2.412576	0.46	0.663	-4.797773	7.008951
All	17.06613	7.34507	2.32	0.059	-.9066101	35.03887
Fe1	1.620036	.7461631	2.17	0.073	-.2057596	3.445831
Lodo1	.1856536	.3761542	0.49	0.639	-.7347626	1.10607
_cons	2.268003	18.86199	0.12	0.908	-43.88563	48.42164

Source	SS	df	MS	
Model	8584.62992	9	953.847769	Number of obs = 20
Residual	155.054202	10	15.5054202	F(9, 10) = 61.52
Total	8739.68412	19	459.983375	Prob > F = 0.0000
				R-squared = 0.9823
				Adj R-squared = 0.9663
				Root MSE = 3.9377

NTU2	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
Ppm2	-.1364558	.1936792	-0.70	0.497	-.5679999	.2950883
Color2	.0547496	.0178897	3.06	0.012	.0148888	.0946104
Alk2	.1777122	.629931	0.28	0.784	-1.225862	1.581286
Dur2	.678483	.4562456	1.49	0.168	-.3380955	1.695062
K2	-.1133473	.0633613	-1.79	0.104	-.254525	.0278304
Ph2	11.37088	3.61704	3.14	0.010	3.311615	19.43015
All2	-147.149	43.19008	-3.41	0.007	-243.3825	-50.91554
Fe2	29.30505	5.929574	4.94	0.001	16.09313	42.51696
Lodo2	1.007045	.469309	2.15	0.057	-.0386408	2.05273
_cons	-102.5911	20.37627	-5.03	0.001	-147.9922	-57.1899

Source	SS	df	MS	Number of obs = 20		
Model	7225.33468	9	802.814965	F(9, 10) = 40.33		
Residual	199.070572	10	19.9070572	Prob > F = 0.0000		
Total	7424.40526	19	390.758171	R-squared = 0.9732		
				Adj R-squared = 0.9491		
				Root MSE = 4.4617		

NTU3	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
Ppm3	-.3909128	.300604	-1.30	0.223	-1.0607	.2788746
Color3	.0615964	.0307915	2.00	0.073	-.0070113	.1302042
Alk3	-.372107	.6895592	-0.54	0.601	-1.908541	1.164327
Dur3	1.867585	.9647337	1.94	0.082	-.2819761	4.017145
K3	.04285	.0513602	0.83	0.424	-.0715877	.1572878
Ph3	12.04909	3.192709	3.77	0.004	4.935292	19.16289
Al3	-29.37759	15.29426	-1.92	0.084	-63.45532	4.700141
Fe3	34.40975	4.901041	7.02	0.000	23.48955	45.32995
Lodo3	.7790347	1.054114	0.74	0.477	-1.569678	3.127748
_cons	-146.7835	45.74155	-3.21	0.009	-248.702	-44.86501

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Tabla 79. Regresión con R/L 40

Source	SS	df	MS	Number of obs = 16		
Model	373.31938	9	41.4799311	F(9, 6) = 26.31		
Residual	9.45999529	6	1.57666588	Prob > F = 0.0004		
Total	382.779375	15	25.518625	R-squared = 0.9753		
				Adj R-squared = 0.9382		
				Root MSE = 1.2557		

NTU1	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
Ppm1	.0215553	.1274993	0.17	0.871	-.2904242	.3335348
Color1	.096354	.0668675	1.44	0.200	-.0672649	.2599729
Alk1	.7486435	.4298093	1.74	0.132	-.3030619	1.800349
Dur1	.6565739	.3425903	1.92	0.104	-.1817145	1.494862
K1	.1797383	.2607235	0.69	0.516	-.4582292	.8177057
Ph1	.4386753	8.023939	0.05	0.958	-19.1952	20.07255
Al1	15.28664	16.59368	0.92	0.392	-25.31664	55.88991
Fe1	-5.758484	19.15546	-0.30	0.774	-52.63021	41.11325
Lodo1	-.3438674	.2269274	-1.52	0.180	-.8991387	.2114038
_cons	-60.05579	59.7705	-1.00	0.354	-206.3089	86.19735

Source	SS	df	MS	
Model	1293.41788	9	143.713097	Number of obs = 16
Residual	5.10212295	6	.850353825	F(9, 6) = 169.00
Total	1298.52	15	86.568	Prob > F = 0.0000
				R-squared = 0.9961
				Adj R-squared = 0.9902
				Root MSE = .92215

NTU2	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
Ppm2	.0833665	.0594358	1.40	0.210	-.0620676	.2288006
Color2	.0756264	.0112375	6.73	0.001	.0481292	.1031236
Alk2	.3434429	.1627562	2.11	0.079	-.0548072	.7416931
Dur2	.1571777	.1196966	1.31	0.237	-.1357093	.4500648
K2	-.0920014	.0549049	-1.68	0.145	-.226349	.0423462
Ph2	.5135353	2.422222	0.21	0.839	-5.413428	6.440499
Al2	-25.77074	14.90023	-1.73	0.134	-62.2303	10.68881
Fe2	6.864431	4.55472	1.51	0.183	-4.280567	18.00943
Lodo2	.7080807	.1862225	3.80	0.009	.2524107	1.163751
_cons	-13.81017	18.81287	-0.73	0.491	-59.84359	32.22325

Source	SS	df	MS	
Model	14769.3443	9	1641.03826	Number of obs = 16
Residual	12.7050375	6	2.11750625	F(9, 6) = 774.99
Total	14782.0494	15	985.469958	Prob > F = 0.0000
				R-squared = 0.9991
				Adj R-squared = 0.9979
				Root MSE = 1.4552

NTU3	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
Ppm3	.0965658	.1814933	0.53	0.614	-.3475322	.5406639
Color3	.1076199	.0056009	19.21	0.000	.0939148	.1213249
Alk3	.034167	.4836589	0.07	0.946	-1.149304	1.217638
Dur3	.1033011	.1869199	0.55	0.600	-.3540753	.5606776
K3	.0475097	.1290309	0.37	0.725	-.2682176	.363237
Ph3	-6.818645	4.414046	-1.54	0.173	-17.61943	3.982135
Al3	-.7171201	3.990343	-0.18	0.863	-10.48114	9.046897
Fe3	-10.61857	2.720591	-3.90	0.008	-17.27562	-3.961527
Lodo3	-.3244914	.499281	-0.65	0.540	-1.546188	.8972053
_cons	43.29353	28.40921	1.52	0.178	-26.22129	112.8084

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Tabla 80. Regresión con R/L 50

Source	SS	df	MS			
Model	247.85818	9	27.5397977	Number of obs = 20		
Residual	8.6513405	10	.86513405	F(9, 10) = 31.83		
				Prob > F = 0.0000		
				R-squared = 0.9663		
				Adj R-squared = 0.9359		
				Root MSE = .93013		
<hr/>						
NTU1	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
Ppm1	-.1900055	.044586	-4.26	0.002	-.2893494	-.0906616
Color1	.1128717	.0256526	4.40	0.001	.0557141	.1700294
Alk1	-.3627392	.1200901	-3.02	0.013	-.6303166	-.0951617
Dur1	-.126897	.1118897	-1.13	0.283	-.3762027	.1224087
K1	.0286596	.012609	2.27	0.046	.0005649	.0567542
Ph1	3.325746	1.937352	1.72	0.117	-.9909441	7.642436
All1	6.914489	7.783894	0.89	0.395	-10.42911	24.25808
Fe1	8.25178	4.537529	1.82	0.099	-1.858464	18.36202
Lodo1	.8350862	.2252643	3.71	0.004	.333166	1.337006
_cons	-14.82843	10.81887	-1.37	0.200	-38.93437	9.277506
<hr/>						
Source	SS	df	MS			
Model	1629.67719	9	181.075243	Number of obs = 20		
Residual	44.4582346	10	4.44582346	F(9, 10) = 40.73		
				Prob > F = 0.0000		
				R-squared = 0.9734		
				Adj R-squared = 0.9495		
				Root MSE = 2.1085		
<hr/>						
NTU2	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
Ppm2	-.1777341	.1757574	-1.01	0.336	-.569346	.2138778
Color2	.1593189	.0355753	4.48	0.001	.0800521	.2385857
Alk2	-.1640091	.3213984	-0.51	0.621	-.8801293	.5521112
Dur2	.119067	.2410475	0.49	0.632	-.4180203	.6561543
K2	.1423973	.152032	0.94	0.371	-.196351	.4811456
Ph2	1.223617	3.670471	0.33	0.746	-6.954703	9.401936
All2	-246.308	96.26781	-2.56	0.028	-460.806	-31.80996
Fe2	24.80827	5.76751	4.30	0.002	11.95746	37.65908
Lodo2	.9094071	.469498	1.94	0.081	-.1366996	1.955514
_cons	-21.94493	31.1642	-0.70	0.497	-91.3831	47.49324

Source	SS	df	MS	Number of obs = 20		
Model	536.283344	9	59.5870382	F(9, 10) = 29.42		
Residual	20.2529108	10	2.02529108	Prob > F = 0.0000		
Total	556.536255	19	29.2913818	R-squared = 0.9636		
				Adj R-squared = 0.9309		
				Root MSE = 1.4231		

NTU3	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
Ppm3	-.1547594	.0705022	-2.20	0.053	-.311848	.0023292
Color3	.0735417	.0305247	2.41	0.037	.0055283	.141555
Alk3	-.1168057	.2905025	-0.40	0.696	-.7640855	.5304742
Dur3	-.2387223	.1484949	-1.61	0.139	-.5695894	.0921449
K3	.1693714	.0861133	1.97	0.078	-.0225009	.3612437
Ph3	3.993917	2.832922	1.41	0.189	-2.318225	10.30606
Al3	-.0599989	2.22458	-0.03	0.979	-5.016672	4.896674
Fe3	16.43797	7.752704	2.12	0.060	-.8361265	33.71207
Lodo3	.7688962	.2834323	2.71	0.022	.1373696	1.400423
_cons	-39.70497	31.75069	-1.25	0.240	-110.4499	31.03997

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Tabla 81. Regresión con R/L 70

Source	SS	df	MS	Number of obs = 16		
Model	59.3417738	9	6.59353043	F(9, 6) = 5.58		
Residual	7.09572617	6	1.18262103	Prob > F = 0.0244		
Total	66.4375	15	4.42916667	R-squared = 0.8932		
				Adj R-squared = 0.7330		
				Root MSE = 1.0875		

NTU1	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
Ppm1	.0817972	.064272	1.27	0.250	-.0754708	.2390651
Color1	.1193907	.0357589	3.34	0.016	.0318919	.2068895
Alk1	-.1556809	.1863911	-0.84	0.436	-.6117635	.3004017
Dur1	.0370503	.1951271	0.19	0.856	-.4404085	.514509
K1	-.0248275	.0320419	-0.77	0.468	-.1032311	.0535761
Ph1	5.022992	8.688407	0.58	0.584	-16.23678	26.28276
Al1	-19.27347	21.537	-0.89	0.405	-71.97262	33.42568
Fe1	19.86343	12.76584	1.56	0.171	-11.37346	51.10031
Lodo1	-.406737	.4102585	-0.99	0.360	-1.410603	.5971295
_cons	-34.43099	66.78419	-0.52	0.625	-197.846	128.984

Source	SS	df	MS	
Model	11.2267168	9	1.24741298	Number of obs = 16
Residual	6.52328318	6	1.08721386	F(9, 6) = 1.15
Total	17.75	15	1.18333333	Prob > F = 0.4495
				R-squared = 0.6325
				Adj R-squared = 0.0812
				Root MSE = 1.0427

NTU2	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
Ppm2	-.0284979	.0570913	-0.50	0.635	-.1681952 .1111993
Color2	.0710219	.0413822	1.72	0.137	-.0302366 .1722804
Alk2	-.2156002	.2496038	-0.86	0.421	-.8263586 .3951582
Dur2	.0954866	.138143	0.69	0.515	-.2425372 .4335103
K2	-.0812023	.0874728	-0.93	0.389	-.2952405 .1328359
Ph2	-1.192883	2.740013	-0.44	0.679	-7.897453 5.511686
Al2	-4.896601	16.48818	-0.30	0.776	-45.24173 35.44853
Fe2	-8.725001	6.217499	-1.40	0.210	-23.93867 6.48867
Lodo2	-.1307238	.2603009	-0.50	0.633	-.7676572 .5062097
_cons	25.19802	33.92354	0.74	0.486	-57.80988 108.2059

Source	SS	df	MS	
Model	24.1625045	9	2.68472272	Number of obs = 16
Residual	2.85749554	6	.476249256	F(9, 6) = 5.64
Total	27.02	15	1.80133333	Prob > F = 0.0238
				R-squared = 0.8942
				Adj R-squared = 0.7356
				Root MSE = .69011

NTU3	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
Ppm3	-.0655517	.0331488	-1.98	0.095	-.1466638 .0155604
Color3	.0819766	.0240458	3.41	0.014	.0231388 .1408145
Alk3	-.038276	.2321304	-0.16	0.874	-.6062785 .5297265
Dur3	-.2101112	.1091538	-1.92	0.103	-.4772009 .0569784
K3	.0101726	.066972	0.15	0.884	-.1537019 .1740471
Ph3	-8.233877	3.988284	-2.06	0.085	-17.99286 1.525103
Al3	-1.400194	17.58357	-0.08	0.939	-44.42564 41.62526
Fe3	-7.658935	8.405129	-0.91	0.397	-28.22555 12.90767
Lodo3	.5476494	.3188144	1.72	0.137	-.2324614 1.32776
_cons	69.2672	34.16239	2.03	0.089	-14.32514 152.8596

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

Tabla 82. Regresión con R/L 100

Source	SS	df	MS	Number of obs =	20
Model	247.85818	9	27.5397977	F(9, 10) =	31.83
Residual	8.6513405	10	.86513405	Prob > F =	0.0000
				R-squared =	0.9663
				Adj R-squared =	0.9359
Total	256.50952	19	13.5005011	Root MSE =	.93013

NTU1	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
Ppm1	-.1900055	.044586	-4.26	0.002	-.2893494	-.0906616
Color1	.1128717	.0256526	4.40	0.001	.0557141	.1700294
Alk1	-.3627392	.1200901	-3.02	0.013	-.6303166	-.0951617
Dur1	-.126897	.1118897	-1.13	0.283	-.3762027	.1224087
K1	.0286596	.012609	2.27	0.046	.0005649	.0567542
Ph1	3.325746	1.937352	1.72	0.117	-.9909441	7.642436
All1	6.914489	7.783894	0.89	0.395	-10.42911	24.25808
Fe1	8.25178	4.537529	1.82	0.099	-1.858464	18.36202
Lodo1	.8350862	.2252643	3.71	0.004	.333166	1.337006
_cons	-14.82843	10.81887	-1.37	0.200	-38.93437	9.277506

Source	SS	df	MS	Number of obs =	20
Model	1629.67719	9	181.075243	F(9, 10) =	40.73
Residual	44.4582346	10	4.44582346	Prob > F =	0.0000
				R-squared =	0.9734
				Adj R-squared =	0.9495
Total	1674.13542	19	88.1123905	Root MSE =	2.1085

NTU2	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
Ppm2	-.1777341	.1757574	-1.01	0.336	-.569346	.2138778
Color2	.1593189	.0355753	4.48	0.001	.0800521	.2385857
Alk2	-.1640091	.3213984	-0.51	0.621	-.8801293	.5521112
Dur2	.119067	.2410475	0.49	0.632	-.4180203	.6561543
K2	.1423973	.152032	0.94	0.371	-.196351	.4811456
Ph2	1.223617	3.670471	0.33	0.746	-6.954703	9.401936
All2	-246.308	96.26781	-2.56	0.028	-460.806	-31.80996
Fe2	24.80827	5.76751	4.30	0.002	11.95746	37.65908
Lodo2	.9094071	.469498	1.94	0.081	-.1366996	1.955514
_cons	-21.94493	31.1642	-0.70	0.497	-91.3831	47.49324

Source	SS	df	MS			
Model	536.283344	9	59.5870382	Number of obs = 20		
Residual	20.2529108	10	2.02529108	F(9, 10) = 29.42		
				Prob > F = 0.0000		
				R-squared = 0.9636		
				Adj R-squared = 0.9309		
				Root MSE = 1.4231		
NTU3	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
Ppm3	-.1547594	.0705022	-2.20	0.053	-.311848	.0023292
Color3	.0735417	.0305247	2.41	0.037	.0055283	.141555
Alk3	-.1168057	.2905025	-0.40	0.696	-.7640855	.5304742
Dur3	-.2387223	.1484949	-1.61	0.139	-.5695894	.0921449
K3	.1693714	.0861133	1.97	0.078	-.0225009	.3612437
Ph3	3.993917	2.832922	1.41	0.189	-2.318225	10.30606
Al3	-.0599989	2.22458	-0.03	0.979	-5.016672	4.896674
Fe3	16.43797	7.752704	2.12	0.060	-.8361265	33.71207
Lodo3	.7688962	.2834323	2.71	0.022	.1373696	1.400423
_cons	-39.70497	31.75069	-1.25	0.240	-110.4499	31.03997

Fuente. Software Stata 64 Statistics/Data Analysis StataCorp LP

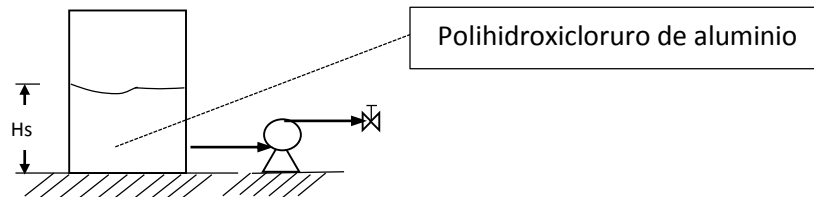
Anexo G. Memoria de Cálculo del Sistema de Bombeo

Los siguientes cálculos se realizan teniéndose en cuenta las condiciones futuras de operación de los clarificadores:

- Relación 100% río
- Caudal de agua a tratar: 3200 GPM

Sistema de Trasiego de Coagulante (Polihidroxicloruro de Aluminio)

Figura 9. Sistema de trasiego polihidroxicloruro de aluminio



Fuente.

Se utiliza una caneca de polihidroxicloruro de aluminio de 55 galones

$$Q = \frac{55 \text{ Gal}}{5 \text{ Min}} = 11 \text{ GPM} \rightarrow Q = 11 \text{ GPM}$$

$$Q = 11 \text{ GPM} * \frac{3.785 \text{ L}}{7 \text{ Gal}} * \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ L}} * \frac{1 \text{ ft}^3}{(30.48)^3 \text{ cm}^3} \rightarrow Q = 1.47 \text{ PCM}$$

$$p_5 = H_5 * \frac{S}{2.31} = \frac{1.0 \text{ m}}{0.3048 \text{ m}} (1 \text{ ft}) * \frac{1.3}{2.31} \rightarrow p_5 = 1.85 \text{ psig}$$

• PRINCIPIO DE BERNOULLI

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{\langle v_1 \rangle^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\langle v_2 \rangle^2}{2g} + z_2 + h_L$$

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = z_2 - z_1 + h_L$$

$$\Delta h_L = \left[f \left(\frac{L}{D} \right) + \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{Valve}} f_T + 9 \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{codo}} f_T \right] \frac{\langle v \rangle^2}{2g}$$

Además,

$$Q = A \langle v \rangle \wedge A = \frac{\pi}{4} D^2$$

$$\therefore \langle v \rangle = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} \rightarrow \langle v \rangle = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

$$\langle v \rangle = \frac{4 * 1.47}{\pi(0.083)^2} \rightarrow \langle v \rangle = \mathbf{4.53 \text{ ft/s}}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{8.5(10)^{-3} \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}}{1.3 \text{ g cm}^{-3}}$$

$$\nu = \mathbf{0.0065 \text{ cm}^2/\text{s}}$$

$$\text{Re} = \frac{\langle v \rangle D}{\nu}$$

$$\text{Re} = \frac{4.53 * 30.48 * 2.54}{0.0065} \rightarrow \mathbf{\text{Re} = 53955.22}$$
 Flujo turbulento

$\frac{\epsilon}{D} = 6(10)^{-5}$; para PVC (A-21b. Rugosidad relativa de los materiales de las tuberías y factor de fricción para flujo en régimen de turbulencia total).

$f = 0.021$; factor de fricción para tuberías comerciales, leído en el A-22b, factores de fricción para cualquier tipo de tubería.

$f_T = 0.023$; factor de fricción para tuberías comerciales nuevas, de acero, con flujo en la zona de total turbulencia (leído A-24 del factor K- coeficientes de resistencia (K) válidos para válvulas y accesorios).

$$\left(\frac{L_e}{D}\right)_{\text{Valve}} = 3; \left(\frac{L_e}{D}\right)_{\text{codo}} = 30$$

$$h_L = \left[0.021 * \left(\frac{44m}{\frac{0.3048m}{0.083}} \right) 1ft + 3 * 0.023 + 9 * 30 * 0.023 \right] * \frac{(4.53)^2}{2 * 32.16}$$

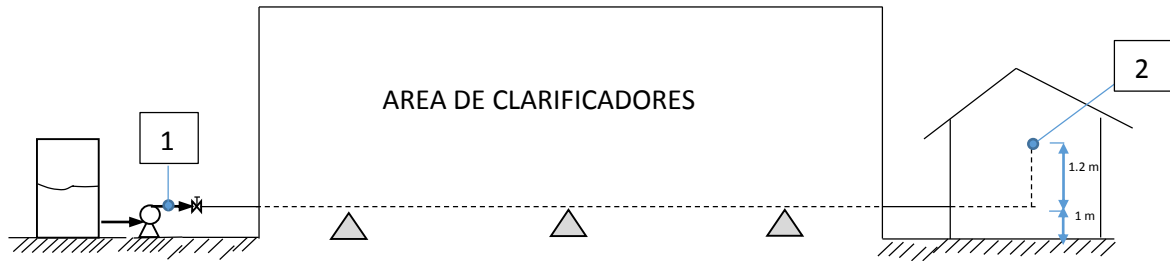
$$\mathbf{h_L = 13.65 \text{ ft}}$$

$$\Delta H_{1-2} = z_2 - z_1 + h_L \rightarrow \Delta H_{1-2} = \left(\frac{1.2 \text{ m}}{0.3048m} \right) 1ft + 13.65ft$$

$$\Delta H_{1-2} = 17,58 \text{ ft} \rightarrow \Delta p_{1-2} = \Delta H_{1-2} \times \frac{S}{2.31} = 17.58 * \frac{1.3}{2.31}$$

$$\Delta P_{1-2} = 9.89 \text{ psi}$$

Figura 10. Vista lateral línea de trasiego coagulante polimérico tipo PAC



Fuente

$$H_2 = 2.2\text{m}$$

$$p_2 = H_2 * \frac{S}{2.31}$$

$$P_2 = \frac{2.2\text{m}}{0.3048\text{m}} (1\text{ft}) * \frac{1.3}{2.31}$$

$$p_2 = 4.06 \text{ psig}$$

$$p_1 = p_2 + \Delta p_{1-2} = 4.06 + 9.89$$

$$p_1 = 13.95 \approx 14 \text{ psig}$$

$$\therefore p_1 \approx 14 \text{ psig}$$

Además: $p_1 = p_d$ (presión de descarga de la bomba)

$$p_s = 1.85 \text{ psig} \wedge p_d = 14 \text{ psig}$$

$$NPSH_D = H_s - h_{vp}; h_{vp} = 0.85 \text{ ft}$$

$$NPSH_D = \left[\frac{1.0\text{m}}{0.3048\text{m}} (1\text{ft}) - 0.85 \text{ ft} \right]$$

$$NPSH_D = 2.43 \text{ ft}$$

Sistema de dosificación de polihidroxiclورو de aluminio hacia los clarificadores.

De acuerdo a los resultados de pruebas de jarras, se obtuvo 20 ppm de polihidroxiclورو de aluminio (PAC1) como la dosis óptima a ser utilizada en el proceso de clarificación del agua cuando se tiene una relación de 100% río y 0% ciénaga San Silvestre (Tabla 19), por consiguiente, el caudal promedio de agua cruda a tratar de 3200GPM (galones por minuto), para lo cual se requiere la especificación de una bomba dosificadora de producto (polihidroxiclورو de aluminio).

Se realizará la especificación de la bomba dosificadora asociada al mayor tramo de tubería de descarga, para lo cual resulta la bomba dosificadora C (ver capítulo 8).

La anterior consideración para el diseño del sistema de dosificación se basó en los mayores requerimientos energéticos del fluido para ser transportado desde la caseta de dosificación de químicos que actualmente existe en la planta de agua de servicios industriales balance hacia la entrada de agua cruda al clarificador.

Teniéndose en cuenta que, la concentración de polihidroxiclورو de aluminio puro es $1.3 (10)^6$ ppm y luego se diluye a una concentración final de 20 ppm (concentración estimada) a un caudal promedio de procesamiento de 3200GPM, se obtiene la siguiente dosis en volumen del polihidroxiclورو de aluminio a la concentración estimada:

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

Dónde:

$C_1 \equiv$ Concentración del polihidroxiclورو de aluminio puro (ppm).

$C_2 \equiv$ Concentración del polihidroxiclورو de aluminio diluido (ppm), valor estimado mediante la evaluación de los resultados de las pruebas de jarras.

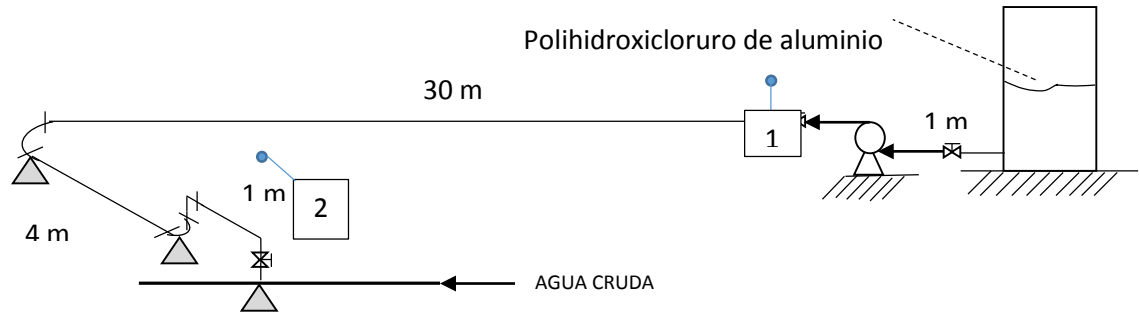
$V_1 \equiv$ Caudal de polihidroxiclورو de aluminio puro (galones por minuto-GPM)

$V_2 \equiv$ Caudal de agua cruda a tratar en el clarificador (GPM)

$$C_1 = 1.3 (10)^6 \text{ ppm} ; C_2 = 20 \text{ ppm} ; v_2 = 3200 \text{ ppm}$$

$$V_1 = \frac{C_2 V_2}{C_1} = \frac{20 \text{ ppm} * 3200 \text{ GPM}}{1.3 (10)^6 \text{ ppm}} \rightarrow V_1 = \mathbf{0.049 \text{ GPM}}$$

Figura 11. Trazado sistema de dosificación coagulante polimérico tipo PAC hacia Clarificador



Fuente.

$$p_2 = H_2 * \frac{s}{2.31} = \frac{8 \text{ m}}{0.3048 \text{ m}} (1 \text{ ft}) * \frac{1.3}{2.31} \rightarrow \mathbf{p_2 = 14.77 \text{ psig}}$$

$$Q_1 = 0.10 \text{ GPM} * 3.785 \frac{\text{L}}{1 \text{ Gal}} * \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ L}} * \frac{1 \text{ ft}^3}{(30.48)^3 \text{ cm}^3} \rightarrow \mathbf{Q_1 = 0.013 \text{ PCM}}$$

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = z_2 - z_1 + h_L ; \text{ donde } z_2 - z_1 = 0.3 \text{ m} = 0.9842 \text{ ft}$$

$$\Delta h_L = \left[f \left(\frac{L}{D} \right) + \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{Valve}} f_T + 4 \left(\frac{L_e}{D} \right)_{\text{codo}} f_T \right] \frac{\langle v \rangle^2}{2g}$$

$$\text{Adem\u00e1s ... } Q_1 = A \langle v \rangle = \frac{\pi}{4} D^2 \langle v \rangle \rightarrow \langle v \rangle = \frac{4Q_1}{\pi D^2} ; D = 1/2 \text{ in} = 0.042 \text{ ft}$$

$$\langle v \rangle = \frac{4 \times 0.013 \text{ ft}^3/\text{min}}{\pi \times (0.042)^2 \text{ ft}^2} \rightarrow \langle v \rangle = 9.38 \text{ ft}/\text{min} \therefore \langle v \rangle = \mathbf{0.156 \text{ ft}/\text{s}}$$

$$Re = \frac{\langle v \rangle}{\nu} = \frac{0.156 \text{ ft}/\text{s} * 0.042 \text{ ft}}{0.0064 \text{ cm}^2/\text{s} * 1 \text{ ft}^2/(30.48)^2 \text{ cm}^2} \rightarrow \mathbf{Re = 951.08 \text{ Flujo laminar}}$$

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1463.2} = \mathbf{f = 0.067}$$

$$L = 117.12\text{ft}; \left(\frac{Le}{D}\right)_{vo/v} = 3; \left(\frac{Le}{D}\right)_{\text{codo } 90^\circ} = 30$$

$f_T = 0.027$ (Factor de fricción para tuberías comerciales nuevas, leído A
– 24 tabla del factor K coeficientes de resistencia, CRANE)

$$h_L = \left[0.067 \left(\frac{117.12}{0.042}\right) + 3 * 0.027 + 4 * 30 * 0.027\right] \frac{(0.156)^2}{2 * 32.16}$$

$$\therefore h_L = \mathbf{0.072 \text{ ft}} \rightarrow \Delta H_{1-2} = (0.9842 + 0.072)\text{ft} \rightarrow \Delta H_{12} = \mathbf{1.056\text{ft}}$$

$$\Delta p_{12} = \Delta H_{12} * \frac{S}{2.31} = 1.056 * \frac{1.3}{2.31} \rightarrow \Delta p_{12} = \mathbf{0.59\text{psi}}$$

$$p_1 = p_2 + \Delta p_{12} \cong 14.77 + 0.59 \therefore \mathbf{p_1 = 15.4 \text{ psig}}$$

INFORMACIÓN BOMBA DE TRASIEGO COAGULANTE

$$Q = 11\text{GPM}$$

$$p_s = 1.85 \text{ psig (presión de succión)}$$

$$p_D = 14 \text{ psig (presión de descarga)}$$

$$NPSH_D = H_S - H_{PV_{H_2O}}; H_{PV_{H_2O}} \approx 0.8 \text{ ft}$$

$$NPSH_D = 2.48 \text{ ft}$$

$$\text{Nota: } NPSH_D \gg NPSH_R + 3\text{ft}$$

INFORMACIÓN BOMBA DE DOSIFICACIÓN COAGULANTE A CLARIFICAR

$$Q = 0.10 \text{ GPM}$$

$$P_s = 1.85 \text{ psig (presión de succión)}$$

$$P_D = 15.4 \text{ psig (presión de descarga)}$$

$$NPSH_D \approx \text{idem } NPSH_D \text{ bomba trasiego coagulante}$$

Anexo H. Análisis Económico

Tabla 83. Bases financieras

Costos unitarios	2016	Fuente
WACC (Costo Promedio Ponderado de Capital) EA	12%	Bases presupuestales 2016
Tasa de cambio \$/US\$	3000	Banco de la Republica
Precio de energía (KW-hr) Autogenerado	230	SAP Marzo
Tasa de inflación proyectada	7.98%	Banco de la Republica
Costo kilogramo de sulfato de aluminio	\$ 505.00	Costo de mercado suministrados por Clariant de Colombia
Costo kilogramo de policloruro de aluminio	\$ 2,916.00	Costo de mercado suministrados por Clariant de Colombia
Costo kilogramo de cal	\$ 796	Costo de mercado suministrados por Clariant de Colombia
Costo disposición lodo de clarificación	\$ 94,100	Bases presupuestales 2016

Fuente. El autor

Tabla 84. Inversión implementación PAC

PRESUPUESTO ESTIMADO DE OBRA (+75/-35)	
SUMINISTRO, OBRAS E INSTALACIÓN, ESTIMADO EN PESOS COLOMBIANOS COP (TRM 3000), INCLUYE IVA	
SUMINISTRO TUBERÍA (Tubería PVC 1 y 1/2", válvulas, codos)	\$ 2,222,189
BOMBAS DOSIFICADORAS	\$ 13,888,680
INSTALACIÓN BOMBAS	\$ 13,194,246
INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL	\$ 2,499,962
TOTAL	\$ 31,805,077
AIU CONTRATISTA (30%)	\$ 12,722,031
INGENIERÍAS Y OTROS ESTUDIOS	\$ 3,498,558
TOTAL COSTOS	\$ 48,025,667

Fuente. El autor

Tabla 85. Operación U2900 Caso base

Base / Mes	Unidades	Valor
Flujo de captación	m3	523238.4
Generación de lodos	m3	284
Consumo de sulfato aluminio	kg	62789
Consumo de cal	Kg	210
Consumo de energía eléctrica bombas dosificadoras sulfato	kw	644.28
Consumo de policloruro de aluminio	kg	0

Fuente. El autor

Tabla 86. Operación U2900 Caso PAC

Base / Mes	Unidades	Valor
Flujo de captación	m3	523238.4
Generación de lodos	m3	142
Consumo de sulfato aluminio	kg	0
Consumo de cal	Kg	0
Consumo de energía eléctrica bombas dosificadoras sulfato	kw	161.07
Consumo de policloruro de aluminio	kg	8160

Fuente. El autor

Tabla 87. Flujo de caja uso coagulante PAC

CON PROYECTO (USO COAGULANTE PAC)								
Mes	Dia	Con Inversion	Costos Sulfato De Aluminio	Costos Cal	Costo Policloruro De Aluminio	Costo Retiro De Lodo	Costo Energia Para Dosificacion	
ENE	0	31	\$ 48,025,667	\$ 31,708,445	\$ 167,160	\$ 0	\$ 26,724,400	\$ 148,184
FEB	1	29	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 23,001,408	\$ 12,916,793	\$ 35,811
MAR	2	31	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 24,587,712	\$ 13,807,607	\$ 38,281
ABR	3	30	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 23,794,560	\$ 13,362,200	\$ 37,046
MAY	4	31	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 24,587,712	\$ 13,807,607	\$ 38,281
JUN	5	30	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 23,794,560	\$ 13,362,200	\$ 37,046
JUL	6	31	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 24,587,712	\$ 13,807,607	\$ 38,281
AGO	7	31	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 24,587,712	\$ 13,807,607	\$ 38,281
SEPT	8	30	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 23,794,560	\$ 13,362,200	\$ 37,046
OCT	9	31	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 24,587,712	\$ 13,807,607	\$ 38,281
NOV	10	30	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 23,794,560	\$ 13,362,200	\$ 37,046
DIC	11	31	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 24,587,712	\$ 13,807,607	\$ 38,281
Anual			\$ 48,025,667	\$ 31,708,445	\$ 167,160	\$ 265,705,920	\$ 175,935,633	\$ 561,866
TOTAL			\$ 522,104,691					

Fuente. El autor

Tabla 88. Flujo de caja sulfato de aluminio

SIN PROYECTO (USO SULFATO DE ALUMINIO)								
Mes	Dia	Inversion	Costos Sulfato De Aluminio	Costos Cal	Costo Policloruro De Aluminio	Costo Retiro De Lodo	Costo Energia De Dosificacion	
ENE	0	31	\$ 0	\$ 31,708,445	\$ 167,160	\$ 0	\$ 26,724,400	\$ 148,184
FEB	1	29	\$ 0	\$ 30,651,497	\$ 161,588	\$ 0	\$ 25,833,587	\$ 143,245
MAR	2	31	\$ 0	\$ 32,765,393	\$ 172,732	\$ 0	\$ 27,615,213	\$ 153,124
ABR	3	30	\$ 0	\$ 31,708,445	\$ 167,160	\$ 0	\$ 26,724,400	\$ 148,184
MAY	4	31	\$ 0	\$ 32,765,393	\$ 172,732	\$ 0	\$ 27,615,213	\$ 153,124
JUN	5	30	\$ 0	\$ 31,708,445	\$ 167,160	\$ 0	\$ 26,724,400	\$ 148,184
JUL	6	31	\$ 0	\$ 32,765,393	\$ 172,732	\$ 0	\$ 27,615,213	\$ 153,124
AGO	7	31	\$ 0	\$ 32,765,393	\$ 172,732	\$ 0	\$ 27,615,213	\$ 153,124
SEP	8	30	\$ 0	\$ 31,708,445	\$ 167,160	\$ 0	\$ 26,724,400	\$ 148,184
OCT	9	31	\$ 0	\$ 32,765,393	\$ 172,732	\$ 0	\$ 27,615,213	\$ 153,124
NOV	10	30	\$ 0	\$ 31,708,445	\$ 167,160	\$ 0	\$ 26,724,400	\$ 148,184
DIC	11	31	\$ 0	\$ 32,765,393	\$ 172,732	\$ 0	\$ 27,615,213	\$ 153,124
Anual			\$ 385,786,081	\$ 2,033,780	\$ 0	\$ 325,146,867	\$ 1,802,910	
TOTAL			\$ 714,769,638					

Fuente. El autor

Tabla 89. Análisis diferencial en pesos constantes / ahorro en tarifa de kilo-galón agua tratada

ANÁLISIS DIFERENCIAL EN PESOS CONSTANTES					
AÑO	INVERSIÓN	AHORROS ESPERADOS	DEPRECIACIÓN DE KIT DE DOSIFICACIÓN	FLUJO DE CAJA NETO DIFERENCIAL	
0	0	(\$ 48,025,667)	0	0	(\$ 48,025,667)
1	0	0	\$ 231,012,989.81	(\$ 9,605,133)	\$ 221,407,856.50
2	0	0	\$ 231,012,989.81	(\$ 9,605,133)	\$ 221,407,856.50
3	0	0	\$ 231,012,989.81	(\$ 9,605,133)	\$ 221,407,856.50
4	0	0	\$ 231,012,989.81	(\$ 9,605,133)	\$ 221,407,856.50
5	0	0	\$ 231,012,989.81	(\$ 9,605,133)	\$ 221,407,856.50

TASA INTERNA DE RETORNO	VALOR ACTUAL NETO	AHORRO EN TARIFA DE KILO-GALÓN AGUA TRATADA
461%	\$ 774,641,496.18	\$ 131.64

Fuente. El autor