

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL



TESIS

**“EFICIENCIA DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN EN
LA REMOCIÓN DE ALTAS TURBIEDADES EN AGUAS
SUPERFICIALES”**

PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO SANITARIO

ELABORADO POR:

SANTOS EDGARD CAHUANTICO OSTOS

ASESOR:

MSC VICTOR ANTONIO MALDONADO YACTAYO

LIMA-PERÚ

2019

DEDICATORIA

A mis padres Lola y Mariano por su amor, trabajo y ejemplo de vida. A mi esposa Carolina y mis hijos: Daniel y Maylee, quienes me acompañan en el desarrollo profesional sabiendo ser pacientes ante mi ausencia por alcanzar la superación en bien de la familia.

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mis más sinceros muestras de agradecimiento:

A mis hermanos Hortensia, Manuel, Esther, Lucy, Jeny, Lola y John por estar siempre presentes, por su cariño y apoyo incondicional.

A todos los docentes de la Facultad de Ingeniería Ambiental, por contribuir con el desarrollo del conocimiento.

A mi asesor Ingeniero Víctor Maldonado Yactayo, quien me oriento y me dio todas las facilidades para realizar esta investigación.

A mi amigo Vladimir De la Torre quien me apoyo en la parte experimental, así como ser un amigo incondicional.

Al Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Ambiental, en la persona de su Jefatura, el Ing. Arturo Zapata Payco, por las facilidades brindadas en el uso de los laboratorios, asimismo al personal del laboratorio, Sra. Margarita Andreu, Sr. Oscar Vaccari y el Sr. Raúl Infanzón por su asistencia en los equipos y materiales de laboratorio.

PROLOGO

Este trabajo de investigación que lleva el título de “EFICIENCIA DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN EN LA REMOCIÓN DE ALTAS TURBIEDADES EN AGUAS SUPERFICIALES”, consiste en el estudio de la eficiencia de remoción de la turbiedad presente en las aguas superficiales utilizando la tecnología de la electrocoagulación que basa su funcionamiento en principios electroquímicos. Esta investigación se ha desarrollado y concluido durante el tiempo de enero del 2018 y febrero del 2019, respecto a la investigación en laboratorio y bitácora, redacción y revisión.

Esta tesis de investigación, que es una modalidad para optar el título profesional de ingeniero Sanitario, se realizó en el Laboratorio de Investigación del Agua que pertenece a la facultad de ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería. El tema de la investigación nació ante la presencia de un desastre natural ocurrido hace 2 años que provocó el desabastecimiento del agua de consumo humano en muchos distritos de Lima. El estudio ha tenido un desarrollo bastante arduo y complejo, que ha podido terminar exitosamente gracias a mi asesor el Msc. Víctor Maldonado y al director del laboratorio, el ingeniero Arturo Zapata, cuya ayuda y aporte ha sido importante para tal objetivo.

La tecnología que elegí para este trabajo, fue motivada por una prueba demostrativa que realizo una empresa Confident Engineering de la India, en el Programa Nacional de Saneamiento Urbano-Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, lugar donde laboro, esta empresa se dedica a la venta de plantas de tratamiento para aguas potable y aguas residuales. Después de varios meses de investigación me encontré con una investigación, que definiría mi línea de investigación que encierra esta tesis y a la cual espero que sea lo más entendible posible y que suscite un verdadero interés entre los investigadores del área de la potabilización de las aguas.

INDICE

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	III
PROLOGO	IV
INDICE	V
DEFINICIONES	X
SIMBOLOS Y ABREVIATURAS	XIII
INDICE DE FIGURAS.....	XIII
INDICE DE TABLAS.....	XVII
INDICE DE ANEXOS.....	XX
RESUMEN.....	XXI
ABSTRACT	XXIII

CAPITULO I: INTRODUCCION.....1

1.1 ANTECEDENTES.....	3
1.2.HIPÓTESIS.....	4
1.3.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.3.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	5
1.5 OBJETIVOS.....	6

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1.CALIDAD DEL AGUA	6
2.2 CALIDAD DEL AGUA DEL RIO RÍMAC	7
2.3 COLOIDES	7
2.4 METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA	8
2.5 FACTORES DE INFLUENCIA EN LA COAGULACIÓN	9
2.6 COAGULANTES.....	9
2.7 POLIMEROS	9
2.8 PROCESO DE LA ELECTROCOAGULACIÓN.....	10
2.8.1 PRINCIPIO DE LA ELECTROCOAGULACIÓN.....	10
2.8.2 REACCIONES QUÍMICAS.....	11
2.8.3 FACTORES DE INFLUENCIA EN EL PROCESO DE LA EC.....	12
2.8.4 CONDICIONES FISICOQUÍMICAS DEL AGUA.....	14

2.8.5 CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN	15
CAPITULO III: MARCO NORMATIVO	16
3.1 REGLAMENTOS DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO .	16
3.2 GUÍAS SOBRE CALIDAD DE AGUA PARA CONSUCMO HUMANO	17
CAPITULO IV: RECURSOS EQUIPOS Y MÉTODOS.....	17
4.1 RECURSOS HUMANOS	17
4.2. EQUIPOS Y MATERIALES.....	18
4.2.1 EQUIPOS	18
4.2.1.1 EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS.....	18
4.2.1.2 TURBIDÍMETRO.....	18
4.2.1.3 BALANZA ELECTRÓNICA	19
4.2.1.4 FUENTE DE PODER	19
4.2.1.5 REACTOR BACH	20
4.2.2 MATERIALES	21
4.2.2.1 COAGULANTES.....	21
4.3 DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	25
4.3.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA	25
4.3.2 METODOLOGÍA	26
4.3.2.1 MÉTODO FISCOQUÍMICO.....	26
4.3.2.2 MÉTODO DE LA ELECTROCOAGULACIÓN	27
4.3.3 PROCEDIMIENTO.....	27
4.3.3.1 DETERMINACIÓN DE A DOSIS ÓPTIMA	27
4.3.3.2 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ÓPTIMA	28
4.3.3.3 DETERMINACIÓN DEL PH ÓPTIMO	29
4.3.3.4 DETERMINACIÓN DEL AMPERAJE ÓPTIMO	30
4.4 PROTOCOLO DE MEDICIÓN	31
CAPITULO V: RESULTADOS	31
5.1 ACTIVIDADES PROSPECTIVAS.	31
5.2 CONDICIONES DE USO Y MEDICIONES	32
5.2.1 CONDICIONES DE USO	32

5.2.2 MEDICIONES	32
5.2.2.1 TOMA DE MUESTRAS	32
5.2.2.2 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS	33
5.3 SENSIBILIZACIÓN, DIFUSIÓN DE INFORMACIÓN	33
5.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	34
5.4.1 MÉTODO DE COAGULACIÓN QUÍMICA	34
5.4.1.1 USO DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE. AGUA TIPO I: 21 UNT	34
5.4.1.1.1 DOSIS ÓPTIMA	34
5.4.1.1.2 CONCENTRACIÓN ÓPTIMA	35
5.4.1.1.3 PH ÓPTIMO	36
5.4.1.2 USO DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE. AGUA TIPO II: 135 UNT	37
5.4.1.2.1 DOSIS ÓPTIMA	37
5.4.1.2.2 CONCENTRACIÓN ÓPTIMA	38
5.4.1.2.3 PH ÓPTIMO	39
5.4.1.3 USO DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE. AGUA TIPO III: 212 UNT	40
5.4.1.3.1 DOSIS ÓPTIMA	40
5.4.1.3.2 CONCENTRACIÓN ÓPTIMA	41
5.4.1.3.3 PH ÓPTIMO	42
5.4.1.4 USO DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE. AGUA TIPO IV: 300 UNT	43
5.4.1.4.1 DOSIS ÓPTIMA	43
5.4.1.4.2 CONCENTRACIÓN ÓPTIMA	44
5.4.1.4.3 PH ÓPTIMO	45
5.4.1.5 USO DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE. AGUA TIPO V: 564 UNT	46
5.4.1.5.1 DOSIS ÓPTIMA	46
5.4.1.5.2 CONCENTRACIÓN ÓPTIMA	47
5.4.1.5.3 PH ÓPTIMO	48
5.4.1.6 USO DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE. AGUA TIPO VI: 742 UNT	49
5.4.1.6.1 DOSIS ÓPTIMA	49
5.4.1.6.2 CONCENTRACIÓN ÓPTIMA	50
5.4.1.6.3 PH ÓPTIMO	51
5.4.1.7 USO DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE. AGUA	

TIPO VII: 865 UNT	52
5.4.1.7.1 DOSIS ÓPTIMA	52
5.4.1.7.2 CONCENTRACIÓN ÓPTIMA.....	53
5.4.1.7.3 PH ÓPTIMA.	54
5.4.1.8 USO DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE. AGUA TIPO VIII:990 UNT	55
5.4.1.8.1 DOSIS ÓPTIMA	55
5.4.1.8.2 CONCENTRACIÓN ÓPTIMA.....	56
5.4.1.8.3 PH ÓPTIMA	57
5.4.1.9 USO DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE. AGUA TIPO IX:2313 UNT.....	58
5.4.1.9.1 DOSIS ÓPTIMA	58
5.4.1.9.2 CONCETRACIÓN ÓPRIMA	59
5.4.2 MÉTODO DE LA ELECTROCOAGULACIÓN	60
5.4.2.1 DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL PH.	60
5.4.2.1.1 PH ÓPTIMO. AGUA TIPO I: 21 UNT.....	61
5.4.2.1.2 PH ÓPTIMO. AGUA TIPO IV: 300 UNT	63
5.4.2.1.3 PH ÓPTIMO. AGUA TIPO V: 564 UNT	65
5.4.2.1.4 PH ÓPTIMO AGUA TIPO VIII: 990 UNT	67
5.4.2.1.5 PH ÓPTIMO. AGUA TIPO IX: 2313 UNT	69
5.4.2.2 USO DE LA ELECTROQUÍMICA. AGUA TIPO I: 21 UNT.....	71
5.4.2.3 USO DE LA ELECTROQUÍMICA. AGUA TIPO II: 135 UNT	74
5.4.2.4 USO DE LA ELECTROQUÍMICA. AGUA TIPO III: 212 UNT.....	77
5.4.2.5 USO DE LA ELECTROQUÍMICA. AGUA TIPO IV: 300 UNT.	80
5.4.2.6 USO DE LA ELECTROQUÍMICA. AGUA TIPO V: 564 UNT	83
5.4.2.7 USO DE LA ELECTROQUÍMICA. AGUA TIPO VI: 742 UNT	86
5.4.2.8 USO DE LA ELECTROQUÍMICA. AGUA TIPO VII: 865 UNT	89
5.4.2.9 USO DE LA ELECTROQUÍMICA. AGUA TIPO VIII: 990 UNT	92
5.4.2.10 USO DE LA ELECTROQUÍMICA. AGUA TIPO IX: 2313 UNT.....	95
5.4.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	99
5.4.3.1 COSTO DE INSUMOS QUÍMICOS PARA EL TRATAMIENTO EMPLEANDO EL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE	101
5.4.3.2 COSTO ENERGÉTICO EN EL TRATAMIENTO EMPLEANDO CORRIENTE ELÉCTRICA PARA EL PROCESO DE LA ELECTROCOAGULACIÓN	104

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	108
6.1 CONCLUSIONES GENERALES.....	108
6.2 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS.....	111
6.2.1 RESPECTO DE LOS MÉTODOS DE LA COAGULACIÓN QUÍMICA Y DE LA ELECTROCOAGULACIÓN	111
6.2.2 RESPECTO DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LOS MÉTODOS DE COAGULACIÓN QUÍMICA Y DE LA ELECTROCOAGULACIÓN	115
6.3 RECOMENDACIONES	117
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	119
ANEXOS	121

DEFINICIONES

- **AVENIDAS**

Es definida como el incremento del escurrimiento de un curso de agua debido a las precipitaciones.

- **AGUA SUPERFICIAL**

Aquella agua que circula por la superficie del suelo, producida bien por escorrentía de las precipitaciones o por afloramiento.

- **ESTIAJE**

Se denomina así al período en que los caudales de los cursos fluviales disminuyen debido a la escasez de las precipitaciones.

- **ELECTROCOAGULACION**

Es un proceso de desestabilización de los contaminantes del agua ya estén en suspensión, emulsionados o disueltos, mediante la acción de corriente eléctrica directa de bajo voltaje y por la acción de electrodos metálicos de sacrificio, normalmente aluminio/hierro.

- **ELECTROLISIS**

Es un proceso en el que el paso de la corriente eléctrica a través de una disolución o a través de un electrolito fundido, da como resultado una reacción de oxidación – reducción (redox), no espontánea.

- **FILTRACION DIRECTA**

Alternativa para tratamiento de agua con la finalidad de formar microfloculos donde los procesos involucrados son mezcla rápida y filtración. Sugerido para aguas que el 90% del tiempo presenten turbiedades por debajo de 20 UNT por ser un sistema sensible a las variaciones de turbiedad y color.

- **PRUEBA DE JARRAS**

Método de simulación de los procesos de coagulación y floculación realizados a nivel de laboratorio que permite obtener agua de buena calidad fácilmente separable por decantación. Tiene como objetivo determinar las variables físicas y químicas de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, tales como: selección del coagulante, selección del PH óptimo; gradientes y tiempos de mezcla rápida y floculación y correlación de las velocidades de sedimentación y eficiencia de remoción.

- **SULFATO DE ALUMINIO**

Es un coagulante sintético utilizado en el tratamiento de aguas, químicamente formulada como $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$. La reacción del sulfato de aluminio y la alcalinidad natural es instantánea y debe producirse en toda la extensión de la masa líquida.

- **TURBIEDAD**

Parámetro importante en la calidad de agua, pues indica la concentración de partículas en suspensión basado en la medición del efecto de la dispersión de la luz de estas partículas. La medición de la turbiedad se considera el parámetro más importante en el control de la efectividad de los coagulantes.

- **CONDUCTIVIDAD**

Propiedad física que está presente en algunos cuerpos, materiales o elementos y que hace que los mismos sean capaces de conducir a través de ellos a la electricidad o al calor. Es decir, aquellos materiales conductores de electricidad o de calor tienen la facilidad de dejar pasar libremente a través de ellos a la corriente eléctrica.

- **ALCALINIDAD**

La alcalinidad es la capacidad tampón del agua; la capacidad del agua de neutralizar. La alcalinidad estabiliza el agua en los niveles del pH alrededor de 7. Sin embargo, cuando la acidez es alta en el agua la alcalinidad disminuye, puede causar condiciones dañinas para la vida acuática. Se expresa en $mg/l.CaCO_3$ o en $ppmCaCO_3$

- **HUAICOS**

Son avenidas periódicas que todos los años se presentan en las laderas de los valles interandinos entre 1000 y 3000 m.s.n.m. debido a fuertes lluvias después de un período largo de sequía, movilizándolo un material heterogéneo de lodo y rocas con movimiento de lento a rápido y cuyos efectos a veces son destructores (Martínez, 1976).

SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

AWWA:

American Water Works Association

UTN:

Unidad de Turbiedad Nefelométrica. Es la unidad de medida de la turbiedad.

EC:

Iniciales de la electrocoagulación.

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Procesos involucrados en el proceso de la EC.....	12
FIGURA 2. Celda de EC bach definida por sus tres zonas típicas	16
FIGURA 3. Equipo de Prueba de Jarras modelo PHIPPS & BIRD	18
FIGURA 4. De izq. a der. Turbidímetro HACH 2100Q y Turbidímetro HACH 2100N.....	19
FIGURA 5. Balanza analítica SHIMADZU AY 120	19
FIGURA 6. Fuente de poder o fuente de alimentación digital UNI-T UTP-3315TFL, corriente continua DC 0-30V y de 0-5A.....	20
FIGURA 7. Reactor bach de electrocoagulación con dimensiones de 20 x 15 x 20cm.	20
FIGURA 8. El alumbre o sulfato de aluminio granulado, presenta un tono marrón claro	21
FIGURA 9. Los vasos precipitados y su trabajo en el desarrollo en la prueba de jarras	21
FIGURA 10. Los deflectores influyen en forma decisiva en la eficiencia del ensayo de sedimentación.....	22
FIGURA 11. El sifón de vidrio descansa sobre la estabilidad del tecnopor para el muestreo	22
FIGURA 12. De borosilicato, con pico, con espesor de pared uniforme.....	23
FIGURA 13. De capacidad de 20 ml, las agujas permiten cargar hasta el más mínimo volumen de coagulante de los vasos de 50 ml.....	23
FIGURA 14. Agua destilada en piceta	24
FIGURA 15. Fiola de 100 ml.....	24

FIGURA 16. Electrodo distribuido alternadamente como Fe y Al (04 de Fe y 04 de Al)	25
FIGURA 17. Curva de dosis de sulfato de aluminio para agua tipo I: 21 UNT	35
FIGURA 18. Curva de concentración de sulfato de aluminio. Agua tipo I: 21 UNT	36
FIGURA 19. Curva pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo I: 21 UNT	37
FIGURA 20. Curva de dosis de sulfato de aluminio. Agua tipo II: 135 UNT	38
FIGURA 21. Curva de concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo II: 135 UNT	39
FIGURA 22. Curva pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo II: 135 UNT	40
FIGURA 23. Curva de dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo III: 212 UNT	41
FIGURA 24. Curva de concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo III: 212 UNT	42
FIGURA 25. Curva de pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo III: 212 UNT	43
FIGURA 26. Curva de dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo IV: 300 UNT	44
FIGURA 27. Curva de concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo IV: 300 UNT	45
FIGURA 28. Curva de pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo IV: 300 UNT	46
FIGURA 29. Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo V: 564 UNT	47
FIGURA 30. Curva concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo V: 564 UNT.	48
FIGURA 31. Curva de pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo V: 564 UNT ...	49
FIGURA 32. Curva de dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VI: 742 UNT	50
FIGURA 33. Curva de concentración óptima sulfato de aluminio. Agua tipo VI: 742 UNT	51
FIGURA 34. Curva de pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo VI: 742 UNT ...	52
FIGURA 35. Curva de la dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VII: 865 UNT	53
FIGURA 36. Curva de concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VII: 865 UNT	54
FIGURA 37. Curva de pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo VII: 865 UNT	55

FIGURA 38. Curva de dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VIII: 990 UNT	56
FIGURA 39. Curva de concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VIII: 990 UNT	57
FIGURA 40. Curva pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo VIII: 990 UNT	58
FIGURA 41. Curva de dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo IX: 2313 UNT	59
FIGURA 42. Curva de concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo IX: 2313 UNT	61
FIGURA 43. Curvas de eficiencia del pH respecto de las mejores amperajes. Agua tipo I: 21 UNT	63
FIGURA 44. Curvas de eficiencia del pH respecto de las mejores amperajes. Agua tipo IV:300 UNT	65
FIGURA 45. Curvas de eficiencia del pH respecto de las mejores amperajes. Agua tipo V: 564 UNT	67
FIGURA 46. Curvas de eficiencia del pH respecto de las mejores amperajes. Agua tipo VIII: 990 UNT	69
FIGURA 47. Curvas de eficiencia del pH respecto de las mejores amperajes. Agua tipo IX: 2313 UNT	71
FIGURA 48. Remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo I: 21 UNT ...	74
FIGURA 49. Porcentaje de remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo I: 21 UNT	74
FIGURA 50. Remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo II: 135 UNT	77
FIGURA 51. Porcentaje remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo II: 135 UNT.....	77
FIGURA 52. Remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo III: 212 UNT	80
FIGURA 53. Porcentaje remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo III: 212 UNT.....	80
FIGURA 54. Remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo IV: 300 UNT	83
FIGURA 55. Porcentaje remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo IV: 300 UNT	83
FIGURA 56. Remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo V: 564 UNT	86
FIGURA 57. Porcentaje remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua	

tipo V: 564 UNT	86
FIGURA 58. Remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo VI: 742 UNT	89
FIGURA 59. Porcentaje remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo VI: 742 UNT	89
FIGURA 60. Remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo VII: 865 UNT	92
FIGURA 61. Porcentaje remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo VII: 865 UNT	92
FIGURA 62. Remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo VIII: 990 UNT	95
FIGURA 63. Porcentaje remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo VIII: 990 UNT	95
FIGURA 64. Remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo IX: 2313 UNT	98
FIGURA 65. Porcentaje remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo IX: 2313 UNT	98
FIGURA 66. Resumen de los tiempos eficientes de tratamiento respecto al tipo de agua para el proceso de la electrocoagulación.....	99
FIGURA 67. Resumen de turbiedades finales de tratamiento respecto al tipo de agua para el proceso de la electrocoagulación.....	99
FIGURA 68. Resumen del costo producido por el sulfato de aluminio	105
FIGURA 69. Costo producido por corriente eléctrica en el,proceso de la EC	109
FIGURA 70. Costo de cada tipo de tratamiento respecto del tipo de agua.....	117

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. Actividad y Recursos Humanos en la investigación.	17
TABLA 2. Presentación de dosis en un rango de valores posibles típicos al 1%.....	27
TABLA 3. Ejemplo de presentación de la concentración en un rango de valores típicos	29
TABLA 4. Presentación típica del pH en un rango de valores tentativos	30
TABLA 5. Descripción de parámetros medición en las muestras de agua	31
TABLA 6. Caracterización de las muestras de agua según turbiedad y respecto a la metodología empleada.....	33
TABLA 7. Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo I: de 21 UNT	34
TABLA 8. Concentración óptima de sulfato de aluminio para agua tipo I: 21 UNT ..	35
TABLA 9. pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo I: 21 UNT	36
TABLA 10. Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo II: 135 UNT	38
TABLA 11. Concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo II: 135 UNT ...	39
TABLA 12. pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo II: 135 UNT	40
TABLA 13. Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo III: 212 UNT	41
TABLA 14. Concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo III: 212 UNT ...	42
TABLA 15. pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo III: 212 UNT	43
TABLA 16. Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo IV: 300 UNT	44
TABLA 17. Concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo IV: 300 UNT ..	45
TABLA 18. pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo IV: 300 UNT.....	46
TABLA 19. Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo V: 564 UNT	47
TABLA 20. Concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo V: 564 UNT ...	48
TABLA 21. pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo V: 564 UNT	49
TABLA 22. Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VI: 742 UNT	50
TABLA 23. Concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VI: 742 UNT ..	51
TABLA 24. pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo VI: 742 UNT.....	52
TABLA 25. Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VII: 865 UNT	53
TABLA 26. Concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VI: 865 UNT ..	54
TABLA 27. pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo VII: 865 UNT	55
TABLA 28. Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VIII: 990 UNT	56
TABLA 29. Concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VI: 990 UNT ..	57
TABLA 30. pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo VIII: 990 UNT.....	58
TABLA 31. Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo IX: 2313 UNT	59
TABLA 32. Concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo IX:	

2313 UNT	60
TABLA 33. Remoción de turbiedad mediante las variaciones del pH y amperaje. Agua tipo I: 21 UNT	62
TABLA 34. pH óptimo según tipo de amperaje. Agua tipo I: 21 UNT	63
TABLA 35. Remoción de turbiedad mediante las variaciones del pH y amperaje. Agua tipo IV: 300 UNT	64
TABLA 36. pH óptimo según tipo de amperaje. Agua tipo IV:300 UNT	65
TABLA 37. Remoción de turbiedad mediante las variaciones del pH y amperaje. Agua tipo V: 564 UNT	66
TABLA 38. pH óptimo según tipo de amperaje. Agua tipo V: 564 UNT	67
TABLA 39. Remoción de turbiedad mediante las variaciones del pH y amperaje. Agua tipo VIII: 990 UNT	68
TABLA 40. pH óptimo según tipo de amperaje. Agua tipo VIII: 990 UNT	69
TABLA 41. Remoción de turbiedad mediante las variaciones del pH y amperaje. Agua tipo IX: 2313 UNT	70
TABLA 42. pH óptimo según tipo de amperaje. Agua tipo IX: 2313 UNT	71
TABLA 43. . Remoción de turbiedad a través del tiempo para agua tipo I: 21UNT a 1 amperio.....	72
TABLA 44. Remoción de turbiedad a través del tiempo para agua tipo I: 21UNT a 3 amperios.....	73
TABLA 45. Remoción de turbiedad a través del tiempo para agua tipo I: 21UNT a 5 amperios.....	73
TABLA 46. . Remoción de turbiedad a través del tiempo para agua tipo II: 135 UNT a 1 amperio.....	75
TABLA 47. Remoción de turbiedad a través del tiempo para agua tipo II: 135 UNT a 3 amperios.....	76
TABLA 48. Remoción de turbiedad a través del tiempo para agua tipo II: 135 UNT a 5 amperios.....	76
TABLA 49. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo III: 212 UNT a 1 amperios.....	78
TABLA 50. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo III: 212 UNT a 3 amperios.....	79
TABLA 51. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo III: 212 UNT a 5 amperios.....	79
TABLA 52. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo IV: 300 UNT a 1 amperio.....	81
TABLA 53. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo IV:	

300 UNT a 3 amperios.....	82
TABLA 54. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo IV: 300 UNT a 5 amperios.....	82
TABLA 55. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo V: 564 UNT a 1 amperio.....	84
TABLA 56. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo V: 564 UNT a 3 amperios.....	85
TABLA 57. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo V: 564 UNT a 5 amperios.....	85
TABLA 58. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo VI: 742 UNT a 1 amperio.....	87
TABLA 59. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo VI: 742 UNT a 3 amperios.....	88
TABLA 60. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo VI: 742 UNT a 5 amperios.....	88
TABLA 61. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo VII: 865 UNT a 1 amperio.....	90
TABLA 62. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo VII: 865 UNT a 3 amperios.....	91
TABLA 63. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo VII: 865 UNT a 5 amperios.....	91
TABLA 64. Remoción de la turbiedad en el tiempo. Agua tipo VIII: 990 UNT a 1 amperio.....	93
TABLA 65. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo VIII: 742 UNT a 3 amperios.....	94
TABLA 66. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo VIII: 990 UNT a 5 amperios.....	94
TABLA 67. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo IX: 2313 UNT a 1 amperio.....	96
TABLA 68. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo IX: 2313 UNT a 3 amperios.....	97
TABLA 69. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo IX: 2313 UNT a 5 amperios.....	97
TABLA 70. Costos de insumos para cada tipo de tratamiento.....	100
TABLA 71. Resumen de consumos para cada tipo de agua tratada por la EC.....	101
TABLA 72. Resumen del costo de sulfato de aluminio.....	104

TABLA 73. Resumen del costo de la electrocoagulación debido a la corriente eléctrica	109
TABLA 74. Evolución de la remoción de la turbiedad respecto al tipo de tratamiento. Agua tipo I: 21 UNT	112
TABLA 75. Evolución de la remoción de la turbiedad respecto al tipo de tratamiento. Agua tipo II: 135 UNT	113
TABLA 76. Evolución de la remoción de la turbiedad respecto al tipo de tratamiento. Agua tipo III: 212 UNT	113
TABLA 77. Evolución de la remoción de la turbiedad respecto al tipo de tratamiento. Agua tipo IV: 300 UNT	114
TABLA 78. Evolución de la remoción de la turbiedad respecto al tipo de tratamiento. Agua tipo V: 564 UNT	114
TABLA 79. Evolución de la remoción de la turbiedad respecto al tipo de tratamiento. Agua tipo VI: 742 UNT	114
TABLA 80. Evolución de la remoción de la turbiedad respecto al tipo de tratamiento. Agua tipo VII: 865 UNT	115
TABLA 81. Evolución de la remoción de la turbiedad respecto al tipo de tratamiento. Agua tipo VIII: 990 UNT	115
TABLA 82. Evolución de la remoción de la turbiedad respecto al tipo de tratamiento. Agua tipo IX: 2312 UNT	116
TABLA 83. Resumen de valores de remoción de turbiedad y tiempo de retención.....	117
TABLA 84. Resumen de costos por tipo tratamiento.....	118
TABLA 85. Consumo promedio mensual según tipo de usuario	119

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 01	123
ANEXO 02	124
ANEXO 03	125
ANEXO 04	126
ANEXO 05	127

RESUMEN

La electrocoagulación se ha usado para tratar diferentes tipos de agua; pero en el uso para consumo humano es una buena oportunidad para aprovecharla por todos los antecedentes teóricos y los aplicados al estudio del tratamiento que tiene. Aunque en el Perú el desarrollo de su investigación y aplicación es incipiente.

Se hizo el estudio de la tecnología mediante un reactor de electrocoagulación usando aguas claras del río Rímac, 10- 30 UNT aproximadamente y analizado a través del crecimiento progresivo de la turbiedad del agua hasta 1000 UNT. Nuestro parámetro de lectura de la electrocoagulación fue la turbiedad respecto del tiempo y se contrastó con los resultados de la coagulación química (usando el sulfato de aluminio tipo B) mediante el método de la prueba de jarras, para tener una referencia de evaluación más realista. Se tuvo en cuenta el pH, conductividad, volumen de agua muestra de 5.6 litros y una fuente de poder que nos suministró amperajes de estudio de 1A, 3A y 5A, manteniéndose constante el volumen de la celda (5.6 litros), separación entre placas (1 cm) y las 04 pares de placas hierro-aluminio. El comportamiento y eficiencia del proceso fue leído mediante gráficos de turbiedad final-tiempo, porcentaje remoción final-tiempo y las curvas eficientes de amperaje.

Salvo las aguas tipo I: 21 UNT, tipo II: 135 UNT, tipo III: 212 UNT y tipo IV: 300 UNT que fueron las que se encontraron en el río y no se alteraron para el estudio, los demás tipos de agua (V, VI, VII, VIII y IX) tuvieron que ser preparadas previamente para poder alcanzar turbiedades superiores a la turbiedad del río Rímac. El procedimiento para obtener los restantes tipos de agua mayores a 300 UNT fue añadir arcilla comercial al agua del río hasta alcanzar las turbiedades deseadas para el estudio.

Los resultados, agua tipo I: 21 UNT, tipo II: 135 UNT, tipo III: 212 UNT y tipo IV: 300 UNT, mediante la coagulación química nos dieron resultados típicos cuando se usa el sulfato de aluminio, tipo B, como coagulante. Valores de dosis, concentración y pH ocurrieron para dosis entre 25 y 45 mg/l, concentraciones de 1%, a pH natural y turbiedades finales entre 1.16 y 2.10 UNT. En el agua tipo V: 564 UNT la dosis aumentó, debido a la mayor cantidad de partículas en suspensión, con 80 mg/l; pero conservando el mismo valor de concentración, pH natural y turbiedad final de 1.90 UNT. Los cambios empezaron aparecer en los restantes tipos de agua como tipo VI: 742 UNT, tipo VII: 865 UNT, tipo V III: 990 UNT y tipo IX: 2313 UNT. Dosis altas entre 70 mg/l y 100 mg/l, concentraciones entre 2.5% y 5%, pH natural. El agua tipo IX: 2313 UNT es aún más

notorio el aumento en su dosis de 180 mg/l, concentración de 10% y turbiedad final de 66.2 UNT.

Para la electrocoagulación la remoción final de turbiedad en todos los tipos de agua tratada se presentaron entre 10 y 20 UNT; pero con tiempos de tratamiento distintos. Es decir, para turbiedades altas, mayor tiempo de tratamiento y de corriente; y cuando fue disminuyendo la turbiedad del agua a tratar, el tiempo de tratamiento y la corriente también lo hicieron. Incluso una turbiedad tan alta como la de tipo IX: 2313 UNT con 5 amperios de tratamiento la remoción final de turbiedad alcanzó los 16.5 UNT en 35 minutos.

En el análisis comparativo técnico de ambos procesos, la coagulación química mostró mejores resultados para aquellos ocho primeras tipos de agua (desde 21 a 990 UNT). Sólo en el agua tipo IX: 2313 UNT la electrocoagulación presentó mejores resultados (16.5 UNT en 40 minutos).

El tema económico, los costos respecto al uso del sulfato de aluminio y de la corriente eléctrica para los tratamientos por coagulación química y de la electrocoagulación respectivamente, presentaron valores similares en turbiedades menores, 21 UNT; en turbiedades mayores, 564, 742, 865 y 990 UNT, costos más económico para la EC; turbiedades intermedias, 135, 212 y 300 UNT, los costos favorecieron mejor al tratamiento fisicoquímico. En el agua tipo IX: 2313 UNT los costos por tratamiento mediante la electrocoagulación presentaron gran diferencia: 0.55 S./ respecto a los 3.24 S./ por m³ de agua tratada en el caso de usar estrictamente el sulfato de aluminio como remoción de turbiedad.

ABSTRACT

Electrocoagulation has been used to treat different types of water; but in the use for human consumption it is a good opportunity to take advantage of it for all the theoretical antecedents and applied to the study of the treatment that it has. Although in Peru the development of its research and application is incipient.

The study of the technology was made by means of an electrocoagulation reactor using clear waters of the Rímac River, approximately 10-30 UNT and analyzed through the progressive growth of water turbidity up to 1000 NTU. Our electrocoagulation reading parameter was turbidity with respect to time and was compared with the results of the chemical coagulation (using type B aluminum sulphate) by means of the jar test method, to have a more realistic evaluation reference. The pH, conductivity, sample water volume of 5.6 liters and a power source that supplied us with study amps of 1A, 3A and 5A were taken into account, keeping the volume of the cell constant (5.6 liters), separation between plates (1 cm) and the 04 pairs of iron-aluminum plates. The behavior and efficiency of the process was read by graphs of final turbidity-time, percentage final-time removal and efficient curves of amperage.

Except for type I waters: 21 UNT, type II: 135 UNT, type III: 212 UNT and type IV: 300 UNT that were found in the river and were not altered for the study, the other types of water (V, VI, VII, VIII and IX) had to be prepared previously to be able to reach turbidities superior to the turbidity of the Rímac river. The procedure to obtain the remaining types of water greater than 300 NTU was to add commercial clay to the river water until reaching the desired turbidity for the study.

The results, water type I: 21 UNT, type II: 135 UNT, type III: 212 UNT and type IV: 300 UNT, through chemical coagulation gave us typical results when using aluminum sulphate, type B, as a coagulant. Values of dose, concentration and pH occurred for doses between 25 and 45 mg / l, concentrations of 1%, at natural pH and final turbidity between 1.16 and 2.10 UNT. In water type V: 564 UNT the dose increased, due to the greater amount of particles in suspension, with 80 mg / l; but keeping the same concentration value, natural pH and final turbidity of 1.90 UNT. The changes began to appear in the remaining types of water as type VI: 742 UNT, type VII: 865 UNT, type VIII: 990 UNT and type IX: 2313 UNT. High doses between 70 mg / l and 100 mg / l, concentrations between 2.5% and 5%, natural pH. Water type IX: 2313 UNT is even more notorious the increase in its dose of 180 mg / l, concentration of 10% and final turbidity of 66.2 UNT.

For electrocoagulation the final turbidity removal in all types of treated water was between 10 and 20 NTU; but with different treatment times. That is, for high turbidity, longer treatment time and current; and when the turbidity of the water to be treated was decreasing, the treatment time and the current also did. Even a turbidity as high as that of type IX: 2313 UNT with 5 amps of treatment the final turbidity removal reached 16.5 NTU in 35 minutes.

In the technical comparative analysis of both processes, the chemical coagulation showed better results for those eight first types of water (from 21 to 990 UNT). Only in water type IX: 2313 UNT electrocoagulation showed better results (16.5 UNT in 40 minutes).

The economic issue, the costs regarding the use of aluminum sulphate and the electric current for treatments by chemical coagulation and electrocoagulation respectively, presented similar values in lower turbidity, 21 NTU; in larger turbidities, 564, 742, 865 and 990 UNT, costs more economical for the EC; intermediate turbidity, 135, 212 and 300 UNT, the costs favored the physicochemical treatment better. In water type IX: 2313 UNT the costs for treatment by electrocoagulation presented a great difference: 0.55 S. / respect to 3.24 S. / per m³ of treated water in the case of strictly using aluminum sulphate as turbidity removal.

CAPITULO I. INTRODUCCION

El agua disponible como recurso para atender las necesidades de las poblaciones se ha convertido en un factor importante en la mayoría de países del orbe. Sobre todo porque en estas dos últimas décadas la demanda mundial ha aumentado y el agua para abastecimiento de consumo humano ha disminuido significativamente producto del calentamiento global.

Ante tal desafío las instituciones y la ciencia deben desarrollar mecanismos que permitan responder y atender dicha necesidad en base a un agua de calidad.

Dentro de los varios usos del agua el de consumo humano, es el más importante. Y cómo es el más importante, su calidad demanda una exigencia que la ciencia constantemente deberá resolver mediante nuevos tratamientos o mejorando lo existente.

Precisamente la electrocoagulación es un tratamiento, cuya patente y principio científico data de 1909, pero con un potente desarrollo en los últimos años debido a sus importantes ventajas. Dichas ventajas que están comenzando a responder a tal uso, debido al avance científico a través del mejoramiento de los materiales, disponibilidad de equipos electrónicos y una mejor obtención de fuentes energéticas renovables que han conseguido que los costos de instalación, operación y mantenimiento permitan viabilizar el proceso de electrocoagulación.

La electrocoagulación tiene como principio natural para tratamiento de las aguas el fenómeno de la electrólisis el cual es usado, de manera eficaz, para la remoción de muchos agentes tóxicos o que limitan la calidad de las aguas. La electrocoagulación es un proceso complejo, donde interviene diversos fenómenos químicos y físicos, que usan electrodos consumibles (Fe/Al), que suministran iones al flujo de aguas residuales. (Mollah et al., 2004).

En esencia un reactor de electrocoagulación es una celda electroquímica en la que un ánodo de metal de sacrificio, por lo general de aluminio pero ocasionalmente hierro, se utiliza para dosificar el agua contaminada con un agente coagulante (Holt et al, 2005).

En la electrocoagulación, el electrodo está diseñado para ser sacrificado (Russell, 2012). La electrocoagulación introduce cationes metálicos in situ en lugar de la dosificación externa. Al mismo tiempo los gases electrolíticos (típicamente hidrógeno) son generados en el cátodo (Holt et al, 2005).

En la actualidad, las tecnologías electroquímicas han alcanzado tal estado que no son sólo comparables con otras tecnologías en términos de costo, sino también son más

eficientes y más compacto. Para algunas situaciones, la tecnología electroquímica puede ser el paso indispensable en el tratamiento de aguas residuales que contienen contaminantes refractarios (Chen, 2003).

Esta investigación va a poner a prueba la electrocoagulación en el tratamiento de aguas superficiales con una alta carga de turbiedad que es característica de gran parte de los ríos del Perú. Los huaycos, aparte de ser un desastre natural, es realmente un verdadero problema al momento de intentar tratarlo para su consumo humano. Muchos pueblos de los distritos de Lima, por citar a la ciudad más importante del Perú, sufren la escasez de agua potable por tan alta carga de turbiedad.

Las conclusiones finales de esta tesis esperan dar un avance en el tratamiento de aguas para consumo humano y en la mejora y comprensión del proceso de electrocoagulación como una tecnología viable.

1.1 ANTECEDENTES

J. R. Perozo C., R. L. Abreu C., del Departamento de Energética y Departamento de Química Universidad Nacional Experimental de Venezuela “Francisco de Miranda” Falcón de Venezuela, 2017, realizaron estudios a escala de laboratorio usando agua cruda superficial y una celda electrolítica de capacidad de 1 litro, con electrodos de hierro, aluminio y acero inoxidable donde se producen hidróxidos de hierro y aluminio los cuales actúan como coagulantes. Se determinaron los porcentajes de remoción de color, turbidez y sólidos totales, para una configuración aluminio - acero inoxidable y para la segunda configuración hierro - acero inoxidable. Los resultados mostraron que las eficiencias en remoción de turbidez y color utilizando ánodo de aluminio fueron de un 40% a un 80% bajo las mejores condiciones de voltaje aplicado, separación entre los electrodos y tiempo de tratamiento.

E. Aguilar A., catedrático investigador del Instituto de Investigación Científica de la Universidad de Lima (IDIC), Lima. 2014, en su investigación buscó determinar la eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de la turbiedad de las aguas del río Rímac, así como identificar las principales variables que intervienen en el proceso: pH, intensidad de corriente, conductividad y tiempo de tratamiento.

Se utilizaron muestras de agua del río Rímac con tres turbiedades: 60, 122 y 312 UNT, monitoreadas en un punto cercano a la bocatoma de la planta de tratamiento de agua de la Atarjea y sometido a diferentes intensidades de corriente, así como a variaciones en su pH natural para mejorar la eficiencia del proceso.

Las remociones de turbiedad en los 3 tipos de agua tuvieron porcentajes superiores al 90 %. En el agua de 312 UNT se obtuvo el mejor resultado con un pH natural de 8,24, una intensidad de corriente de 5 amperios y un tiempo de tratamiento de 15 minutos.

M. Piña S., A. Martín D., C.A. González R., F. Prieto G., A. Guevara L. y J.E. García E., del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Jiutepec; de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), Centro de Investigaciones Químicas, Pachuca de Soto de la unidad de postgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, México. En el 2010, presentaron una revisión bibliográfica sobre los fundamentos teóricos más importantes de la electrocoagulación, donde se analizan algunos diseños y se muestran los resultados más relevantes al aplicarla al tratamiento de agua para la remoción de diversos contaminantes de origen orgánico e inorgánico. Entre algunas aplicaciones de la electrocoagulación se encuentra la clarificación de aguas residuales con fines de potabilización, Chen y col. (2002).

1.2 HIPÓTESIS

El proceso de electrocoagulación removerá altas turbiedades en el tratamiento de aguas superficiales.

Para ello nuestra variable de factor cambiante será el amperaje y el pH, medido en amperio (A) cuyo efecto directo será sobre la variable experimental de la turbiedad, medida en unidades nefelométricas de turbiedad (UNT).

En esta investigación, los parámetros de separación (1cm) y tipo de material (fierro y aluminio), de los electrodos; y volumen del reactor (5.6 litros) se han considerado constante, valores que han sido asumidos desde los antecedentes científicos, para poder estudiar a profundidad el comportamiento de las variables de corriente eléctrica y pH en los nueve tipos de agua de estudio.

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1 Descripción del problema

Las aguas superficiales son muy requerida porque es usada en muchas actividades humanas y en especial, el que es utilizada para consumo humano. El cual requiere tratamiento para superar las condiciones adversas de calidad para que se pueda disponer finalmente, como agua potable.

La turbidez alta en aguas superficiales es un problema porque va a condicionar el tratamiento físico químico cuando la turbiedad supera los 1000 UNT, por ejemplo. Turbiedad que las plantas de tratamiento convencionales de filtración rápida completa se les dificultan poder tratar sin un pretratamiento. El verano del 2017, época de avenidas, puso en evidencia este problema cuando los distritos y pueblos que dependen de la calidad del río Rímac para el consumo humano tuvieron que padecer la escasez del consumo de agua por 2 meses debido a las excesivas precipitaciones que devino en desastres naturales (o popularmente conocido como huaycos). E incluso el problema logró extenderse a la ciudad de Lima y sus distritos cuando la entidad administradora de agua potable tuvo que racionar el servicio por varios días. La entidad llego a tener mediciones, en la bocatoma de su planta de tratamiento, mayores 10,000 UNT de turbiedad (entre enero y marzo del 2017) en el río Rímac por largos períodos.

Algunas de las plantas convencionales de tratamiento de agua potable que están administradas por las EPS, no cuentan con unidades de pretratamiento y no pueden resolver este problema planteados líneas arriba.

1.3.2 Planteamiento del problema

Con el tiempo, cada vez se necesita mayor disponibilidad de agua para consumo humano y así, también de tecnologías que pueden responder a tal requerimiento. Teniendo al tratamiento convencional como responsable principal de la producción de agua potable en la gran mayoría de plantas de tratamiento de agua, estas presentan ciertos problemas respecto a la relación entre la remoción de turbiedad y la adición de sustancias químicas en sus procesos como cloro, coagulantes químicos, alguicidas y polímeros sintéticos, entre otros, que tendrá incidencia negativa en la salud si la remoción de turbiedad es ineficiente.

Ante tal escenario exigente en que se tiene por una parte una creciente disponibilidad de agua para consumo humano y por otra la de mejorar la calidad del agua, es que esta investigación pretende entregar conclusiones para la ingeniería de tratamiento de aguas superficiales para consumo humano. La tecnología de la electrocoagulación podría concluir que se puede alcanzar una disminución de coagulantes químicos, como el sulfato de aluminio considerando al proceso de la electrocoagulación como un proceso para el pre-tratamiento de aguas superficiales.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Es un hecho el aumento de la cantidad de contaminantes presentes en los cuerpos de agua. Esto ha generado un urgente estudio y aplicación de nuevas alternativas que atiendan las soluciones de manera eficiente, económica y accesible para las plantas de tratamiento de agua para consumo humano (Perozo et al., 2017).

En el entorno donde se desarrolla el tratamiento de las aguas, la electrocoagulación se ha presentado como una tecnología que ha empezado a tomar interés en las últimas décadas, aunque su desarrollo se llevó a cabo a principios del siglo pasado y fue patentada en los Estados Unidos en 1909. Las bases científicas de la electrocoagulación se apoyan sobre los fenómenos electroquímicos que pueden alcanzar resultados interesantes en su aplicación para el tratamiento de aguas, si se optimizaran los factores que lo definen, con el propósito de cuidar, preservar y recuperar el recurso hídrico. La electroquímica tiene una serie de ventajas que bajo ciertas condiciones puede alcanzar un proceso de tratamiento de calidad donde los desechos emitidos al medio ambiente se vean disminuidos a través del diseño y en donde se obtenga bajos índices en la cantidad de sus subproductos, de la materia prima y el consumo de energía. (Perozo et al., 2017).

1.5 OBJETIVOS

Objetivo General

- Determinar la eficiencia del proceso de electrocoagulación para la remoción de material coloidal de turbiedades altas presente en aguas superficiales.

Objetivos específicos

- Reducción de la turbidez presente en el agua superficial en estudio.
- Determinar el amperaje de diseño para distintos tipos de agua en el proceso de la electrocoagulación.
- Presentar una opción de pre-tratamiento del material coloidal presente en aguas superficiales.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 CALIDAD DEL AGUA

Definida respecto de sus características fisicoquímicas y bacteriológicas lo que permitirá dar un uso concreto.

Las características físicas u organolépticas son las que se perciben a través de los sentidos y tienen incidencia directa en las condiciones estéticas y de aceptabilidad del agua, siendo las principales: turbiedad, olor y sabor, color, temperatura, pH. (Claudio et al. 2017)

Las características químicas están relacionadas a la concentración de elementos químicos que puedan ser significativos en la salud del consumidor, siendo las más valoradas la acidez, alcalinidad, dureza, aluminio, hierro (Claudio et al. 2017).

En las plantas de tratamiento con regularidad son vigilados sustancias orgánicas e inorgánicas como cloruros, fluoruros, sodio, sulfato, nitratos y más de 120 componentes orgánicos y muchos de ellos se vigilan por razones de salud y otros más, por razones estéticas (Davis et al., 2005).

Las características microbiológicas ayudará a que el agua potable debe estar liberada de organismos patógenos (virus, bacterias, protozoarios y helmintos). Aunque tales organismos no se identifican con facilidad. Investigaciones más recientes establecen que los análisis específicos de E. Coli están garantizados (Davis et al., 2005).

2.2 CALIDAD DE AGUA DEL RÍO RÍMAC

La calidad del agua río Rímac es variable a través del año presentándose una composición marcadamente diferente en las épocas de alta turbiedad (época de avenida) y de baja o moderada turbiedad (época de estiaje). Para nuestra investigación, la descripción será para altas turbiedades (ver anexos 02 y 03).

ALTA TURBIEDAD

Condición del agua que ocurre en los meses de precipitaciones, entre diciembre y marzo, desarrollado por el río con un caudal variable. La calidad fisicoquímica del agua se presenta variable en su composición como, por ejemplo, en mayor cantidad de metales disueltos, compuestos orgánicos y sólidos suspendidos en un rango amplio de tamaños (Claudio et al., 2017)

Un caso especial de un tipo de agua superficial con alta turbiedad son los huaicos, el cual se genera cuando se supera la precipitación promedio, llamándose lluvia intensa. Así, se puede presentar como flujos torrenciales, fenómenos de remoción de masa del tipo de flujo rápido (Predes, 1985) o son una parte de los *debris flows*, movimientos rápidos de los derrubios de ladera provocados por una inundación repentina (Zaruba et al. 1969).

Sedapal establece que esta alta turbiedad que se tiene en esta época se encuentra variando de 50 a 5000 NTU (Andía, 2000).

2.3 COLOIDES

Son suspensiones estables, por lo que es imposible su sedimentación natural, son sustancias responsables de la turbiedad y del color del agua.

La estructura de los coloidales tiene una superficie de contacto bastante grande entre la fase sólida y la fase líquida. Así, si evaluamos 1 cubo de 1 cm³, tendríamos una superficie global de 6 cm²; si dividiéramos aún más en pequeños cubos elementales, la superficie total de todos estos sería más grande aún (Andía, 2000).

En aguas naturales los coloides son estables debido a que las superficies de las partículas presentan cargas iguales y este efecto provoca repelencia de partículas entre sí. Agregar que las partículas coloidales son tan pequeñas como para poder sedimentarse bien por gravedad. (Davis et al., 2005)

2.4 METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA

PROCESOS DE COAGULACION-FLOCULACIÓN

El procedimiento más comúnmente utilizado para la remoción de las partículas y parte de la materia orgánica disuelta es combinando coagulación y floculación seguida por los procesos de sedimentación y la filtración. La coagulación involucra el acondicionamiento de la materia suspendida, coloidal y disuelta al añadir sustancias coagulantes. La floculación por su parte, involucra la adición de partículas desestabilizadas para promover la formación de partículas más grandes llamados flóculos (Mihelcic et al., 2012).

Para el proceso de la coagulación con sulfato de aluminio para filtros, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14.3\text{H}_2\text{O}$ (el coagulante normal para tratamiento de agua), se presenta en tres etapas:

1. La ionización del sulfato de aluminio en el agua produce iones Al^{+3} y SO_4^{-2} . Algunos iones $\text{Al}(\text{OH})_3$ van a neutralizar la carga negativa de los colides.
2. Gran parte de iones Al^{+3} se combinarán con iones del agua (OH^-) formando coloides como $\text{Al}(\text{OH})_3$, adsorbiendo iones positivos de la solución:



3. Finalmente, el $\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{ac})}$ con carga positiva neutraliza los coloides negativos, y lo demás es neutralizado por el SO_4^{-2} dando productos de precipitado de $\text{Al}(\text{OH})_3$ y sulfatos adsorbidos (Henry et al., 1999).

PROCESOS DE FILTRACION RÁPIDA

Estructurado por los procesos de coagulación, decantación, filtración y desinfección. Respecto al proceso de coagulación se define en dos etapas: intensa agitación del agua para lograr dispersión inmediata de la sustancia coagulante en toda la masa de agua, que es la mezcla rápida; para continuar con una agitación lenta que promoverá la rápida aglomeración y formación del floculo, llamada etapa de floculación. (Vargas, 2004)

PROCESOS DE FILTRACION DIRECTA

Los procesos que lo definen involucran mezcla rápida y seguida por el proceso de filtración, con el objetivo de formar microflóculos. Es un proceso sensible a variaciones

de turbiedad y color, recomendándose para aguas en donde el 90 % del tiempo presente valores de turbiedades menores a 20 UNT (Claudio et al. 2017)

2.5 FACTORES DE INFLUENCIA EN LA COAGULACIÓN

Los factores con influencia importante para el proceso de coagulación-floculación en aguas superficiales son: temperatura, dosis óptima, PH óptimo, concentración óptima de coagulante y calidad del agua. Así, el agua más fácil de tratar es la que tiene alta concentración de coloides y la que se dificulta es la que tiene baja concentración de coloides (Claudio et al. 2017).

2.6 COAGULANTES

Se adiciona el coagulante para desestabilizar partículas y provocar la formación de partículas mayores llamados flóculos. Se presentan varios tipos de coagulantes como son el sulfato de aluminio, hidróxido de aluminio, cloruro de polialuminio, cloruro de hierro (III), sulfato de hierro (III) y cal. El sulfato de hierro (II) ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), conocido como melanterita. (Gray, 1994)

La cantidad de coagulante adicionada al agua es de carácter sensible. Es decir, poca cantidad resulta en una coagulación ineficiente dando pie a que los aparatos de filtración puedan bloquearse rápidamente, mientras que demasiado coagulante conlleva a un exceso de productos químicos presentes en el agua tratada. (Gray, 1994)

2.7 POLÍMEROS

Usados como ayudantes de los coagulantes primarios, son polímeros aniónicos, catiónicos (de polaridad bastante variable) o neutros. También pueden presentarse en polvo o como líquido. Su naturaleza es de un alto peso molecular, los de procedencia natural o sintético. Se necesitan ensayos previos de coagulación y floculación para su elección. (Barrenechea, 2004).

Los polímeros orgánicos, llamados también polielectrolitos, son moléculas de cadena larga de unidades químicas repetitiva y cuya estructura ofrece propiedades fisicoquímicas bastante distintas. De acuerdo a las investigaciones los polímeros orgánicos no se emplean como coagulantes principales (salvo la *moringa oleífera*), y

casi siempre su uso se remite después de que las partículas han sido desestabilizadas con coagulantes inorgánicos. (Howe et al. 2016)

2.8 PROCESO DE LA ELECTROCOAGULACIÓN

2.8.1 PRINCIPIO DE LA ELECTROCOAGULACIÓN

El fundamento de este proceso es generar especies coagulantes *in situ* por electrolitos mediante la oxidación de un electrodo de sacrificio ánodo la cual es sometida a una corriente eléctrica. La formación de iones metálicos provocado por la disolución electroquímica de un ánodo de sacrificio es expuesto espontáneamente a hidrólisis en agua produciendo una variedad de especies coagulantes que incluyen precipitados de hidrógeno (capaces de eliminar contaminantes de dos formas, por adsorción y sedimentación) y otras variedades de tipos de iones metálicos. (Hakizimana et. al 2016).

Es decir, la electrocoagulación emplea una fuente de poder que proporciona corriente continua a una distribución de electrodos metálicos sumergidos provocando la disolución de los ánodos de hierro o aluminio en el agua tratada. Así, dependiendo del pH, puede formar amplios rangos de especies coaguladas e hidróxidos metálicos que desestabilizan las partículas suspendidas (Elabbas et. al 2015).

Tales iones se generan en el ánodo, si fuera aluminio que es el empleado en esta investigación, en forma de Al^{3+} para combinarse con iones OH^- donado por el cátodo para formar varias especies monoméricas, que luego se transformarán en $Al(OH)_3$ sólido. Los “flocs de barrido” de $Al(OH)_{3(s)}$ amorfos recién formados presentan grandes áreas superficiales, que beneficiarán la rápida adsorción de compuestos orgánicos solubles y atrapamiento de partículas coloidales. (Elabbas et. al 2015).

La celda o reactor de electrocoagulación puede ser presentado mediante un proceso continuo o tipo batch. El reactor tipo batch es el más usado para los estudios del proceso y de sus variables de control a nivel de laboratorio (Arango et. al 2007). La presentación del reactor batch en su geometría más sencilla viene hacer una celda de base rectangular en la cual, los electrodos se distribuyen en forma de placas paralelas conectados en serie a una fuente de poder (Mollah, 2001)

Entonces, podríamos ya definir a la electrocoagulación, como Mollah en el 2004 lo había hecho: que fundamentalmente es un proceso electroquímico (Morales et al. 2011) el cual va a generar iones en disolución que agrupará la materia coloidal presente en el

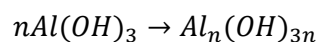
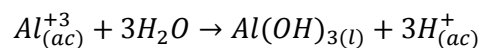
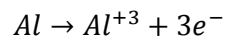
agua de tratamiento, permitiendo separarlo del agua mediante procesos convencionales de decantación y flotación (Martínez, 2008).

2.8.2 REACCIONES QUÍMICAS

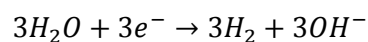
El paso de la corriente por medio de los electrodos va a generar compuestos coagulantes similares al de la coagulación química que son los hidróxidos insolubles, donde quedan retenidos los contaminantes y/o los hidróxidos catiónicos o aniónicos, que desestabilizan las fuerzas de repulsión electrostáticas presentes en la materia coloidal (Martínez, 2008).

Si tenemos una disposición de electrodos de aluminio-ferro, el proceso de la EC va entregar al agua iones Al^{+3} o Fe^{+2} que actuarán como coagulantes. Tales iones hidrolizados que forman largas cadenas de Al-OH-Al-OH (Aguilar, 2014), presentan las reacciones fisicoquímicas en una celda de electrocoagulación para el aluminio como ánodo de sacrificio:

En el ánodo:



En el cátodo:



El proceso de la electrocoagulación se desarrolla, ver figura 1 en tres etapas:

- 1) Formación del coagulante por oxidación electrolítica del metal en el ánodo (electrodo de sacrificio).
- 2) Desestabilización de contaminantes y emulsiones.
- 3) Producción de flóculos por agrupación de partículas del contaminante o adsorción en el flóculo de sustancias químicas presentes en la solución (Perozo et al. 2017).

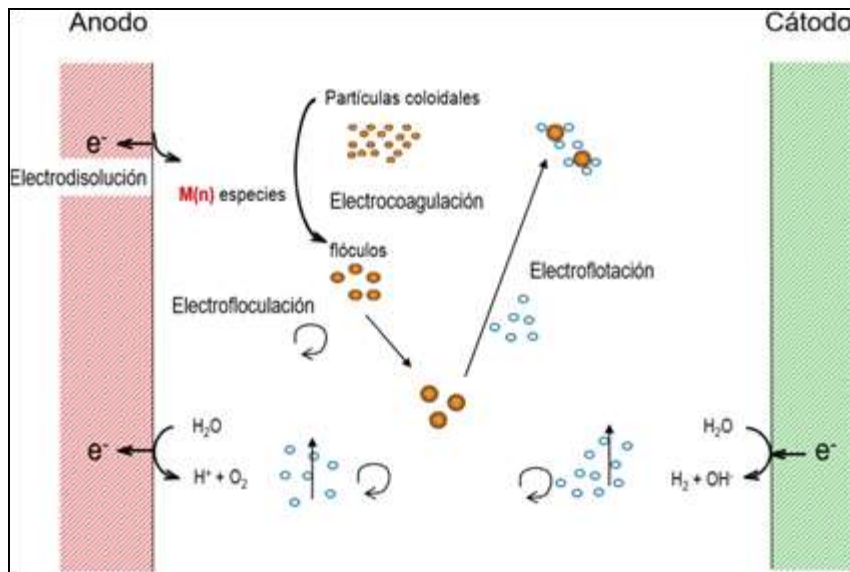


Figura 1. Procesos involucrados en el proceso de la EC. Fuente: Martínez, 2008.

La producción permanente de hidróxido de hierro por reacción del ánodo, permite la aglomeración de coloides (de carga negativa en mayor medida) que lograrán interactuar con las partículas contaminantes para finalmente ser dispuestos mediante la precipitación de hidróxidos metálicos o atracciones electrostáticas (Morales et al, 2011).

2.8.3 Factores de influencia en el proceso de la EC

Los factores que influyen en la eficiencia del proceso de la electrocoagulación a partir de investigaciones, se dan por el pH, tiempo de tratamiento, intensidad de corriente, conductividad, material de los electrodos y distancia entre electrodos (Perozo et al. 2017).

Separación entre electrodos

Definen la resistencia del sistema al paso de la corriente, y su consecuencia en los costos por consumo de energía (Piña et al. 2011). Para distancias mayores a 10 mm no representan cambios importantes para el proceso (Arango et. al 2007). En el trabajo de Aguilar del 2014 sobre el agua del río Rímac la separación elegida es de 10 mm.

Se puede definir entonces que a distancias menores de 10 mm, la remoción de contaminantes decae y el proceso se extiende aún más debido (Perozo et al. 2017) a que no hay circulación homogénea de los electrolitos coagulantes en toda celda por una separación de electrodos muy estrecha. En el caso de una distancia mayor a 10 mm, la

remoción de contaminantes no decae pero presenta un aumento de la corriente y el tiempo de tratamiento.

En el trabajo de Arango, definió para su investigación sobre el diseño de una celda de EC para el tratamiento de las aguas residuales de la industria láctea, el número de electrodos para un reactor de EC, suponiendo una separación máxima entre electrodos de 14 mm más 3 mm del espesor de placa, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$N^{\circ} \text{ electrodos} = \frac{(\text{ancho de celda}) - 2(\text{dist. electrodos a cara lateral})}{(\text{dist. máx. entre electrodos} + \text{espesor de placa})}$$

La distancia entre electrodos también va a definir el número de electrodos a colocar en la electrocoagulación (Hakizimana et al. 2016).

Sobre el pH

Esencial para el progreso de la coagulación y de todas las especies de metal hidrolizado generados por el proceso de la electrocoagulación (Hakizimana et al. 2016).

Se puede alcanzar una buena eficiencia de remoción de contaminantes si bajamos el pH y la corriente eléctrica (Arango, 2007). Los muchos estudios dan como conclusiones de sus investigaciones que un pH con una tendencia más ácida mejora la remoción de parámetros; pero esto no es estricto para todos los tipos de agua que necesitará primero, ser estudiada y evaluada para un correcto proceso.

Sobre la Conductividad del agua

Su influencia es importante en la eficiencia y consumo de la corriente eléctrica. Así, a mayor conductividad la corriente aumentará decidiendo también en el costo de energía (Hakizimana et al. 2016).

A baja conductividad del agua es frecuente la adición de algún electrolito soporte, por ejemplo NaCl, para aumentar su valor y así disminuir el voltaje. Sin embargo, existen algunas limitaciones sobre este punto. El aumento de la conductividad en el proceso de tratamiento de agua para consumo humano por electrocoagulación está sujeto a las normas de calidad de agua para cloruros (Hakizimana et al. 2016).

Sobre la corriente eléctrica

Es considerado una variable importante para el proceso de la electrocoagulación y que en muchos estudios está relacionada con el área superficial de los electrodos por lo que se le llama densidad de corriente. A corrientes mayores tendremos reactores más pequeños; pero tendrá que considerarse en cuenta el consumo energético para no encarecer el tratamiento, redispersión de partículas a partir de los flóculos formados y en el tiempo de vida efectivo de los electrodos (Hakizimana et al. 2016).

Material de los electrodos

La selección del material del electrodo está condicionado a la naturaleza y afinidad que presente el contaminante que se quiere remover con el coagulante generado por electrólisis (Piña, et al 2011). En el estudio sobre la evaluación de la EC en el tratamiento de agua potable hecho por Perozo en el 2017, concluyó que para el uso como ánodo por el aluminio fue de un 40-80%; pero los porcentajes con ánodo de hierro oscilan en un rango de 10-50%.

En el caso del uso de electrodos de aluminio como ánodo de sacrificio se desarrolla con éxito para la remoción de aceites, arsénico, cadmio y patógenos en aguas residuales (Piña et al. 2011); remoción de turbiedad en aguas superficiales para consumo humano (Aguilar, 2014).

Para el hierro como ánodo de sacrificio se usan más para la remoción de metales pesados, turbiedad y grasas en aguas residuales (Piña et al. 2011).

2.8.4 Condiciones fisicoquímicas del agua

Esta influye directamente con las condiciones de operación de la EC. La influencia de la conductividad (con efectos en los costos de tratamiento) y el pH (que incidirá en la eficiencia de la corriente y solubilidad de los hidróxidos) es muy importante, pero también se definen sobre el tiempo de retención, temperatura y la concentración de los contaminantes (Piña et al. 2011).

2.8.5 Celda de electrocoagulación

Diseño del reactor EC

De mucha importancia en los resultados obtenidos por el proceso de la electrocoagulación porque influirá en los parámetros de funcionamiento, en el régimen de flujo, promoción y desarrollo de flóculos, en los niveles de eliminación de contaminantes y en las características de flotación/sedimentación (Hakizimana et al. 2016). Normalmente, en los estudios de la EC tipo batch, el material de la celda es de vidrio o de acrílico. En esta investigación, la celda (rectangular y 6 litros de capacidad) fue elaborada de acrílico para conseguir la muy buena visibilidad del material en la observación del proceso, menor peso, mayor resistencia a impactos, fácil manejo y limpieza.

La geometría habitual del reactor de la electrocoagulación se presenta en forma cilíndrica, cúbica y rectangular paralelepípedo. Y cada diseño de celda tiene un ligero efecto sobre el rendimiento del proceso si estas se comparan entre sí (Hakizimana et al. 2016).

Presenta tres zonas o regiones bien definidas:

- 1) *Zona superior*. Que es el depósito de los lodos por flotación, lodos menos densos, y las espumas.
- 2) *Zona media*. Zona donde se encuentra los electrodos y se producen la gran variedad de reacciones electroquímicas.
- 3) *Zona inferior*. Lugar donde se desarrolla la sedimentación y donde se depositan los lodos más densos.

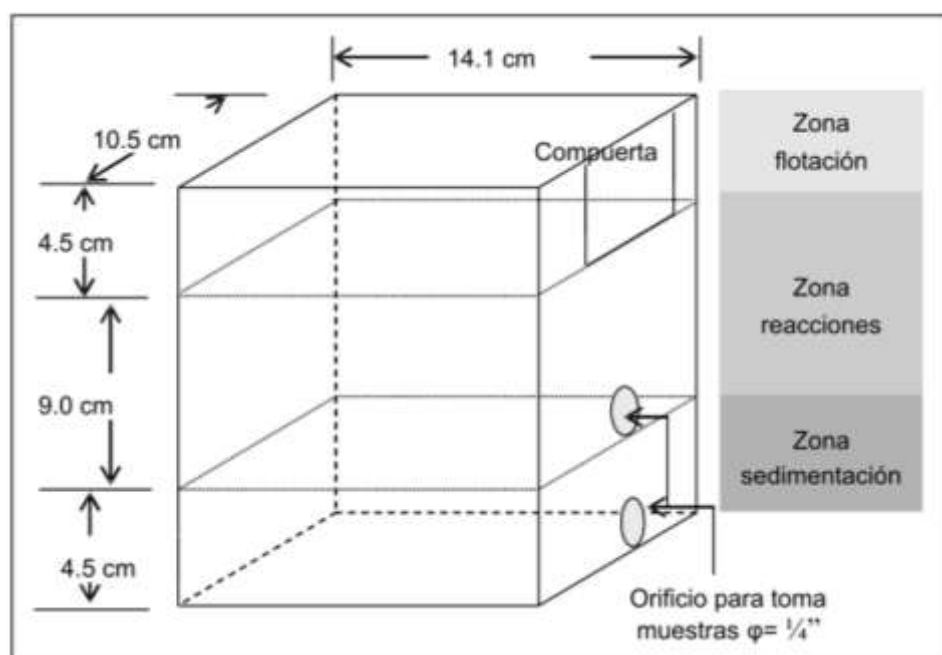


Figura 2. Celda de EC bach definida por sus tres zonas típicas. Fuente; Arango et al 2007.

CAPITULO III: MARCO NORMATIVO

3.1 Reglamentos de la Calidad del Agua para consumo humano.

3.1.1 DS N° 031-2010-SA: Reglamento de la calidad del Agua para Consumo Humano (2010)

Documento que define la gestión de la calidad del agua para consumo humano en sus diez (10) títulos, ochenta y un (81) artículos, doce (12) disposiciones complementarias, transitorias y finales, y cinco (05) anexos.

3.1.2 Ley N° 26842: Ley General de Salud (1997)

Reglamento de los requisitos oficiales físicos, químicos y bacteriológicos que deben reunir las aguas de bebida para ser consideradas potables.

3.1.3 Decreto Ley N° 17752: Ley General de Aguas (1969)

Uso I: Aguas de abastecimiento doméstico con simple desinfección.
Uso II, Aguas de abastecimiento doméstico con tratamiento

equivalentes a procesos combinados de mezcla, coagulación, sedimentación y cloración por el Ministerio de Salud.

3.2 Guías sobre calidad de agua para consumo humano

Guías de la OMS.

CAPITULO IV: RECURSOS EQUIPOS Y MÉTODOS

4.1 RECURSOS HUMANOS

El desarrollo de la presente tesis de investigación se realizó según las siguientes actividades y personas involucradas.

Tabla 01. Actividad y Recursos Humanos en la investigación

ACTIVIDAD	INTEGRANTE	UBICACIÓN
Recolección de agua superficial (2018: Abril-Noviembre)	Santos Cahuatico y colaborador	Río Rímac, Km 28 de la Carretera Central.
Determinación de parámetros de calidad de agua antes del tratamiento	-	Laboratorio de Investigación del Agua
Determinación de dosis, concentración y PH óptimo.	Santos Cahuatico y colaborador	Laboratorio de Investigación del Agua
Determinación de parámetros de calidad de agua después del tratamiento	-	Laboratorio de Investigación del Agua
Proceso de la electrocoagulación	Santos Cahuatico	Laboratorio de Investigación del Agua
Redacción de Tesis	Santos Cahuatico	-

4.2 EQUIPOS Y MATERIALES

4.2.1 EQUIPOS

4.2.1.1 Equipo de Prueba de Jarras

El aparato consiste en seis reactores de carga, cada uno equipado con un mezclador de paleta. Las jarras de forma cilíndrica se utilizan para evitar el flujo de vórtice, que puede presentarse en mezcladores circulares.

La finalidad de prueba es simular, en la medida de lo posible, las condiciones esperadas o deseadas en las instalaciones de coagulación-floculación. Los procedimientos estándar de pruebas de jarras están disponibles en AWWA (2011).



Figura 3. Equipo de Prueba de Jarras modelo PHIPPS & BIRD

4.2.1.2 Turbidímetro

Mide la turbidez presente en el agua con un error de ± 0.1 , en un rango de medición de 0 a 1000 UNT. Es portátil y se usó en los procesos físico-químicos y de la electrocoagulación.

Para las mediciones mayores a 1000 UNT, se usó el turbidímetro HACH 2100N con rango de medición de 0 a 4000 UNT.



Figura 4. De izq. a der. Turbidímetro HACH 2100Q y Turbidímetro HACH 2100N.

4.2.1.3 Balanza electrónica

Balanza analítica SHIMADZU AY 120, utilizada para la medición del peso del coagulante sulfato de aluminio (granulado, tipo B) con +/- 0.2 mg de error.



Figura 5. Balanza analítica SHIMADZU AY 120

4.2.1.4 Fuente de Poder

Es la que nos va a suministrar corriente continua en un rango de 0 a 5 amperios y voltaje máximo de 30 voltios. Tiene lecturas de los amperajes y voltios en forma analógica pudiendo así regular manualmente los cambios de los valores en amperaje y voltaje.



Figura 6. Fuente de poder o fuente de alimentación digital UNI-T UTP-3315TFL, corriente continua DC 0-30V y de 0-5A.

4.2.1.5 Reactor Bach

Llamado también reactor de electrocoagulación, es donde el agua de estudio va ser sometido a procesos electroquímicos que van a derivar en la remoción de la turbiedad del agua. También, es el soporte interno de los electrodos a través de las dos varillas dentadas y su capacidad es de 5 l efectivos y de 6 l de capacidad total. El material es de acrílico y presenta un tomador de muestra a 5 cm de la base.

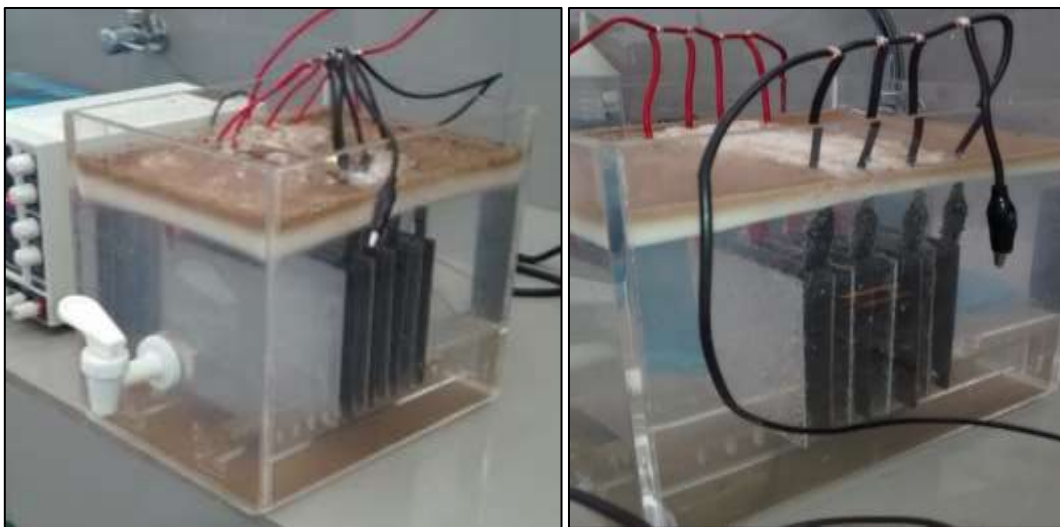


Figura 7. Reactor bach de electrocoagulación con dimensiones de 20x15x20 cm.

4.2.2 MATERIALES

4.2.2.1 COAGULANTES

Se ha usado para los procesos fisicoquímicos sólo el coagulante de sulfato de aluminio

Sulfato de Aluminio tipo B: Ampliamente usado en el tratamiento de aguas como coagulante en la mayoría de los procesos hidrodinámicos de separación de sólidos, en especial de las partículas coloidales.

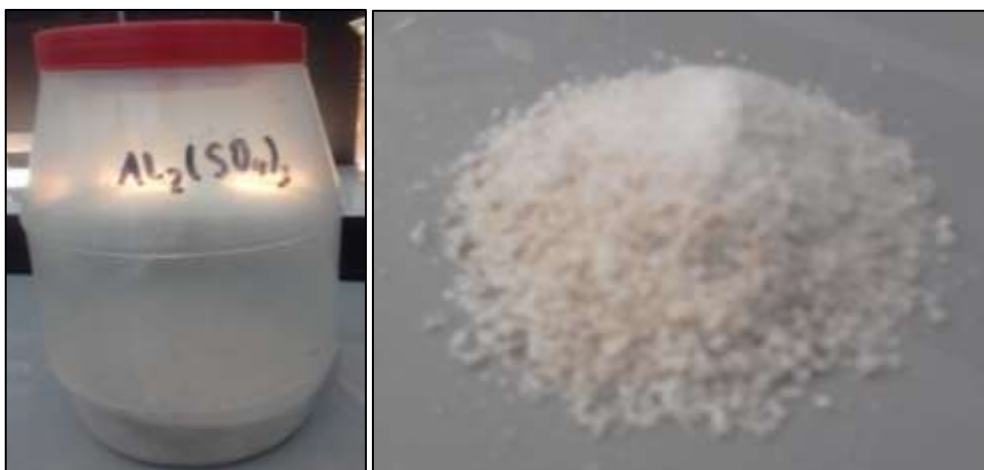


Figura 8. Alumbre o sulfato de aluminio granulado, con un tono marrón claro.

Vasos de 2000 ml:

Para los procesos fisicoquímicos a desarrollar en las pruebas de jarras. De borosilicato, forma alta, pico de vertido, graduado.



Figura 9. Vasos precipitados y su trabajo en el desarrollo en la prueba de jarras.

Deflector:

De acero laminado, su función es elevar la velocidad a valores superiores a los que normalmente operan los equipos en los vasos precipitados de 2000 ml.



Figura 10. Los deflectores influyen en forma decisiva en la eficiencia del ensayo de sedimentación.

Sifones:

Conseguirá succionar el sobrenadante a una profundidad de 6 cm para la toma de muestras el cual está sostenido por un flotador de tecnopor que ayudará a mantener constante la altura de muestreo.



Figura 11. El sifón de vidrio descansa sobre la estabilidad del tecnopor para el muestreo.

Vasos precipitados 50 ml:

Son los que van a recibir las muestras de agua por medio del sifón en el ensayo de prueba de jarras. Se las emplean también en la recolección de las muestras en la medición de la turbidez del reactor de electrocoagulación.



Figura 12. De borosilicato, con pico, con espesor de pared uniforme.

Jeringas

De material plástico, van a inocular en los vasos precipitados las dosis de coagulante establecida.



Figura 13. De capacidad de 20 ml, las agujas permiten cargar hasta el más mínimo volumen de coagulante de los vasos de 50 ml.

Agua destilada

Su composición pura, para poder obtener la menor cantidad de subproductos químicos indeseados, se ha hace muy indispensable para conseguir la mayor capacidad coagulante de la solución de sulfato de aluminio.



Figura 14. Agua destilada en piceta

Fiola:

De volumen de 100 ml para reservar las diferentes concentraciones de coagulante para desarrollar los parámetros fisicoquímicos.



Figura 15. Fiola de 100 ml

Electrodos:

De hierro y de aluminio presentadas en placas de 10 x 10 cm² y espesor de 0.1 cm.

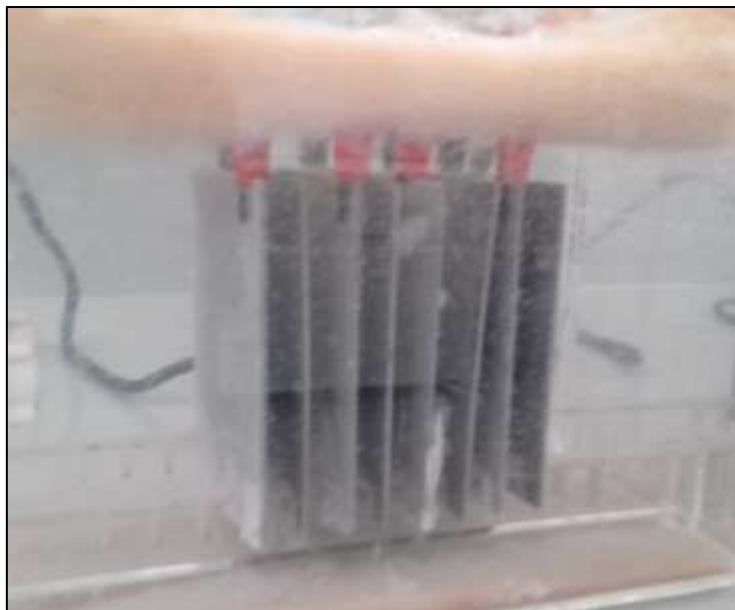


Figura 16. Electrodo distribuidos alternadamente como Fe y Al (04 de Fe y 04 de Al)

4.3 DESARROLLO DE LA INVESTIGACION

4.3.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

La caracterización del agua superficial del río Rímac se ha realizado el mismo día de la recolección de la muestra, específicamente 02 horas después. Esta caracterización presenta a los parámetros de PH, alcalinidad, turbiedad y conductividad.

El agua recolectada con turbiedades de 21, 135, 212 y 300 UNT no fueron alteradas para el tratamiento fisicoquímico. Para los siguientes tipos de agua de turbiedades 564, 742, 865, 990, 2313, UNT fueron modificadas para a partir de la preparación de agua del río Rímac con arcilla comercial. Este último tipo de muestra de agua, se le realizó una segunda caracterización para conocer la modificación del agua por la arcilla, con los mismos parámetros mencionados (ver anexo 01).

4.3.2 METODOLOGÍA

Desarrollamos el método fisicoquímico mediante la coagulación química para comparar y mejorar el análisis crítico de los resultados obtenidos por método de la electrocoagulación.

En el método físico químico sólo se desarrolló la coagulación química mediante los parámetros de dosis, concentración y PH óptimos. Los de floculación y decantación no se incluyen porque estos comprenden otros procesos que esta investigación no persigue analizar. Los resultados por el método fisicoquímico, nos darán un punto referencial desde la tecnología convencional con respecto de los resultados del método de la EC.

4.3.2.1 Método fisicoquímico

A los diferentes tipos de muestras de agua se llevó al análisis del coagulante por medio del método de la Prueba de Jarras para determinar dosis, concentración y PH óptimos. Como coagulante, el sulfato de aluminio tipo B granulado.

Asumida la concentración de 1% del sulfato de aluminio, como lo indica las investigaciones referidas a la coagulación química, se aplicó a los 09 tipos de agua de estudio: 21, 135, 212 y 300, 564, 742, 865, 990 y 2313 UNT.

La concentración de 1% de coagulante respondió bien para las muestras de agua de 21, 135, 212 y 300 UNT. Pero para las muestras de 564, 742, 865, 990 y 2313 UNT (muestras preparadas con arcilla comercial), no logró remover tales turbiedades.

Para este tipo de aguas se hizo el estudio a partir de la determinación de la dosis óptima para las concentraciones de 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, 10%, 12% y 14%.

Resultando que para el agua tipo de 742 UNT muestra un mejor comportamiento de remoción con 3%, las muestras de agua de 865 UNT y 990 UNT respondieron para 5% y la muestra de 2313 UNT a una concentración de 10%.

Con los resultados conseguidos de la determinación de la dosis óptima lo que procede es la determinación de la concentración óptima.

Los resultados obtenidos de la dosis y concentración óptima serán empleados en la determinación del pH óptimo. Si el mejor resultado de remoción se define para un pH natural, quedarán definidos los parámetros de la coagulación química para cada tipo de calidad de agua. En caso contrario habrá que ajustar, a ese pH de mejor remoción, el agua de estudio para determinar los nuevos resultados de dosis y concentración óptima.

4.3.2.2 Método de la electrocoagulación

Las condiciones ideales para este método serán las referencias encontradas en la investigación de la Universidad de Lima hecha por Aguilar en el 2014: distancia entre electrodos establecida en 1 cm, rango de amperaje de 0-5 amperios, a pH natural, par de electrodos de aluminio y hierro de 10 x 10 cm y espesor de 0.1 cm, el número de electrodos va en 8 unidades, dimensión del reactor bach de 20x15x20 cm.

Teniendo constante estas variables, desarrollaremos el estudio en tres tipos de amperajes: 1A, 3A, 5A y así determinar el amperaje óptimo de mayor remoción de turbiedad para cada tipo de agua analizada. La evaluación de la eficiencia del proceso de la electrocoagulación es por el parámetro de turbiedad (Aguilar, 2014).

No hay adición de compuesto químicos al proceso para promover o mejorar el proceso mediante la modificación de alcalinidad o conductividad. Pero para modificar el pH, agregamos ácido sulfúrico para disminuir el pH a 7, y agregamos hidróxido de sodio para elevar el pH a 9.

4.3.3 PROCEDIMIENTO

4.3.3.1 Determinación de la dosis óptima:

- Se preparará la solución de sulfato de aluminio, primero, pesando la cantidad que se obtendrá en los ensayos, el cual se disuelve con agua destilada. Por ejemplo si es el caso de 1% de concentración sería pesar 1 gr de coagulante en 100 ml de agua destilada.
- Los ensayos en el laboratorio pasarán primero por varias pruebas de jarras que determinarán la dosis óptima del coagulante sulfato de aluminio agregando diversas dosis de coagulante a cada una de las jarras que contiene el agua en estudio. La dosis óptima será en la jarra donde se obtenga la menor turbiedad (tabla 2).

Tabla 2. Presentación de la dosis en un rango de valores posibles típicos al 1%.

DOSIS (mg/l)	5	10	15	20	25	30
V (ml)	1	2	3	4	5	6
Turbiedad (UNT)	12.6	8.4	5.10	2.90	4.86	8.22

- Para la Prueba de Jarras las condiciones de operación para la mezcla rápida es velocidad de 300 RPM para 5 segundos; mezcla lenta, velocidad de 34 RPM para 20 minutos y finalmente para la decantación un tiempo de 10 minutos con el equipo apagado.
- Cargaremos la jeringa con los volúmenes de coagulante previamente calculado. Inmediatamente que se inicia el proceso de la Prueba de Jarras se inyecta el coagulante en los vasos precipitados de 2 litros. Esto se hace sumergiéndola y dirigida hacia el centro del vaso.
- Pasado los 20 minutos de mezcla lenta, colocamos los sifones a las jarras para que pasado los 10 minutos de sedimentación se pueda tomar aproximadamente 30 ml de muestra y ser medido por el turbidímetro.
- Los resultados obtenidos se colocan en un cuadro de programación Excel y esperar que se obtenga una curva que muestre un valor mínimo. De no conseguirlo volver a repetir el ensayo hasta obtener valores acorde a una curva de dosis óptima representativa.

4.3.3.2 Determinación de la concentración óptima:

- Con el valor de la dosis obtenida se presenta un rango de valores de concentración. Si tendríamos que, por ejemplo, en el caso de presentar 0.5%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, pesar en la balanza analítica 0.5 gr, 1 gr, 2 gr, 3 gr, 4 gr, 5 gr y disolverlos en 100 ml de agua destilada cada uno, respectivamente.
- Para la Prueba de Jarras las condiciones de operación para la mezcla rápida es velocidad de 300 RPM para 5 segundos; mezcla lenta, velocidad de 34 RPM para 20 minutos y finalmente para la decantación un tiempo de 10 minutos con el equipo apagado.
- Cargaremos la jeringa con los volúmenes de coagulante previamente calculado. Inmediatamente que se inicia el proceso de la Prueba de Jarras se inyecta el coagulante en los vasos precipitados de 2 litros. Esto se hace sumergiéndola y dirigida hacia el centro del vaso.
- Pasado los 20 minutos de mezcla lenta, colocamos los sifones a las jarras para que pasado los 10 minutos de sedimentación se pueda tomar aproximadamente 30 ml de muestra y ser medido por el turbidímetro.

- Los resultados obtenidos se colocan en un cuadro de programación Excel, ver modelo en la tabla 3, y esperar que se obtenga una curva que muestre un valor mínimo. De no conseguirlo, volver a repetir el ensayo hasta obtener valores acorde a una curva de concentración óptima.

Tabla 3. Ejemplo de presentación de la concentración en un rango de valores típicos

CONCENTRACION (%)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	4.0
DOSIS (mg/l)	20	20	20	20	20	20
V (ml)	8.0	4.0	2.7	2.0	1.6	1.0
Turbiedad (UNT)	8.32	2.10	3.82	5.66	8.51	10.20

4.3.3.3 Determinación del PH óptimo:

- La determinación del PH empieza ajustando la muestra a un medio ácido agregando H_2SO_4 y para un medio básico se agrega NaOH y así obtener seis tipos de muestras de agua con diferente PH incluido el de la muestra con PH natural. (ver modelo en el tabla 4).
- Para la Prueba de Jarras las condiciones de operación para la mezcla rápida es velocidad de 300 RPM para 5 segundos; mezcla lenta, velocidad de 34 RPM para 20 minutos y finalmente para la decantación un tiempo de 10 minutos con el equipo apagado.
- Obtenidos los valores de dosis y concentración, se carga la jeringa con el volumen de coagulante previamente calculado. Inmediatamente que se inicia el proceso de la Prueba de Jarras se inyecta el coagulante en los vasos precipitados de 2 litros. Esto se hace sumergiéndola y dirigida hacia el centro del vaso.
- Pasado los 20 minutos de mezcla lenta, colocamos los sifones a las jarras para que pasado los 10 minutos de sedimentación se pueda tomar aproximadamente 30 ml de muestra y ser medido por el turbidímetro.
- Los resultados obtenidos se colocan en un cuadro de programación Excel y esperar que se obtenga una curva que muestre un valor mínimo. De no conseguirlo, volver a repetir el ensayo hasta obtener valores acorde a una curva de pH óptima.

Tabla 4. Presentación típica del pH en un rango de valores tentativos

PH	5.8	7.03	7.78	8.5	9.6	10.7
Turbiedad (UNT)	7.2	4.8	3.8	4.5	7.1	9.8

4.3.3.4 Determinación del amperaje óptimo:

- Se prepara el reactor bach colocando las varillas ranuradas en la parte inferior de la celda y en ellas los electrodos en forma de placas de aluminio y hierro. Son ocho electrodos colocados alternadamente entre aluminio y hierro.
- Colocamos el cableado que va entregar corriente continua de la fuente de poder al reactor. El cable de color rojo conectará el puerto positivo de la fuente hacia el electrodo de aluminio. El cable negro conectará el puerto negativo hacia el electrodo de hierro.
- Se carga el reactor bach con la muestra de agua hasta 5.6 litros. Procurar que el tomador de muestra ubicado, a 5 cm de la base, en el centro inferior de la cara frontal del reactor, se encuentre cerrado.
- Se inicia el proceso prendiendo la fuente de poder y el cronometro que medirá los tiempos en que se tomarán las muestras. Así, la primera toma de muestra será a los 3 minutos, 5 minutos, 7 minutos y 10 minutos. De allí en adelante cada 5 minutos hasta los 70 minutos.
- Se extrae 50 ml de muestra en los tiempos establecidos. Se mide la turbiedad y lo restante se deja sedimentar por 10 minutos y se vuelve medir la turbiedad. Medimos turbiedad inmediatamente después de cada toma de muestra para conocer la evolución de la remoción de la turbiedad en la celda y si presenta cambios significativos al someter la muestra a una sedimentación de 10 minutos.
- Después de los 10 minutos, los siguientes tiempos de toma de muestra se hará cada 5 minutos, o sea a los 15 minutos, 20 minutos y así sucesivamente hasta cuando ya no exista disminución de remoción de turbiedad. Esto porque los primeros 15 minutos de tratamiento ocurre el mayor porcentaje de remoción minuto a minuto en la mayoría de las aguas.

4.4 PROTOCOLO DE MEDICION

En esta investigación se realizaron mediciones del parámetro de turbiedad, para evaluar la eficiencia de remoción mediante el proceso de electrocoagulación y del coagulante utilizado en el proceso fisicoquímico (Tabla 5).

Tabla 5. Descripción de parámetros medición en las muestras de agua

Parámetro	Unidad de medida	Medición	Descripción
Turbidez	UNT		Es una forma indirecta de medir la concentración de las partículas suspendidas en un líquido; mide el efecto de la dispersión que estas partículas presentan al paso de la luz, y es función del número, tamaño y forma de partículas
Amperaje	amperios	Fuente de poder	Mide la cantidad de corriente que fluye a través del medio entre los electrodos
voltaje	voltios	Fuente de poder	Define la diferencia de potencial entre un medio eléctrico y otro

CAPITULO V: RESULTADOS

5.1 ACTIVIDADES PROSPECTIVAS

En el desarrollo de esta investigación, no se utilizó ningún consumo de compuesto químico en la remoción de la turbiedad por el proceso de electrocoagulación. El principio electroquímico es el que viene a reemplazar el principio de coagulación presentado por los coagulantes inorgánicos.

De todas las muestras de agua con altas turbiedades analizadas se encontró que es técnica y económicamente viable para turbiedades mayores a 1000 UNT, como es el caso de nuestra agua de estudio tipo IX: 2312 UNT (ver tabla 80, 81). Aún falta investigar a profundidad los otras variables que definen y mejoran la eficiencia de la EC. Aquí se ha desarrollado el parámetro del amperaje y el tiempo de tratamiento evaluadas por el parámetro de respuesta de la turbiedad obteniéndose resultados aceptables para el tratamiento de aguas superficiales.

Según los antecedentes, el lodo producido es más compacto y de mayor facilidad de disposición final (Piña et al. 2011); pero aún falta hallar y definir su composición. La concentración de aluminio depositada en la muestra tratada por efecto del consumo del electrodo de aluminio, no se conoce con precisión, así como la definición de las otras variables de diseño. Por lo tanto, hacia allí debería dirigirse las investigaciones futuras que conviertan a la tecnología de la electrocoagulación posiblemente en una alternativa viable para el tratamiento de agua superficial para consumo humano.

5.2 CONDICIONES DE USO Y MEDICIONES

5.2.1 CONDICIONES DE USO

La fuente de poder en la electrocoagulación tiene que tener la capacidad de suministrar igual o mayor amperaje que en el proceso.

La fuente de poder necesita hacer una parada de 01 hora después de trabajar con un amperaje de 5A. Debido a la alta carga del equipo esta se recalienta y no podrá realizar otro trabajo a diferente amperaje.

A medida que va aumentando la remoción de turbiedad del agua tratada, el amperaje va disminuyendo gradualmente, por lo que habrá que ir graduando la dosificación de corriente al nivel de amperaje establecido.

El electrodo de aluminio se consumirá en el reactor EC depositándose en el agua tratada. Por lo tanto la conexión del cableado en estos electrodos se desgastará debiendo cambiarse periódicamente.

5.2.2 MEDICIONES

5.2.2.1 Toma de muestras

Se almacenaron en cuatro (04) envases de 30 litros c/u en el período de marzo-noviembre del 2018 en época de avenidas y estiaje, realizándose 9 ensayos para los 9 tipos de muestra de agua. El tiempo máximo de uso del agua superficial en el laboratorio eran de 2 días, para así obtener valores bastante confiables.

El punto de recolección del agua superficial del río Rímac se encuentra en el km 28 de la Carretera Central.

Para la determinación de la turbiedad se consideró la descrita en los métodos normalizados para el análisis de agua potable y residuales. Los valores iniciales fueron medidos 2 horas después, en el laboratorio.

5.2.2.2 Caracterización de las muestras

Las muestras a ser tratadas serán caracterizadas como tipos de agua. Así, para los nueve (09) muestras de agua de distintas turbiedades para nuestro estudio, serán nombrados como *Tipo de Agua* (ver tabla 6) y esta caracterización se remitirá para ambas metodologías de evaluación.

Tabla 6. Caracterización de las muestras de agua según turbiedad y respecto a la metodología empleada

TURBIEDAD	TIPO DE AGUA	METODOLOGIA UTILIZADA	CARACTERISTICAS
21UNT	TIPO 1	COAGU. QUIMICA/ EC	ALUMBRE/ELECTRÓLISIS
135 UNT	TIPO 2	COAGU. QUIMICA/ EC	ALUMBRE/ELECTRÓLISIS
212 UNT	TIPO 3	COAGU. QUIMICA/ EC	ALUMBRE/ELECTRÓLISIS
300 UNT	TIPO 4	COAGU. QUIMICA/ EC	ALUMBRE/ELECTRÓLISIS
564 UNT	TIPO 5	COAGU. QUIMICA/ EC	ALUMBRE/ELECTRÓLISIS
742 UNT	TIPO 6	COAGU. QUIMICA/ EC	ALUMBRE/ELECTRÓLISIS
865 UNT	TIPO 7	COAGU. QUIMICA/ EC	ALUMBRE/ELECTRÓLISIS
990 UNT	TIPO 8	COAGU. QUIMICA/ EC	ALUMBRE/ELECTRÓLISIS
2313 UNT	TIPO 9	COAGU. QUIMICA/ EC	ALUMBRE/ELECTRÓLISIS

5.3 SENSIBILIZACION, DIFUSIÓN DE INFORMACION

El avance en el desarrollo de tecnologías para el tratamiento de aguas es el principio que persigue la ingeniería sanitaria. También, se preocupa en que los procesos convencionales y los nuevos, puedan hacerlo de tal manera que vayan mejorando y así, se vea plasmado en la mejora de la calidad del agua.

La variedad de aguas residuales que la electrocoagulación ha podido remover sus componentes contaminantes es bastante interesante y una verdadera alternativa a desarrollar. Precisamente los pocos estudios realizados hacia el tratamiento de aguas superficiales para consumo humano es lo que nos ha dirigido nuestra atención.

5.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.4.1 METODO DE COAGULACIÓN QUÍMICA

5.4.1.1 USO DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE.

AGUA TIPO I: 21 UNT

5.4.1.1.1 DÓSIS ÓPTIMA

CALIDAD DE AGUA CRUDA

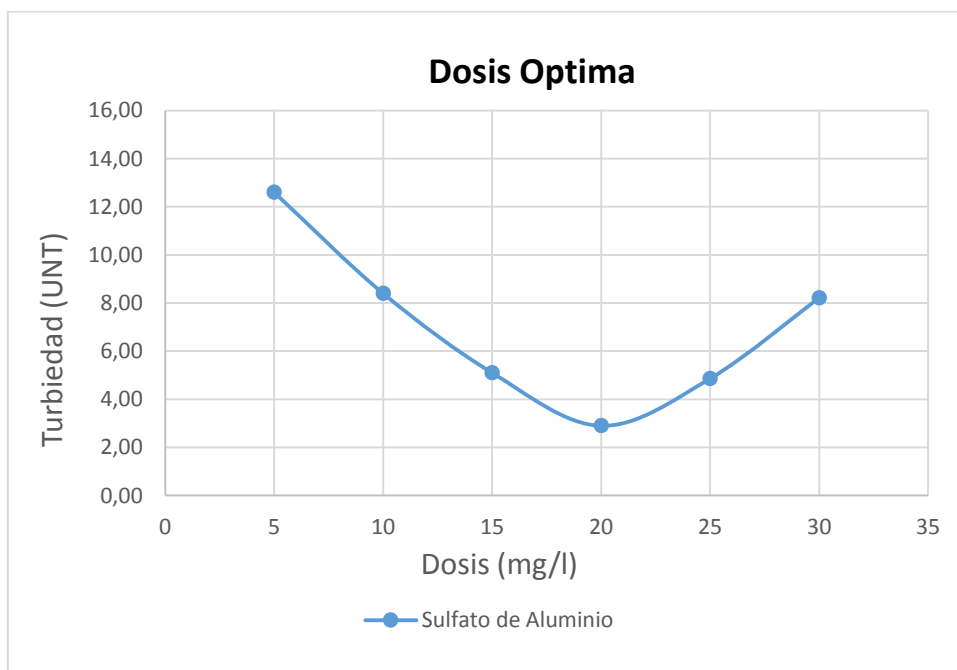
MUESTRA	
TURBIEDAD (UNT)	21
PH	8.32
ALCALINIDAD (ppm)	90
CONDUCTIVIDAD (us/cm)	237
COAGULANTE	
Dosis de Sulfato de Aluminio, tipo B	VARIABLE
CONC. SULF. ALUM.	1%

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
T = 20'
DECANTACIÓN
T = 10'

Tabla 7. Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo I: de 21 UNT

DOSIS (mg/l)	5	10	15	20	25	30
V (ml)	1	2	3	4	5	6
Turbiedad (UNT)	12.6	8.4	5.10	2.90	4.86	8.22

Figura 17. Curva de dosis de sulfato de aluminio para agua tipo I: 21 UNT



5.4.1.1.2 CONCENTRACIÓN ÓPTIMA

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

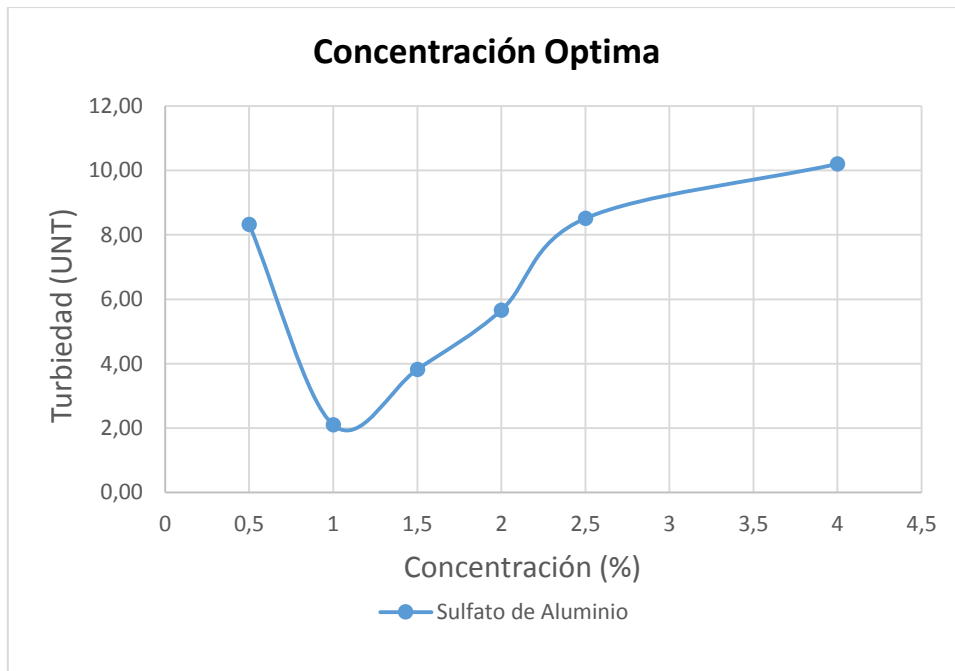
COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	20 mg/l
Conc. de sulfato de aluminio	VARIABLE

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM; Tiempo= 5''
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM ; Tiempo= 20'
DECANTACIÓN: 10'

Tabla 8. Concentración óptima de sulfato de aluminio para agua tipo I: 21 UNT

Concentración (%)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	4.0
Dosis (mg/l)	20	20	20	20	20	20
Volumen (ml)	8.0	4.0	2.7	2.0	1.6	1.0
Turbiedad (UNT)	8.32	2.10	3.82	5.66	8.51	10.20

Figura 18. Curva de concentración de sulfato de aluminio. Agua tipo I: 21 UNT



5.4.1.1.3 PH ÓPTIMO

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

MUESTRA	
Turbiedad (UNT)	21
PH	VARIABLE
Alcalinidad (ppm)	90

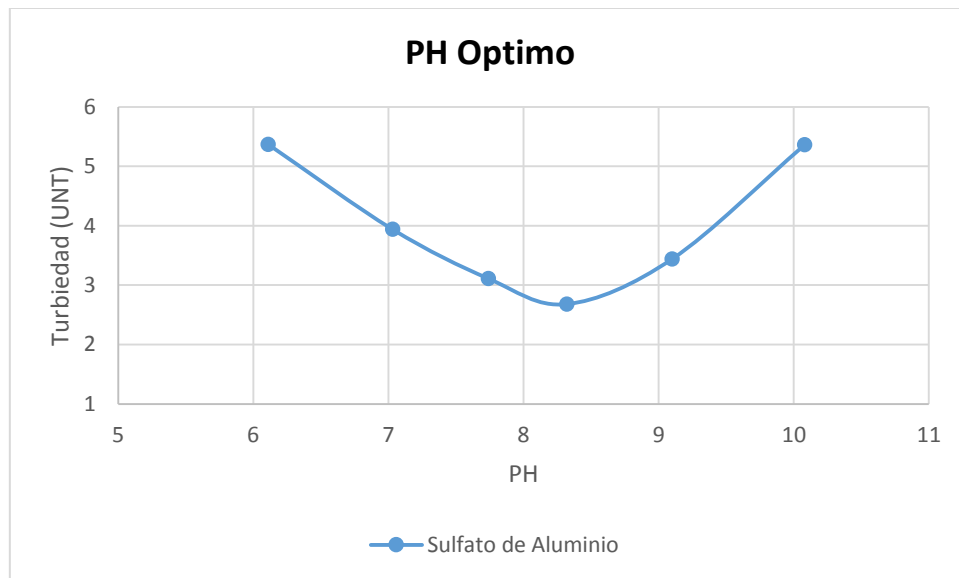
COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	20 mg/l
Conc. de sulfato de aluminio	1%

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
Gradiente = 40 s ⁻¹
T = 20'
DECANTACIÓN:
10'

Tabla 9. pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo I: 21 UNT

PH	6.11	7.03	7.74	8.32	9.10	10.08
Turbiedad (UNT)	5.37	3.94	3.11	2.68	3.44	5.36

Figura 19. Curva pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo I: 21 UNT



Muestran resultados bastante típicos para una turbiedad de agua clara con una dosis 20 mg/l, concentración de 1% a pH natural. El menor valor obtenido entre la dosis óptima y concentración óptima, 2.10 UNT, nos servirá para contrastar con los resultados del proceso de la electrocoagulación respecto al agua tipo I.

5.4.1.2 USO DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE.

AGUA TIPO II: 135 UNT

5.4.1.2.1 DOSIS ÓPTIMA

CALIDAD DE AGUA CRUDA

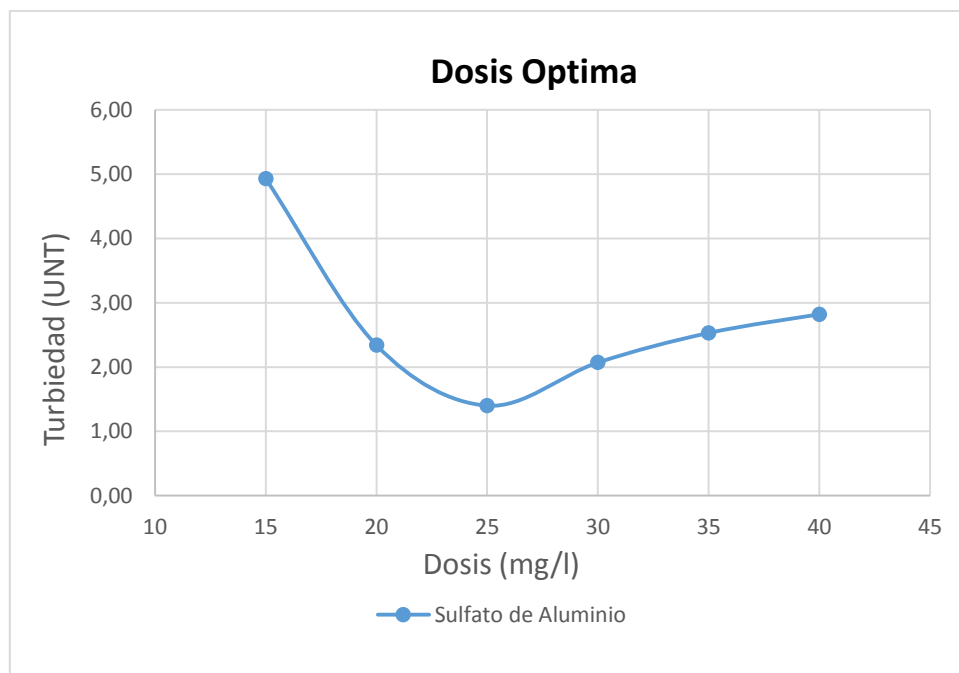
MUESTRA	
Turbiedad (UNT)	135
PH	8.20
Alcalinidad (ppm)	90
COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	25 mg/l
Conc. de sulfato de aluminio	VARIABLE

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM; t= 5''
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
Gradiente = 40 s ⁻¹
T = 20'
DECANTACIÓN:
10'

Tabla 10. Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo II: 135 UNT

DOSIS (mg/l)	15	20	25	30	35	40	45
V (ml)	3	4	5	6	7	8	9
Turbiedad (UNT)	4.93	2.34	1.40	2.07	2.53	2.82	2.9

Figura 20. Curva de dosis de sulfato de aluminio. Agua tipo II: 135 UNT



5.4.1.2.2 CONCENTRACIÓN ÓPTIMA

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

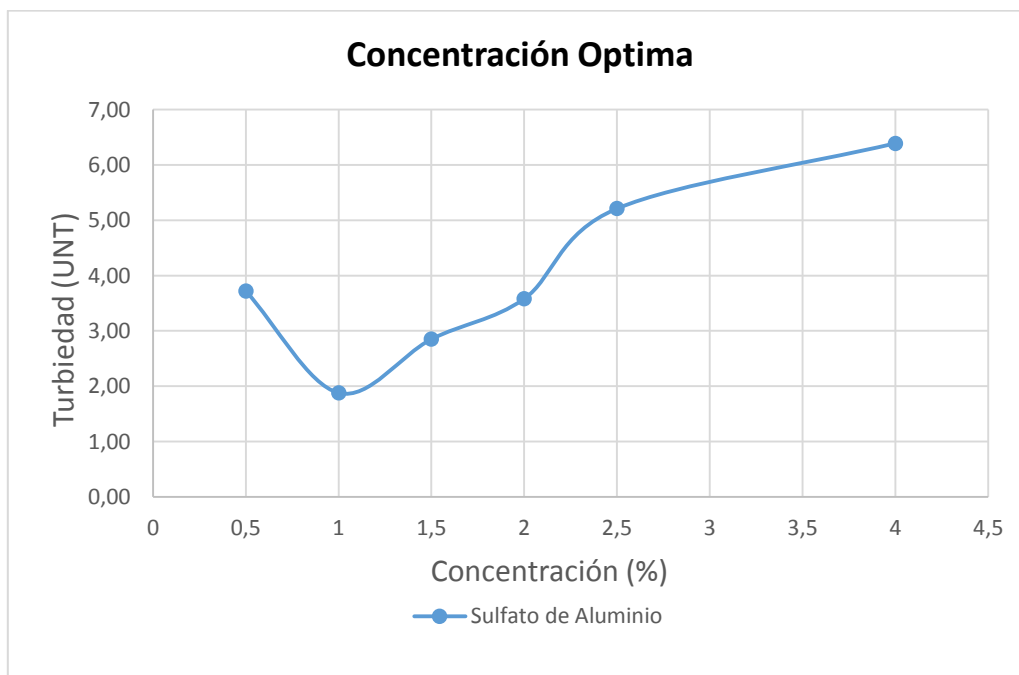
COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	25 mg/l
Conc. de sulfato de aluminio	VARIABLE

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM; Tiempo= 5''
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM; Tiempo= 20'
DECANTACIÓN: 10'

Tabla 11. Concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo II: 135 UNT

Concentración (%)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	4.0
Dosis (mg/l)	25	25	25	25	25	25
Volumen ml)	10.0	5.0	3.33	2.50	2.0	1.25
Turbiedad (UNT)	3.79	1.88	2.85	3.58	5.21	6.39

Figura 21. Curva de concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo II: 135 UNT



5.4.1.2.3 PH ÓPTIMO

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

MUESTRA	
Turbiedad (UNT)	135
PH	VARIABLE
Alcalinidad (ppm)	90

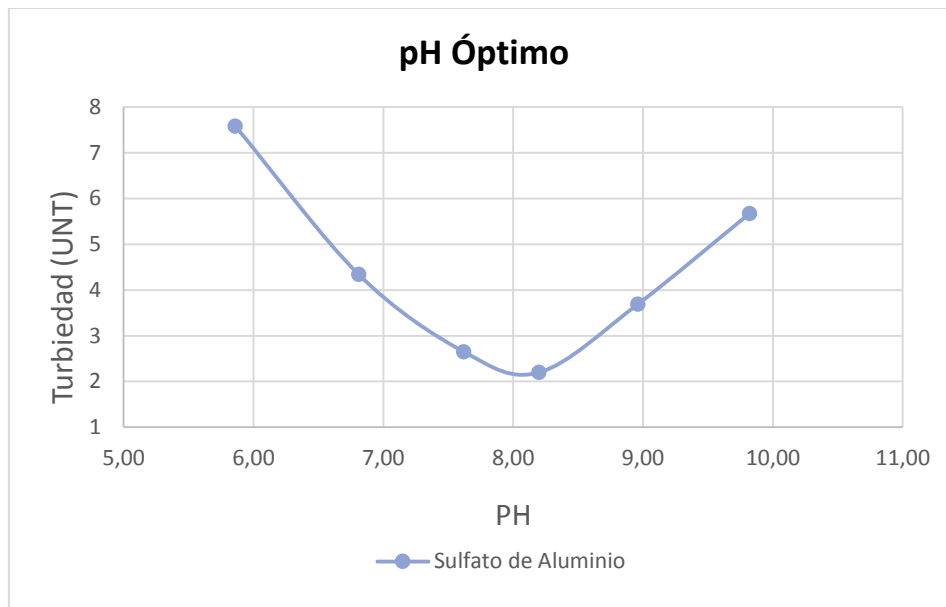
COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	25 mg/l
Conc. de sulfato de aluminio	1%

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
Gradiente = 40 s ⁻¹
T = 20'
DECANTACIÓN:
10'

Tabla 12. pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo II: 135 UNT

PH	5.86	6.81	7.62	8.20	8.96	9.82
Turbiedad (UNT)	7.58	4.34	2.65	2.20	3.69	5.67

Figura 22. Curva pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo II: 135 UNT



Muestran resultados bastante típicos de agua que ya no es clara, con una dosis 25 mg/l, concentración de 1% a pH natural. El menor valor obtenido entre la dosis óptima y concentración óptima, 1.40 UNT, nos servirá para contrastar con los resultados del proceso de la electrocoagulación respecto al agua tipo II.

5.4.1.3 USO DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE.

AGUA TIPO III: 212 UNT

5.4.1.3.1 DÓSIS ÓPTIMA

CALIDAD DE AGUA CRUDA

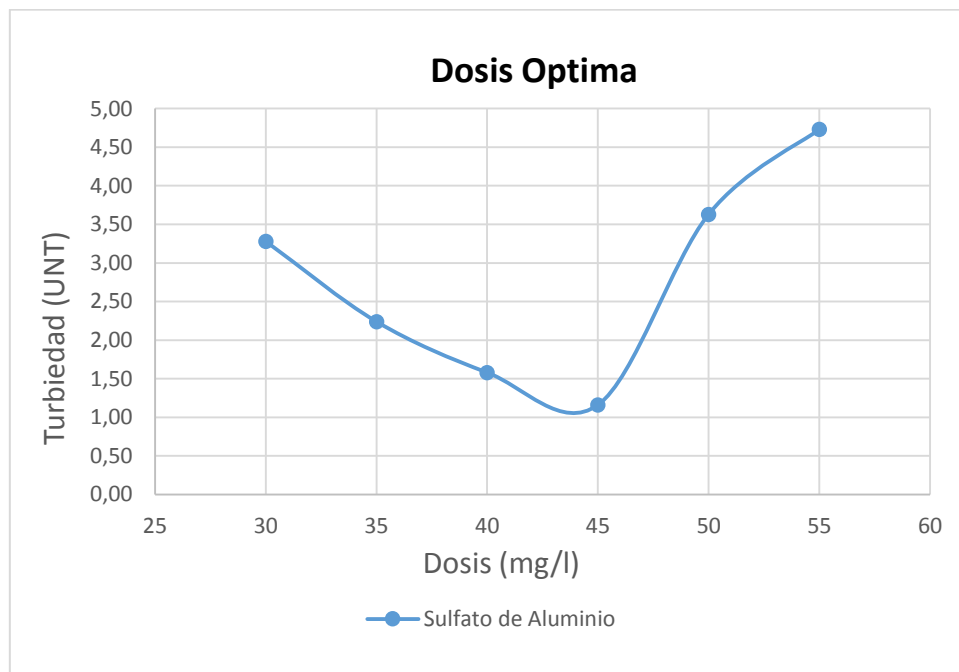
MUESTRA	
Turbiedad (UNT)	212
PH	7.78
Alcalinidad (ppm)	98
Conductividad (us/cm)	322
COAGULANTE	
Dosis de sulfato de aluminio	VARIABLE
Conc. de sulfato de aluminio	1%

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM; t= 5''
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
Gradiente = 40 s ⁻¹
T = 20'
DECANTACIÓN:
10'

Tabla13. Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo III: 212 UNT

DOSIS (mg/l)	30	35	40	45	50	55
V (ml)	6	7	8	9	10	11
Turbiedad (UNT)	3.28	2.24	1.58	1.16	3.63	4.73

Figura 23. Curva de dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo III: 212 UNT



5.4.1.3.2 CONCENTRACIÓN ÓPTIMA

CALIDAD DE AGUA CRUDA

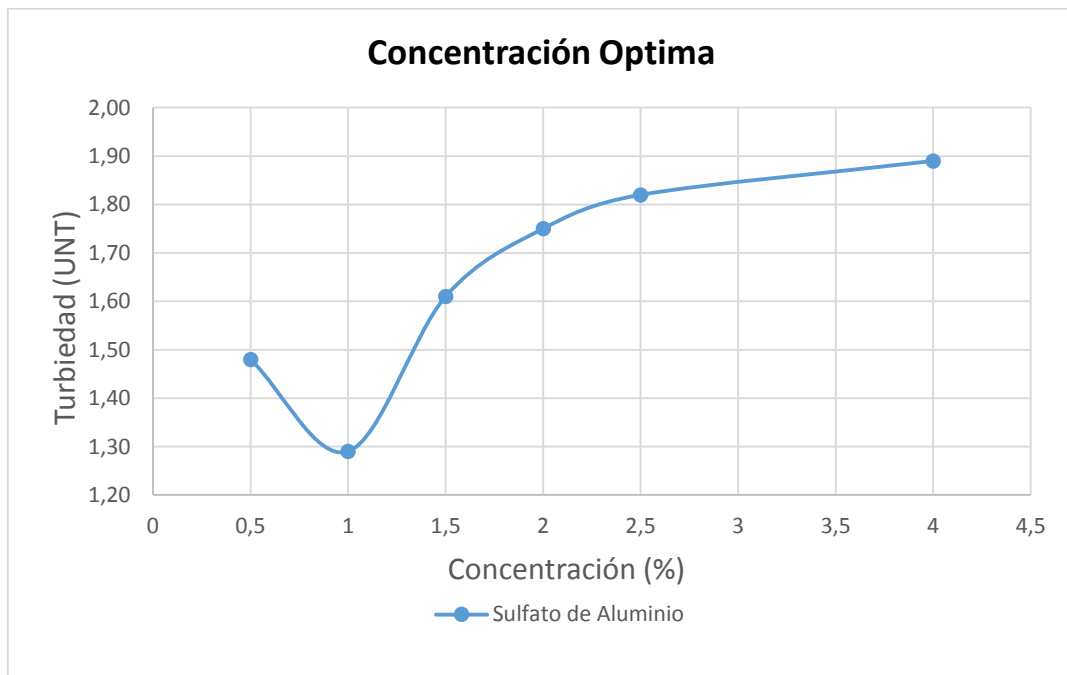
MUESTRA	
Turbiedad (UNT)	212
PH	7.78
Alcalinidad (ppm)	98
COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	45 mg/l
Conc. de sulfato de aluminio	VARIABLE

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
T = 20'
DECANTACIÓN:
10'

Tabla 14. Concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo III: 212 UNT

C %	0.5	1	1.5	2	2.5	4
DOSIS (mg/l)	45	45	45	45	45	45
V (ml)	18.0	9.0	6.0	4.50	3.60	2.25
Turbiedad (UNT)	1.48	1.29	1.61	1.75	1.82	1.89

Figura 24. Curva de concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo III: 212 UNT



5.4.1.3.3 PH ÓPTIMO

CALIDAD DE AGUA CRUDA

MUESTRA	
Turbiedad (UNT)	212
PH natural	7.78
PH	VARIABLE
Alcalinidad (ppm)	98

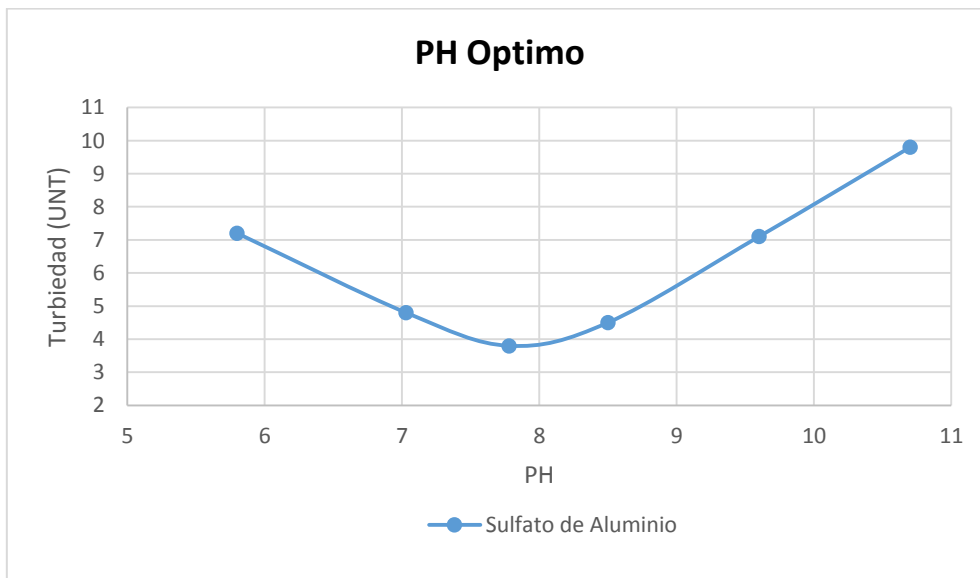
COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	45 mg/l
Conc. de sulfato de aluminio	1.0%

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
Gradiente = 40 s ⁻¹
T = 20'
DECANTACIÓN
T = 10'

Tabla 15. pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo III: 212 UNT

PH	5.8	7.03	7.78	8.5	9.6	10.7
Turbiedad (UNT)	7.2	4.8	3.8	4.5	7.1	9.8

Figura 25. Curva de pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo III: 212 UNT



Muestran resultados bastante típicos de un agua que no es clara, con una dosis 45 mg/l, concentración de 1% a pH natural. El menor valor obtenido entre la dosis óptima y concentración óptima, 1.16 UNT, nos servirá para contrastar con los resultados del proceso de la electrocoagulación respecto al agua tipo III.

5.4.1.4 USO DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE.

AGUA TIPO IV: 300 UNT

5.4.1.4.1 DÓSIS ÓPTIMA

CALIDAD DE AGUA CRUDA

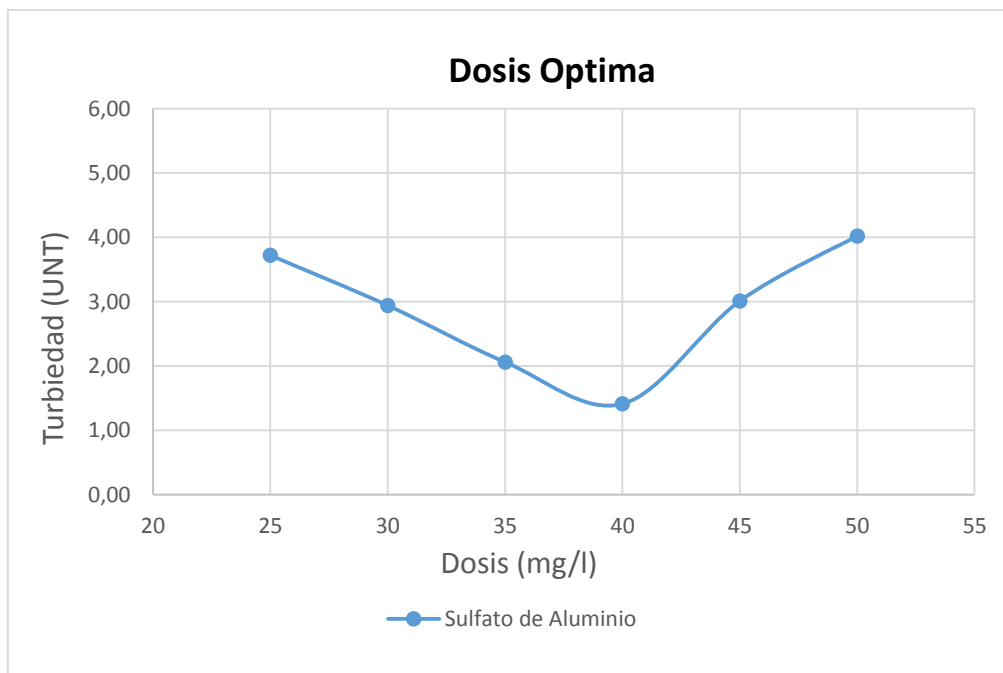
MUESTRA	
Turbiedad (UNT)	300
PH	7.56
Alcalinidad (ppm)	112
Conductividad (us/cm)	345
COAGULANTES	
Dosis sulfato de aluminio	VARIABLE
Concentración sulfato de aluminio	1%

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
T = 20'
DECANTACIÓN
T = 10'

Tabla 16: Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo IV: 300 UNT

DOSIS (mg/l)	25	30	35	40	45	50
V (ml)	5	6	7	8	9	10
Turbiedad (UNT)	3.72	2.94	2.06	1.41	3.01	4.2

Figura 26: Curva de dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo IV: 300 UNT



5.4.1.4.2 CONCENTRACIÓN ÓPTIMA

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

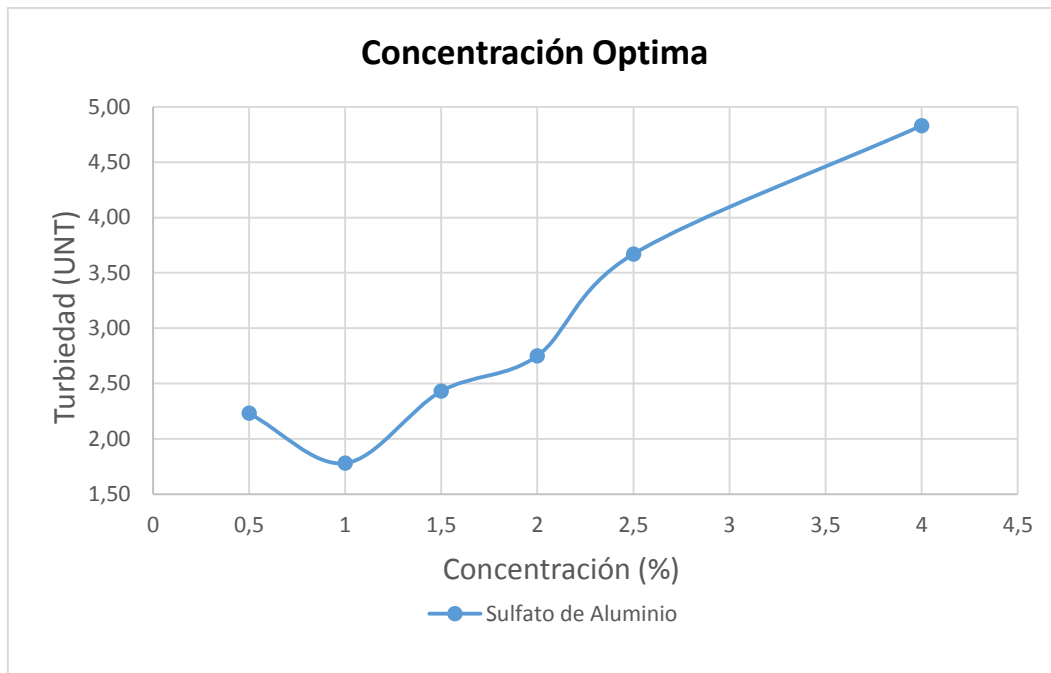
MUESTRA	
Turbiedad (UNT)	300
PH	7.56
Alcalinidad (ppm)	112
COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	40 mg/l
Conc. de sulfato de aluminio	VARIABLE

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
T = 20'
DECANTACIÓN:
10'

Tabla17. Concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo IV: 300 UNT

C %	0.5	1	1.5	2	2.5	4
DOSIS (mg/l)	40	40	40	40	40	40
V (ml)	16	8	5.3	4	3.2	2
Turbiedad (UNT)	2.23	1.78	2.43	2.75	3.67	4.83

Figura 27. Curva de concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo IV: 300 UNT



5.4.1.4.3 PH ÓPTIMO

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

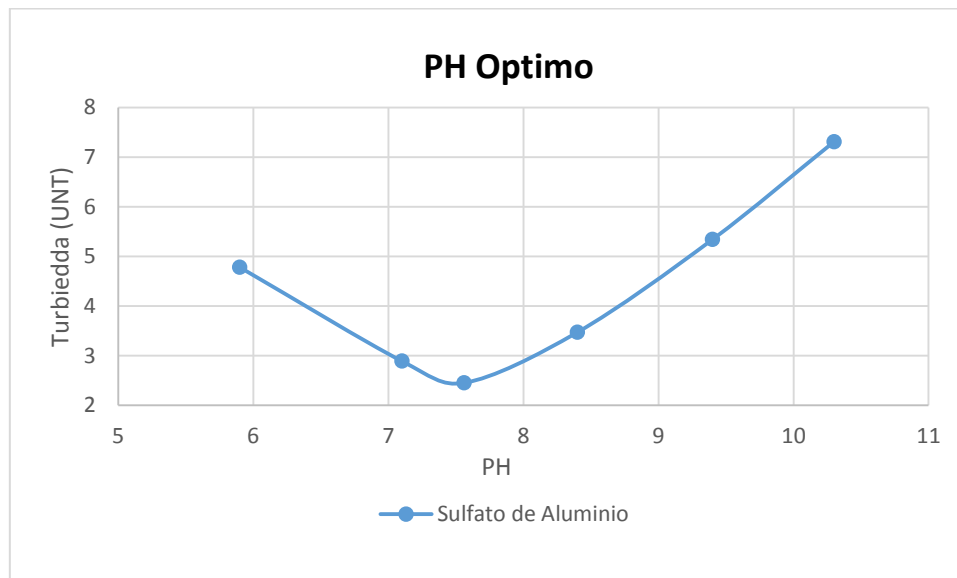
MUESTRA	
Turbiedad (UNT)	300
PH	VARIABLE
Alcalinidad (ppm)	112
COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	40 mg/l
Conc. de sulfato de aluminio	1.0%

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
T = 20'
DECANTACIÓN
T = 10'

Tabla 18. pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo IV: 300 UNT

PH	5.9	7.1	7.56	8.4	9.4	10.3
Turbiedad (UNT)	4.78	2.89	2.45	3.47	5.34	7.31

Figura 28. Curva de pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo IV: 300 UNT



Muestran resultados bastante típicos de un agua turbia, con una dosis 40 mg/l, concentración de 1% a pH natural. El menor valor obtenido entre la dosis óptima y concentración óptima, 1.41 UNT, nos servirá para contrastar con los resultados del proceso de la electrocoagulación respecto al agua tipo IV.

5.4.1.5 USO DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE.

AGUA TIPO V: 564 UNT

5.4.1.5.1 DÓSIS ÓPTIMA

CALIDAD DE AGUA CRUDA

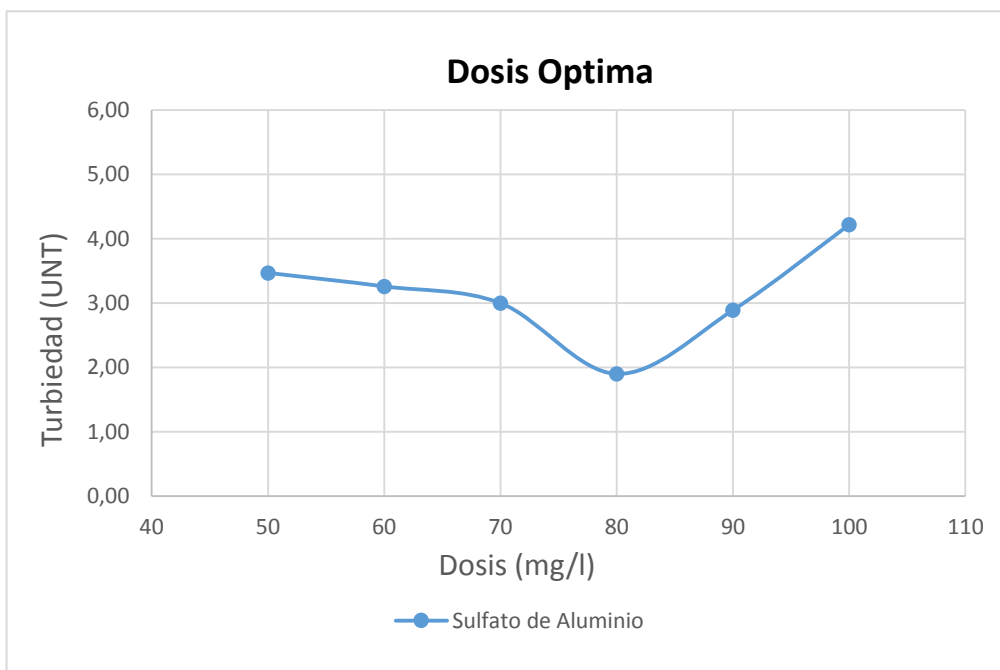
MUESTRA	
Turbiedad (UNT)	564
PH	7.82
Alcalinidad (ppm)	115
Conductividad (us/cm)	378
COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	VARIABLE
Conc. de sulfato de aluminio	1%

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
Gradiente = 40 s ⁻¹
T = 20'
DECANTACIÓN:
10'

Tabla 19. Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo V: 564 UNT

DOSIS (mg/l)	50	60	70	80	90	100
V (ml)	10	12	14	16	18	20
Turbiedad (UNT)	3.47	3.26	3.00	1.90	2.89	4.22

Figura 29. Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo V: 564 UNT



5.4.1.5.2 CONCENTRACIÓN ÓPTIMA

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

MUESTRA	
Turbiedad(UNT)	564
PH	7.82
Alcalinidad(mg/l)	115

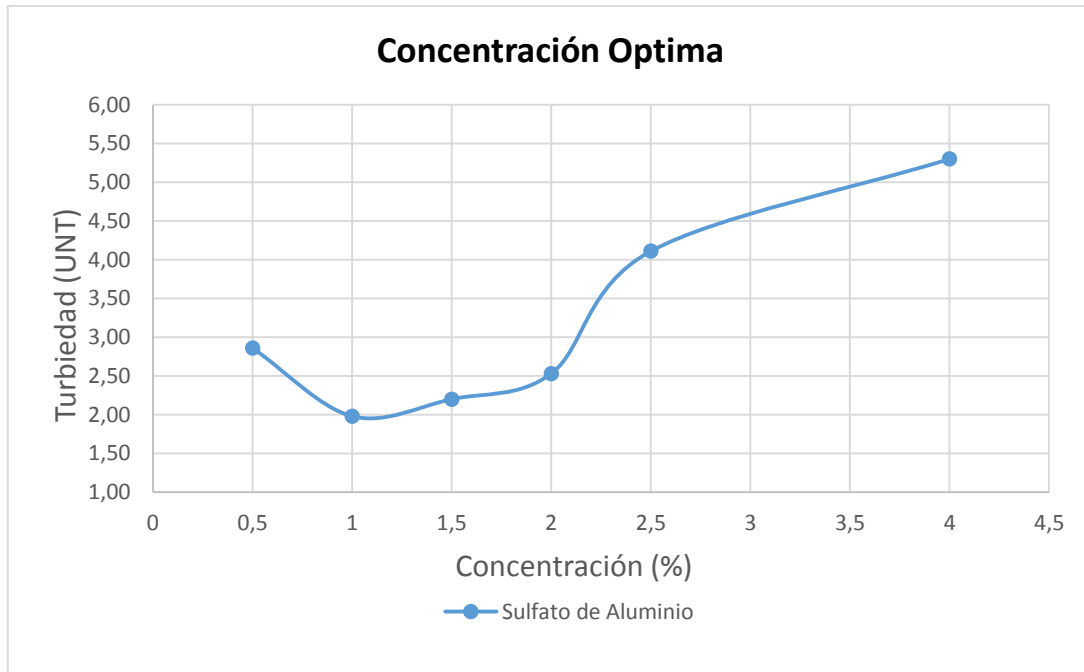
COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	80 mg/l
Conc. de sulfato de aluminio.	VARIABLE

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
Gradiente = 40 s ⁻¹
T = 20'
DECANTACIÓN
T = 10'

Tabla 20. Concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo V: 564 UNT.

C %	0.5	1	1.5	2	2.5	4
DOSIS (mg/l)	80	80	80	80	80	80
V (ml)	32.0	16.0	10.7	8.0	6.4	4.0
Turbiedad (UNT)	2.86	1.98	2.20	2.53	4.11	5.30

Figura 30. Curva concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo V: 564 UNT.



5.4.1.5.3 PH ÓPTIMO

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

MUESTRA	
Turbiedad(UNT)	564
PH natural	7.82
PH	VARIABLE
Alcalinidad (mg/l)	115

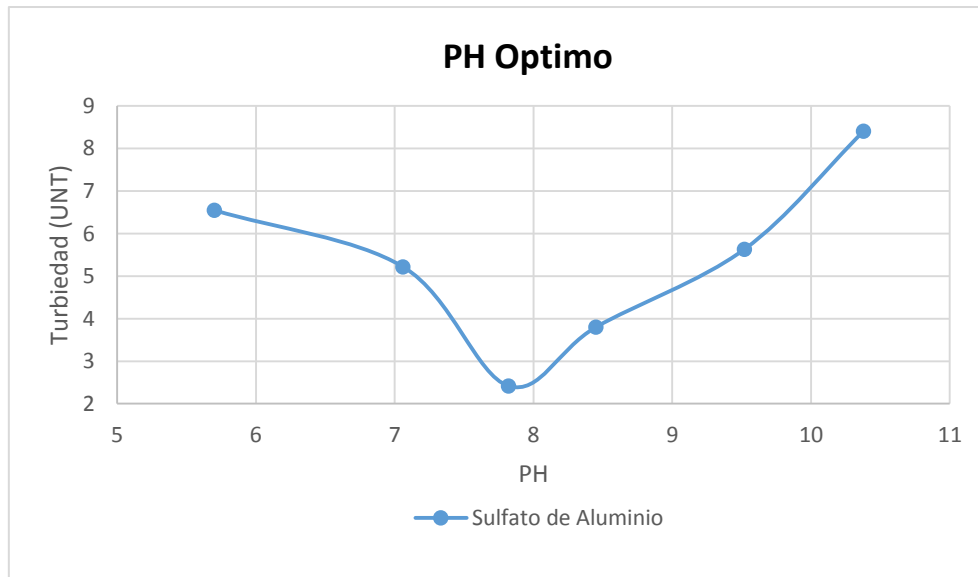
COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	80 mg/l
Conc. de sulfato de aluminio	1.0%

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
Gradiente = 40 s ⁻¹
T = 20'
DECANTACIÓN
T = 10'

Tabla 21. pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo V: 564 UNT

PH	5.7	7.06	7.82	8.45	9.52	10.38
Turbiedad (UNT)	6.55	5.22	2.42	3.80	5.63	8.41

Figura 31. Curva de pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo V: 564 UNT



Muestran resultados bastante típicos de un agua turbia, aumentando la dosis a 80 mg/l, manteniendo todavía una concentración de 1% a pH natural. El menor valor obtenido entre la dosis óptima y concentración óptima, 1.90 UNT, nos servirá para contrastar con los resultados del proceso de la electrocoagulación respecto al agua tipo V.

5.4.1.6 USO DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE.

AGUA TIPO VI: 742 UNT

5.4.1.6.1 DÓSIS ÓPTIMA

CALIDAD DE AGUA CRUDA

MUESTRA	
Turbiedad (UNT)	742
PH	8.14
Alcalinidad (ppm)	115
Conductividad (us/cm)	547

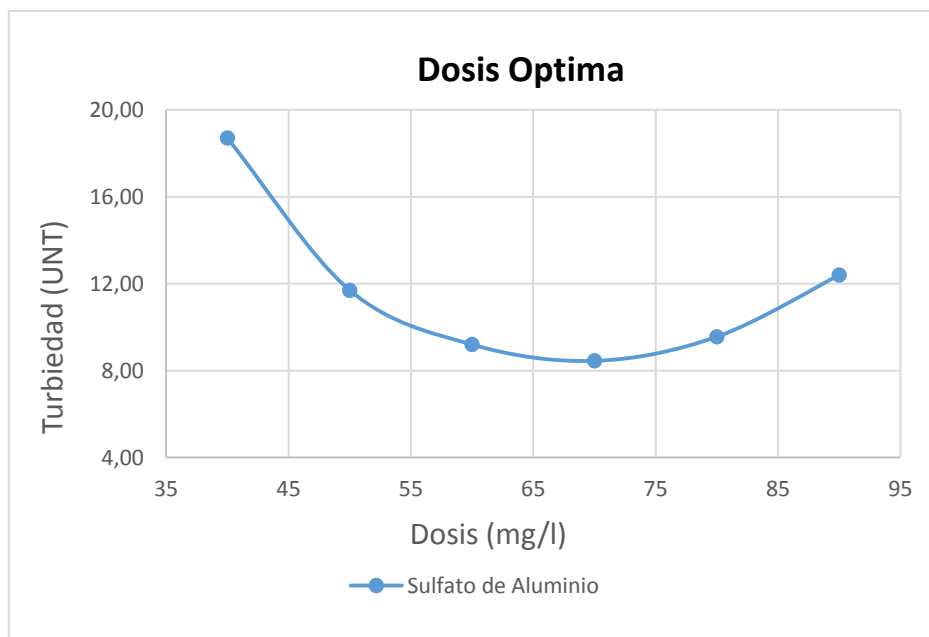
MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
Gradiente = 40 s ⁻¹
T = 20'
DECANTACIÓN
T = 10'

COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	VARIABLE
Conc. de sulfato de aluminio	3%

Tabla 22: Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VI: 742 UNT

DOSIS (mg/l)	40	50	60	70	80	90
V (ml)	2.7	3.3	4.0	4.7	5.3	6.0
Turbiedad (UNT)	18.7	11.7	9.2	8.45	9.56	12.4

Figura 32: Curva de dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VI: 742 UNT



5.4.1.6.2 CONCENTRACIÓN ÓPTIMA

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

MUESTRA	
Turbiedad(UNT)	742
PH	8.14
Alcalinidad(mg/l)	115

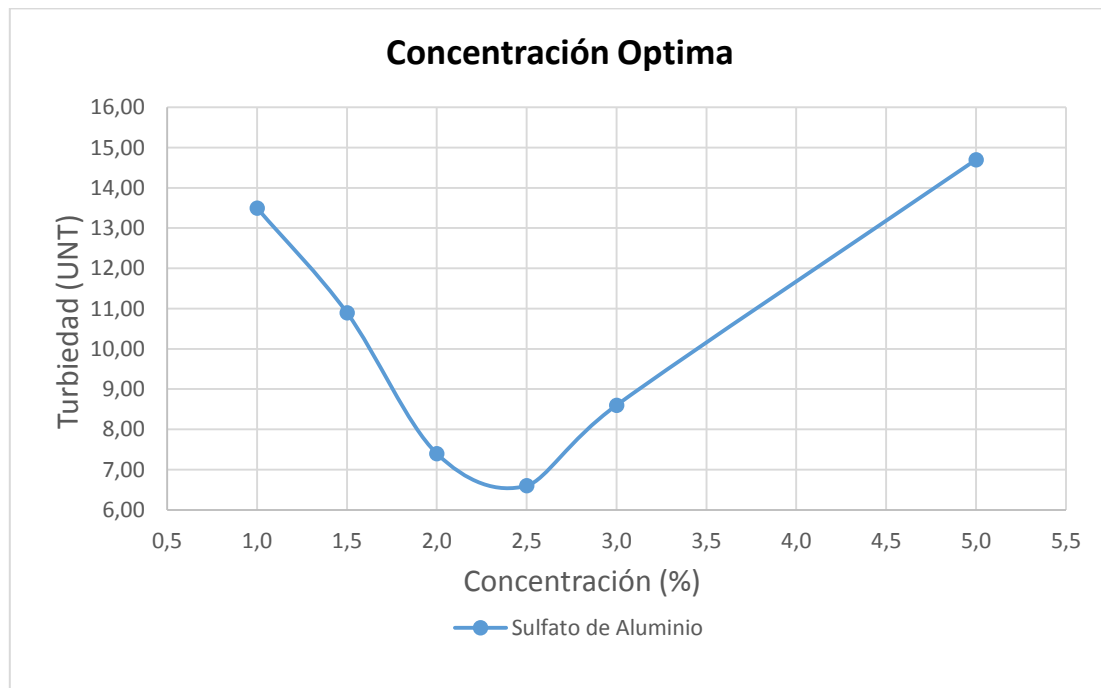
COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	70 mg/l
Conc. de sulfato de aluminio	VARIABLE

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
T = 20'
DECANTACIÓN:
10'

Tabla 23. Concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VI: 742 UNT

CONCENTRACION (%)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	5.0
DOSIS (mg/l)	70	70	70	70	70	70
V (ml)	14.0	9.3	7.0	5.6	4.7	2.8
Turbiedad (UNT)	13.50	10.9	7.40	6.60	8.60	14.7

Figura 33. Curva de concentración óptima sulfato de aluminio. Agua tipo VI: 742 UNT



5.4.1.6.3 PH ÓPTIMO

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

MUESTRA	
Turbiedad (UNT)	742
PH natural	8.14
PH	VARIABLE
Alcalinidad (mg/l)	115

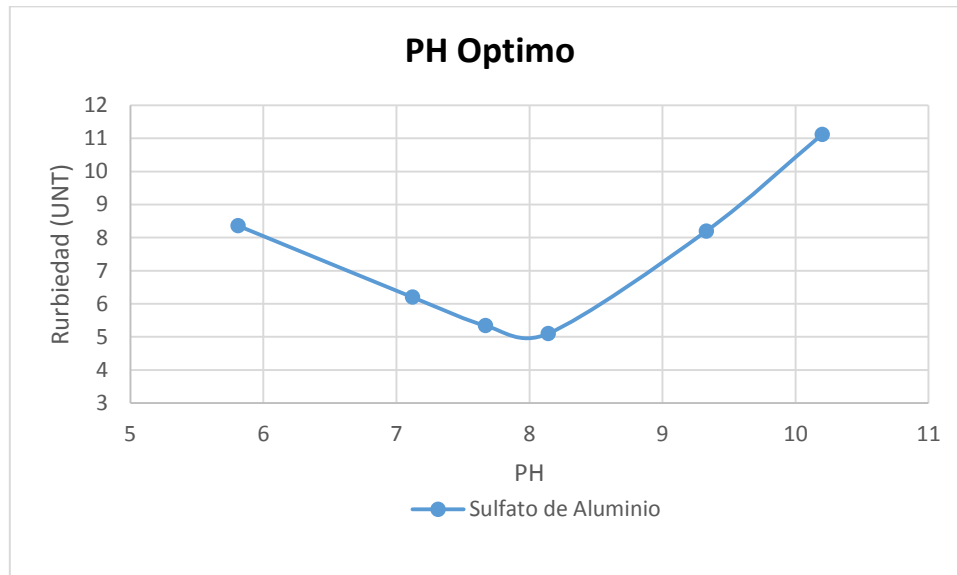
COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	70 mg/l
Conc. de sulfato de aluminio	2.5%

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
Gradiente = 40 s ⁻¹
T = 20'
DECANTACIÓN
T = 10'

Tabla 24. pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo VI: 742 UNT

PH	5.81	7.12	7.67	8.14	9.33	10.12
Turbiedad (UNT)	8.36	6.2	5.34	5.1	8.2	11.12

Figura 34. Curva de pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo VI: 742 UNT



El aumento de la concentración de partículas suspendida de esta agua turbia comienza hacer cambios en los parámetros, confirma el aumentando de la dosis a 70 mg/l, variando la concentración hasta 2.5 % y pH natural. El menor valor obtenido entre la dosis óptima y concentración óptima, 6.60 UNT, nos servirá para contrastar con los resultados del proceso de la electrocoagulación respecto al agua tipo VI.

5.4.1.7 USO DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE.

AGUA TIPO VII: 865 UNT

5.4.1.7.1 DÓSIS ÓPTIMA

CALIDAD DE AGUA CRUDA

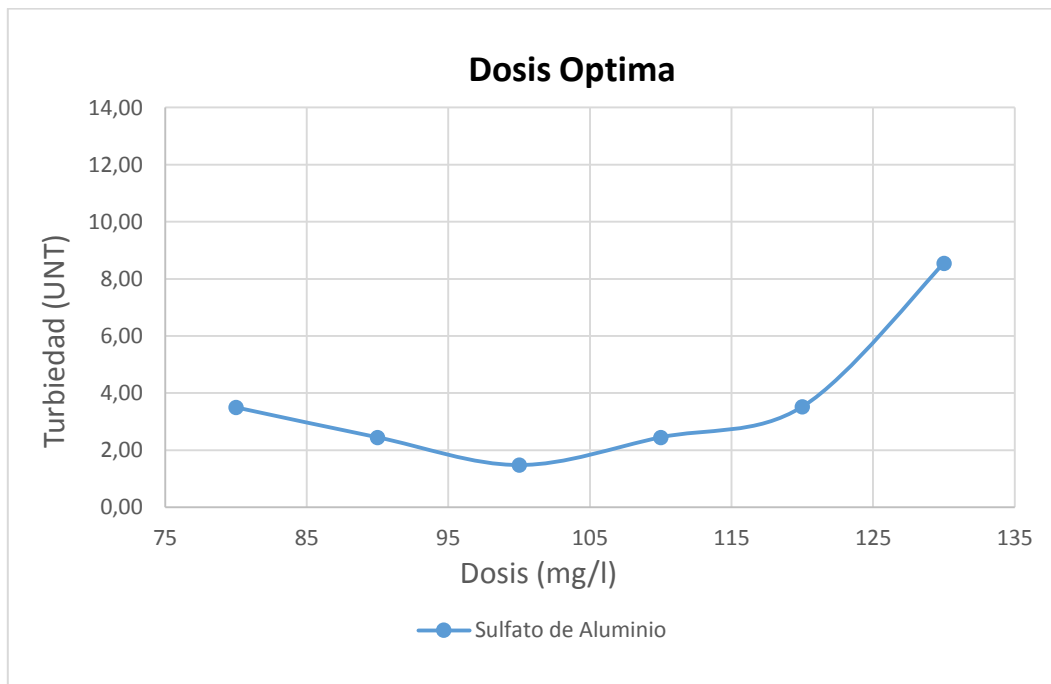
MUESTRA	
Turbiedad (UNT)	865
PH	7.85
Alcalinidad (ppm)	80
Conductividad (us/cm)	400
COAGULANTE	
Dosis de sulfato de aluminio	VARIABLE
Conc. de sulfato de aluminio	5%

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
T = 20'
DECANTACIÓN:
10'

Tabla 25. Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VII: 865 UNT

DOSIS (mg/l)	80	90	100	110	120	130	140
V (ml)	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8	5.2	5.6
Turbiedad (UNT)	3.50	2.45	1.48	2.45	3.52	8.55	15.9

Figura 35. Curva de la dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VII: 865 UNT



5.4.1.7.2 CONCENTRACIÓN ÓPTIMA

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

MUESTRA	
Turbiedad(UNT)	865
PH	7.85
Alcalinidad (ppm)	80

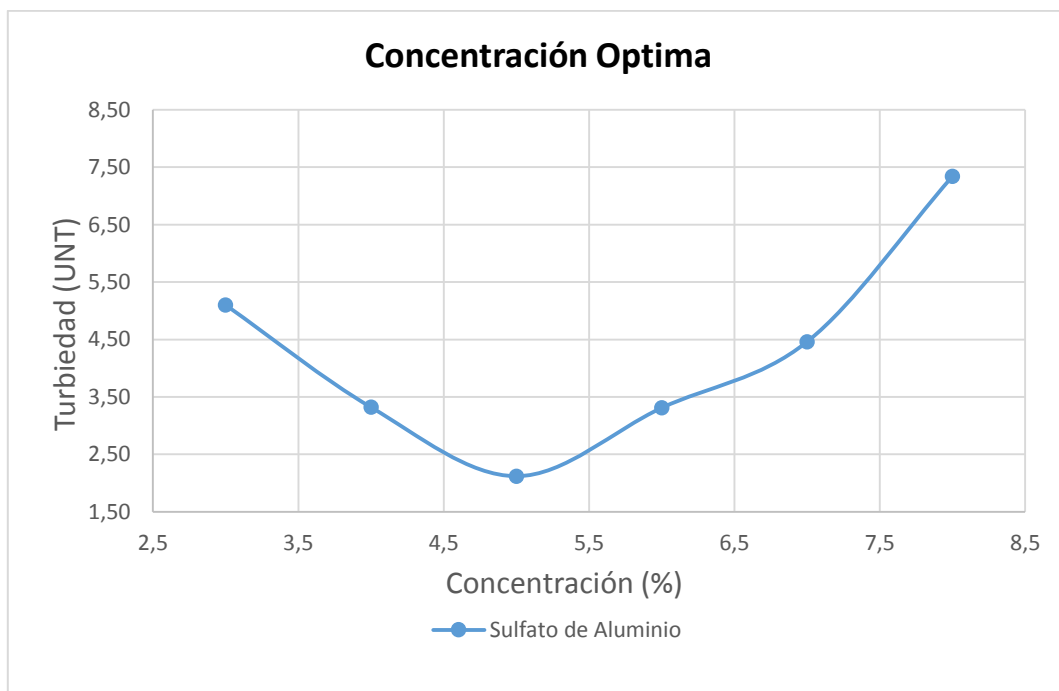
COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	100 mg/l
Conc. de sulfato de aluminio	VARIABLE

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
T = 20'
DECANTACIÓN:
10'

Tabla 26. Concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VI: 865 UNT

Concentración (%)	1	2	3	4	5	6	7	8
Dosis (mg/l)	100	100	100	100	100	100	100	100
Volumen (ml)	20.0	10.0	6.7	5.0	4.0	3.3	2.9	2.5
Turbiedad (UNT)	25.7	17.6	5.10	3.32	2.12	3.31	4.46	7.34

Figura 36. Curva de concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VII: 865 UNT



5.4.1.7.3 PH ÓPTIMO

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

MUESTRA	
Turbiedad (UNT)	865
PH natural	7.85
PH	VARIABLE
Alcalinidad (ppm)	80

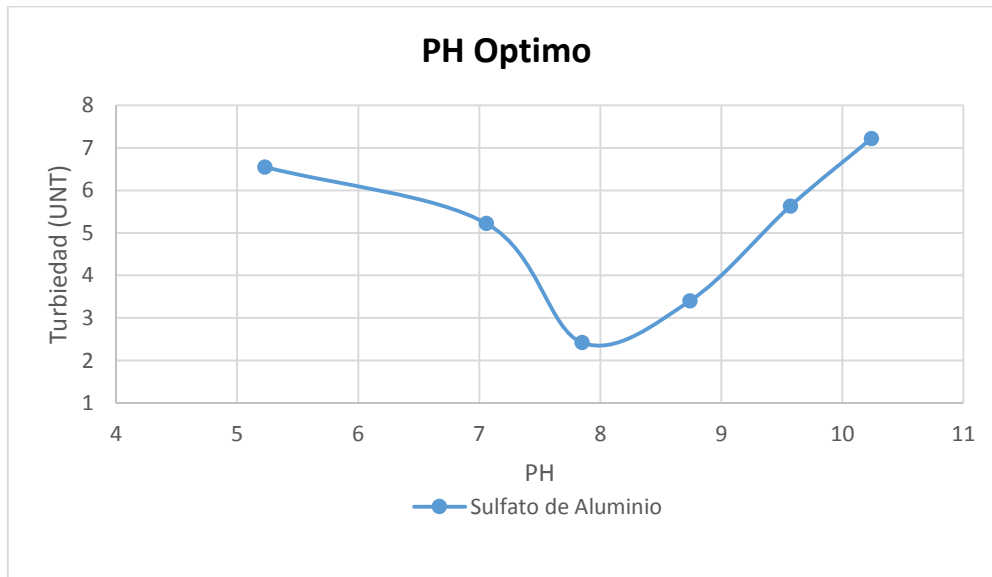
COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	100 mg/l
Conc. de sulfato de aluminio	5.0%

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 segundos
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
Gradiente = 40 s ⁻¹
T = 20'
DECANTACIÓN:
10'

Tabla 27. pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo VII: 865 UNT

PH	5.23	7.06	7.85	8.74	9.57	10.24
Turbiedad (UNT)	5.88	3.15	2.12	3.40	5.63	7.22

Figura 37. Curva de pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo VII: 865 UNT



Los resultados de esta agua bastante turbia, sigue confirmando el aumentando de la dosis hasta 100 mg/l y de la concentración hasta 5.0 % a pH natural. El menor valor obtenido entre la dosis óptima y concentración óptima, 1.48 UNT, nos servirá para contrastar con los resultados del proceso de la electrocoagulación respecto al agua tipo VII.

5.4.1.8 USO DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE.

AGUA TIPO VIII: 990 UNT

5.4.1.8.1 DÓSIS ÓPTIMA

CALIDAD DE AGUA CRUDA

MUESTRA	
Turbiedad (UNT)	990
PH	7.61
Alcalinidad (ppm)	85
Conductividad (us/cm)	426

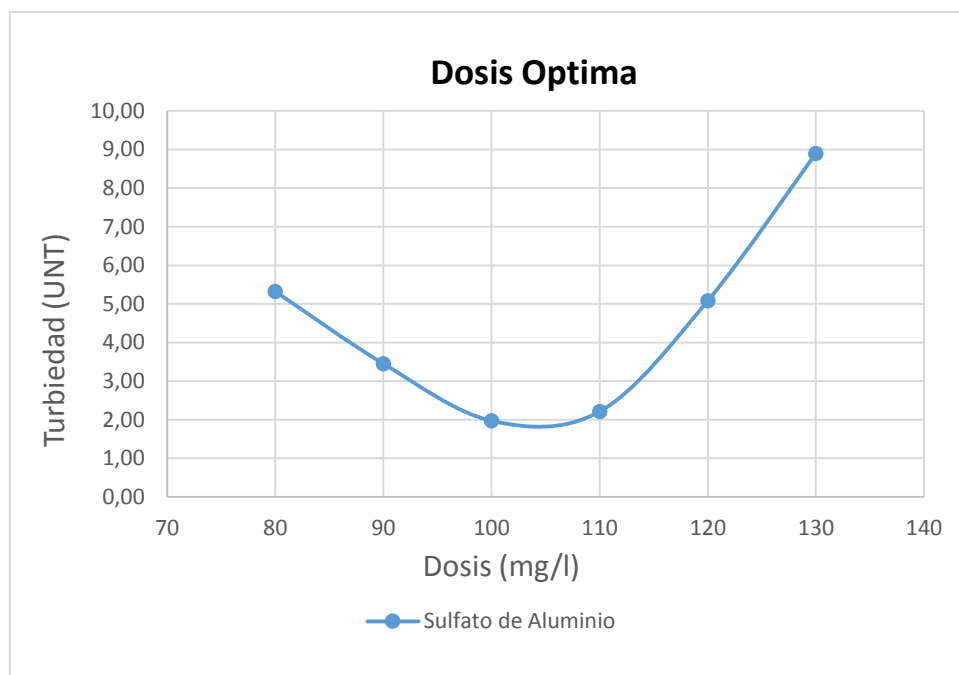
MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
Gradiente = 40 s ⁻¹
T = 20'
DECANTACIÓN:
10'

COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	VARIABLE
Conc. de sulfato de aluminio	5%

Tabla 28. Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VIII: 990 UNT

DOSIS (mg/l)	80	90	100	110	120	130	140
V (ml)	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8	5.2	5.6
Turbiedad (UNT)	5.32	3.45	1.97	2.21	5.08	8.90	10.4

Figura 38. Curva de dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VIII: 990 UNT



5.4.1.8.2 CONCENTRACIÓN ÓPTIMA

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

MUESTRA	
Turbiedad(UNT)	990
PH	7.61
Alcalinidad (ppm)	85

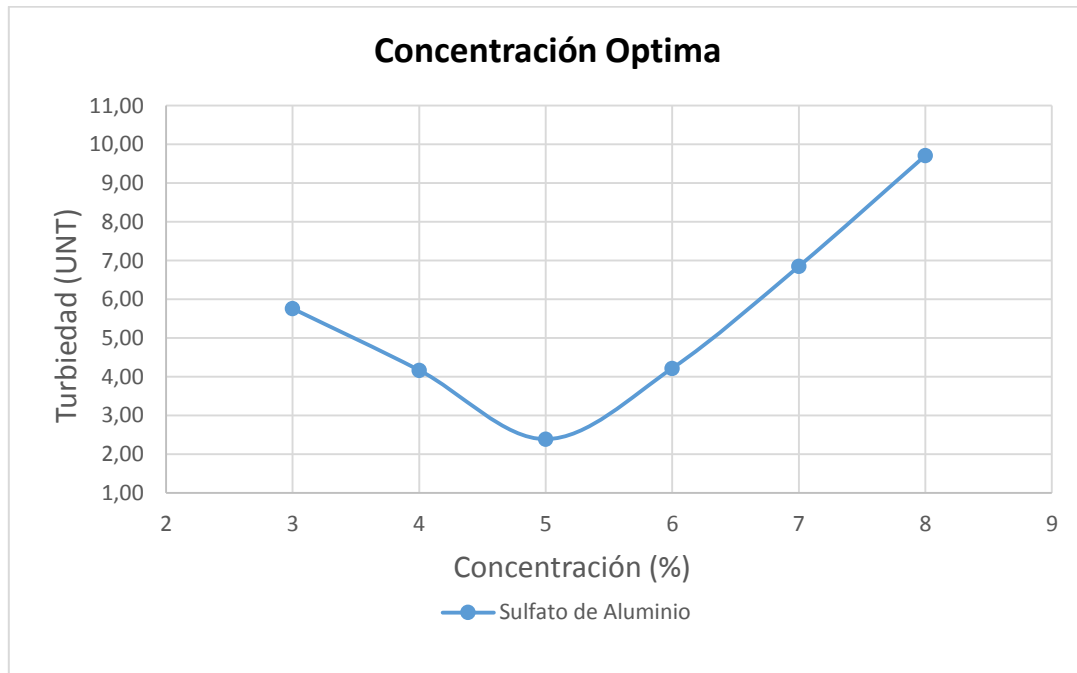
COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	100 mg/l
Conc. de sulfato de aluminio	VARIABLE

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
T = 20'
DECANTACIÓN: 10'

Tabla 29. Concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VI: 990 UNT

Concentración (%)	1	2	3	4	5	6	7	8
Dosis (mg/l)	100	100	100	100	100	100	100	100
Volumen (ml)	20.0	10.0	6.7	5.0	4.0	3.3	2.9	2.5
Turbiedad (UNT)	34.7	28.8	5.76	4.17	2.39	4.22	6.85	9.71

Figura 39. Curva de concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo VIII: 990 UNT



5.4.1.8.3 PH ÓPTIMO

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

MUESTRA	
Turbiedad (UNT)	990
PH natural	7.61
PH	VARIABLE
Alcalinidad (ppm)	85

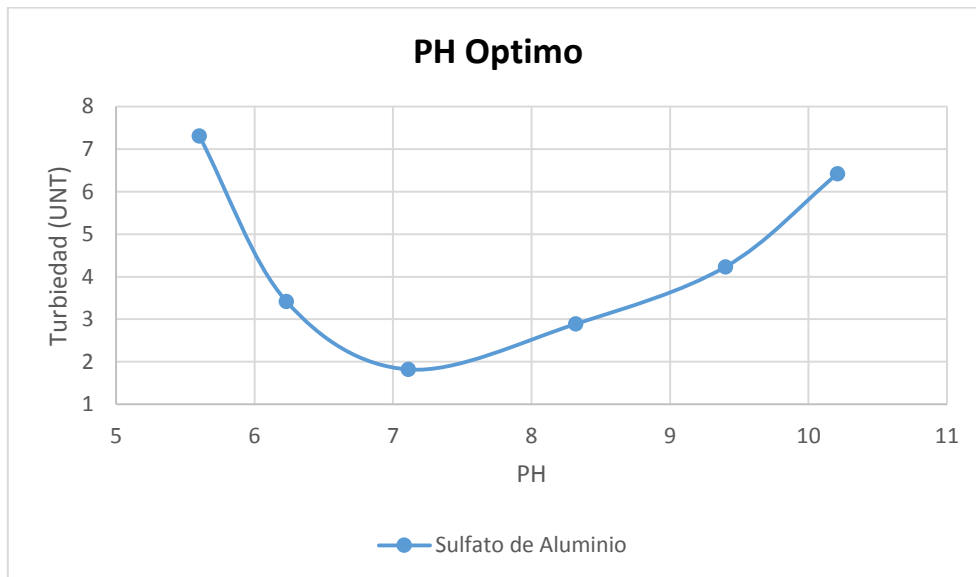
COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	100 mg/l
Conc. de sulfato de aluminio	5.0%

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
Gradiente = 40 s ⁻¹
T = 20'
DECANTACIÓN:
10'

Tabla 30. pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo VIII: 990 UNT

PH	5.6	6.23	7.61	8.32	9.40	10.21
Turbiedad (UNT)	7.31	3.52	1.89	2.89	4.23	6.42

Figura 40. Curva pH óptimo de sulfato de aluminio. Agua tipo VIII: 990 UNT



Los resultados de esta agua turbia presenta una dosis de 100 mg/l, mantiene la concentración en 5.0 % a pH natural. El menor valor obtenido entre la dosis óptima y concentración óptima, 1.97 UNT, nos servirá para contrastar con los resultados del proceso de la electrocoagulación respecto al agua tipo VIII.

5.4.1.9 USO DEL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE.

AGUA TIPO IX: 2313UNT

5.4.1.9.1 DÓSIS ÓPTIMA

CALIDAD DE AGUA CRUDA

MUESTRA	
Turbiedad (UNT)	2313
PH	8.2
Alcalinidad (ppm)	120
Conductividad (us/cm)	487

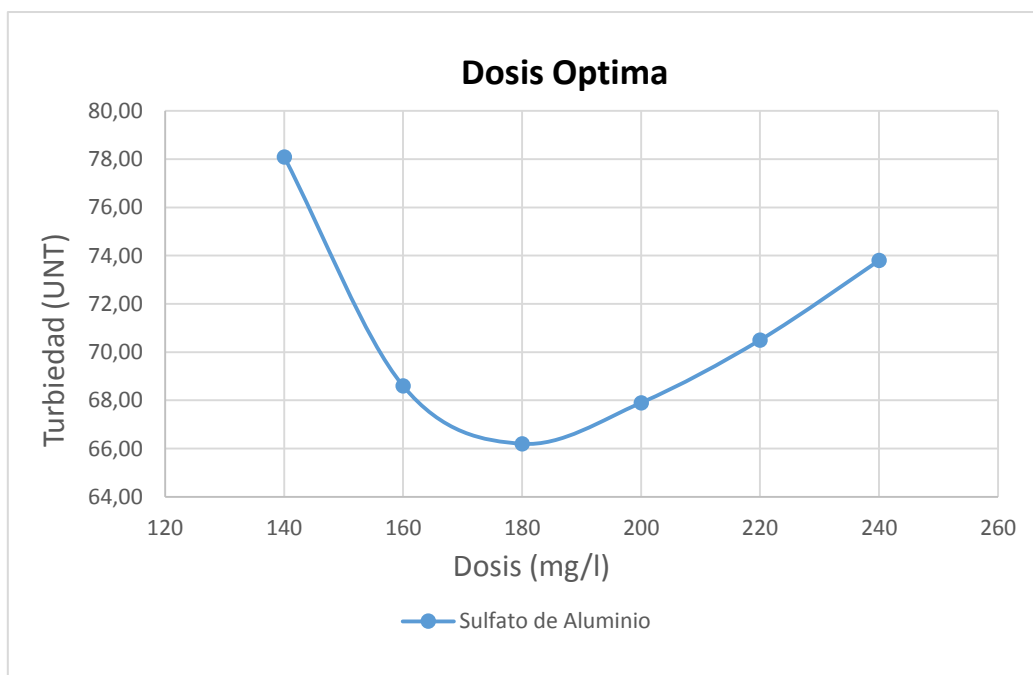
MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
Gradiente = 40 s ⁻¹
T = 20'
DECANTACIÓN:
10'

COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	VARIABLE
Conc. de sulfato de aluminio	10%

Tabla 31. Dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo IX: 2313 UNT

DOSIS (mg/l)	140	160	180	200	220	240
V (ml)	2.8	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8
Turbiedad (UNT)	78.1	68.6	66.2	67.9	70.5	73.80

Figura 41. Curva de dosis óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo IX: 2313 UNT



5.4.1.8.2 CONCENTRACIÓN ÓPTIMA

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

MUESTRA	
Turbiedad(UNT)	2313
PH	8.20
Alcalinidad (ppm)	120

COAGULANTES	
Dosis de sulfato de aluminio	180 mg/l
Conc. de sulfato de aluminio	VARIABLE

MEZCLA RÁPIDA
V = 300 RPM
T = 5 s
MEZCLA LENTA
V = 34 RPM
T = 20'
DECANTACIÓN: 10'

Tabla 32. Concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo IX: 2313 UNT

CONCENTRACION (%)	3	4	5	6	8	10	12	13	14
DOSIS (mg/l)	180	180	180	180	180	180	180	180	180
V (ml)	12.0	9.0	7.2	6.0	4.5	3.6	3.0	2.8	2.6
Turbiedad (UNT)	488	367	274	110.7	80.5	69.3	52.8	60.5	100.4

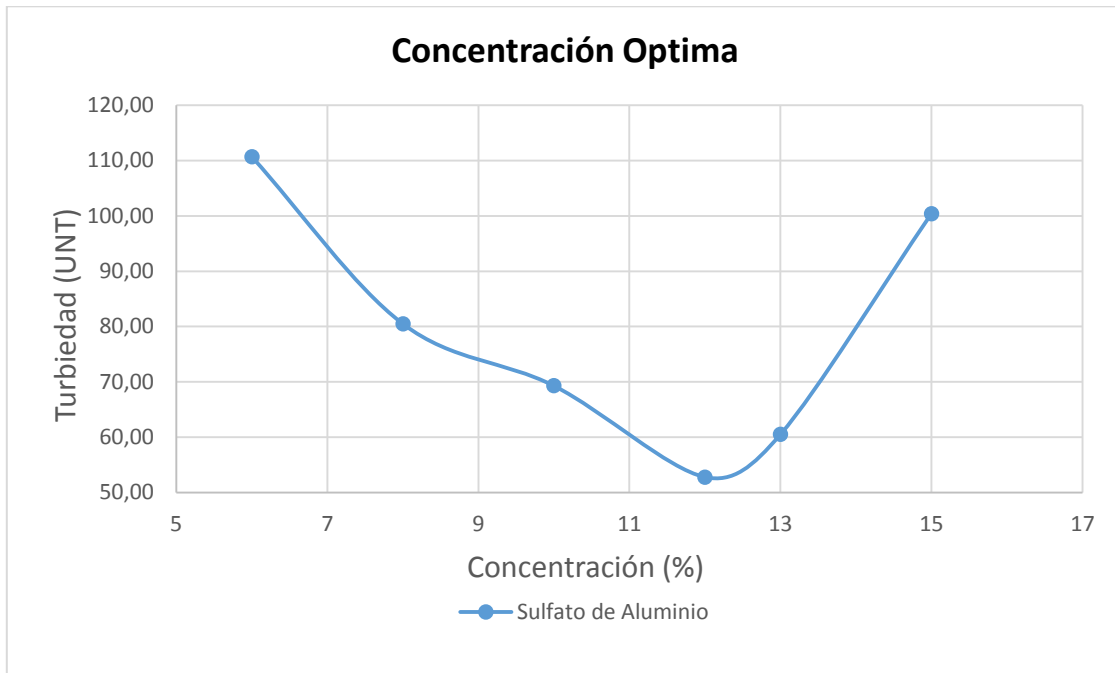
En la determinación de la dosis óptima, la concentración de 1% del sulfato de aluminio asumida por los antecedentes no respondió a una eficiente remoción de turbiedad.

Para lo cual, para este tipo de agua se hizo el estudio a partir de la determinación de la dosis óptima para las concentraciones de 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, 10%, 12% y 14%. Obteniendo un mejor comportamiento de remoción con 10%

Con los resultados conseguidos de la determinación de la dosis óptima, y 10% de concentración, lo que procede es la determinación de la concentración óptima.

De los resultados del estudio de la dosis y concentración óptima, se obtuvo una dosis óptima de 180 mg/l y concentración óptima de 12%.

Figura 42. Curva de concentración óptima de sulfato de aluminio. Agua tipo IX: 2313 UNT



Los resultados de este tipo de agua bastante turbia, presenta una dosis de 180 mg/l, concentración de 10 % a pH natural. Al proceso le cuesta alcanzar los valores de remoción de turbiedad propio de aquellos tipos de agua menores de 1000 UNT. El menor valor obtenido entre la dosis óptima y concentración óptima, 52.8 UNT, nos servirá para contrastar con los resultados del proceso de la electrocoagulación respecto al agua tipo IX.

5.4.2 MÉTODO DE LA ELECTROCOAGULACION

5.4.2.1 DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL PH

Antes de definir valores para el proceso de la electrocoagulación, buscaremos determinar si la variable del pH será un factor influyente para el proceso de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas superficiales.

Para ello, se presentarán tres valores de estudio de pH, 7, pH natural y 9. Por lo general, los valores de pH del agua natural de río varía entre 7.5 y 8.2.

Estudiaremos este comportamiento con 5 tipos de turbiedades de agua superficial, tipo I: 21 UNT, tipo IV: 300 UNT, tipo V: 564 UNT, tipo VIII: 990 y tipo IX: 2313 UNT.

El tiempo de evaluación será de 70 minutos. La reducción del pH a 7 se hará con ácido sulfúrico y el aumento de pH a 9 con hidróxido de sodio. Los resultados se presentarán en tabla de valores de turbiedad final y curvas de eficiencia de pH respecto a la turbiedad final y tiempo de tratamiento.

5.4.2.1.1 PH ÓPTIMO. AGUA TIPO I: 21 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

PH natural= 8.32

Conductividad = $237 \frac{\mu S}{cm}$

Distancia entre electrodos = 10 mm

Nº electrodos = 4 pares de Al - Fe

Volumen de tratamiento = 5.6 litros
 espesor= 1mm

Área electrodo= 10x10 cm;

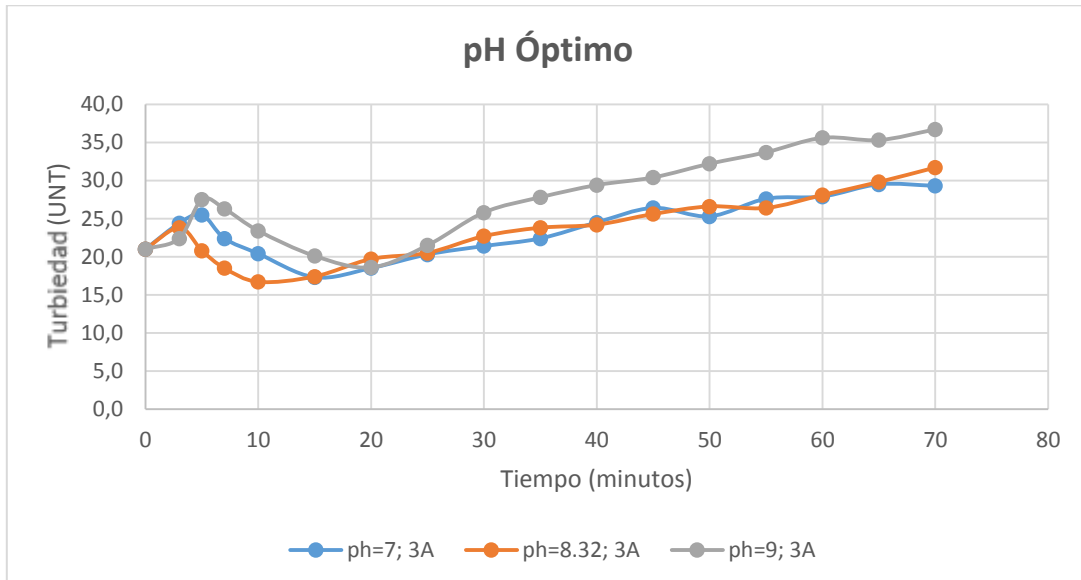
Tabla 33. Remoción de turbiedad mediante las variaciones del pH y amperaje. Agua tipo I: 21 UNT

Tiempo (minutos)	pH = 7.00			pH natural = 8.32			pH = 9.00		
	Amperios			Amperios			Amperios		
	5A	3A	1A	5A	3A	1A	5A	3A	1A
0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
3	26.4	24.4	22.6	27.3	23.8	30.5	25.3	22.4	28.6
5	28.9	25.5	24.4	29.5	20.8	33.2	28.6	27.5	30.8
7	30.3	22.4	25.6	31.9	18.5	35.0	30.5	26.3	33.5
10	33.4	20.4	27.8	37.8	16.7	34.8	34.7	23.4	36.8
15	35.7	17.3	29.6	38.5	17.4	36.2	37.6	20.1	39.5
20	38.7	18.5	30.5	40.3	19.7	31.8	39.8	18.6	39.4
25	37.6	20.3	27.6	41.4	20.5	30.6	43.7	21.5	42.4
30	39.8	21.4	24.7	43.5	22.7	32.2	45.9	25.8	40.6
35	38.6	22.4	22.3	44.8	23.8	29.6	44.6	27.8	39.7
40	36.1	24.5	21.5	47.5	24.2	27.8	48.8	29.4	35.6
45	35.8	26.4	19.4	49.3	25.6	24.7	50.8	30.4	31.2
50	37.7	25.3	20.8	49.1	26.6	21.5	51.3	32.2	28.6
55	35.6	27.6	22.5	50.6	26.4	18.2	55.6	33.7	25.6
60	34.5	27.9	23.6	48.3	28.1	19.6	57.5	35.6	23.6
65	35.8	29.5	25.6	46.6	29.8	21.8	59.9	35.3	27.8
70	36.2	29.3	24.8	48.7	31.7	23.1	57.8	36.7	29.8

Tabla 34. pH óptimo según tipo de amperaje. Agua tipo I: 21 UNT

Tiempo (minutos)	pH=7 3A	pH natural=8.32 3A	pH=9 3A
0	21.0	21.0	21.0
3	24.4	23.8	22.4
5	25.5	20.8	27.5
7	22.4	18.5	26.3
10	20.4	16.7	23.4
15	17.3	17.4	20.1
20	18.5	19.7	18.6
25	20.3	20.5	21.5
30	21.4	22.7	25.8
35	22.4	23.8	27.8
40	24.5	24.2	29.4
45	26.4	25.6	30.4
50	25.3	26.6	32.2
55	27.6	26.4	33.7
60	27.9	28.1	35.6
65	29.5	29.8	35.3
70	29.3	31.7	36.7

Figura 43. Curvas de eficiencia del pH respecto de las mejores amperajes. Agua tipo I: 21 UNT



Presentado los valores de turbiedad final a través de los 70 minutos de tratamiento en la tabla 33, por efecto de las variaciones del pH a distintas corrientes eléctricas. Así, para cada pH, se elige la corriente que logre una turbiedad final con el mejor resultado

en el menor tiempo. Obteniéndose así el consolidado de los mejores resultados en la tablas 34 y en la figura 43 las curvas de eficiencia del pH como los valores del pH óptimo: para el agua tipo I: 21 UNT pH=7 y 3A, 17.3 UNT; pH=8.32 y 3A, 16.7 UNT; pH=9 y 3A, 18.6 UNT.

5.4.2.1.2 PH ÓPTIMO. AGUA TIPO IV: 300 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

PH natural= 7.56

Conductividad = $345 \frac{\mu S}{cm}$

Distancia entre electrodos = 10 mm

Nº electrodos = 4 pares de Al - Fe

Volumen de tratamiento = 5.6 litros
 espesor= 1mm

Área de electrodos = 10x10 cm;

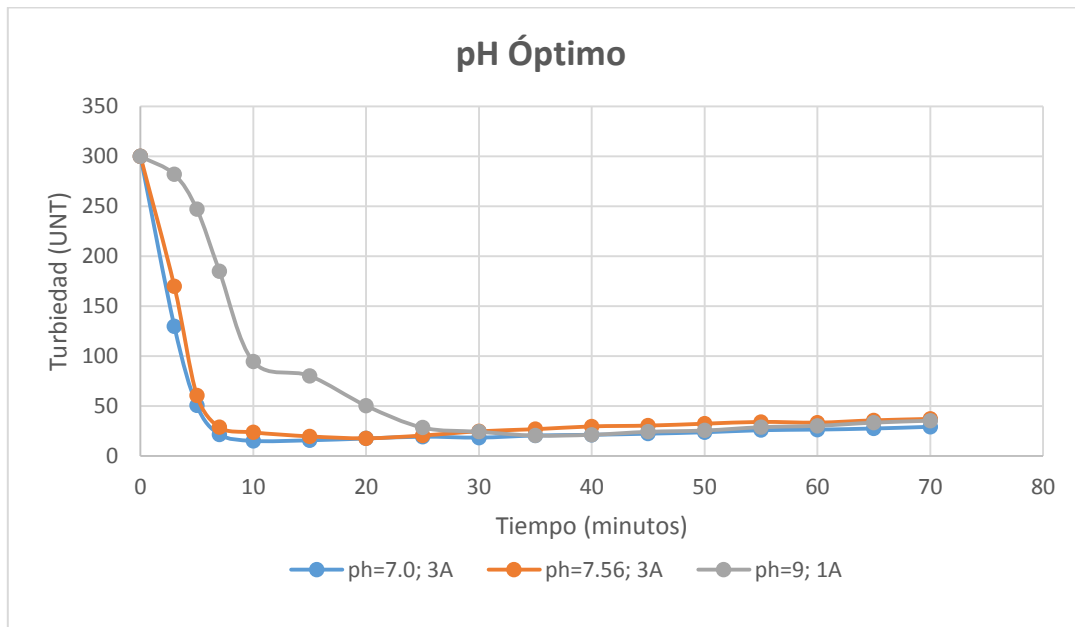
Tabla 35. Remoción de turbiedad mediante las variaciones del pH y amperaje. Agua tipo IV: 300 UNT

Tiempo (minutos)	pH = 7.00 Amperios			pH natural= 7.56 Amperios			pH = 9.00 Amperios		
	5A	3A	1A	5A	3A	1A	5A	3A	1A
0	300	300	300	300	300	300	300	300	300
3	130	230	265	170	250	270	195	255	282
5	50.6	132	210	60.8	180	234	127	205	247
7	21.7	65.7	170	28.8	90.3	195	75.8	123	185
10	15.2	31.4	112	23.7	40.5	110	38.6	56.7	94.6
15	15.8	22.6	48.6	19.7	29.4	84	27.8	29.5	80.3
20	17.6	15.4	27.8	17.8	24.2	46.7	24.5	26.5	50.4
25	19.4	16.7	22.1	20.6	20.3	32.1	26.7	22.4	28.5
30	18.5	18.6	17.3	24.8	17.4	25.4	25.8	23.6	24.3
35	20.6	20.4	19.4	26.9	18.6	21.3	28.9	25.8	20.5
40	21.3	22.8	21.5	29.7	19.6	18.4	33.7	29.6	21.3
45	22.4	23.1	24.5	30.5	24.3	20.3	36.7	30.2	24.3
50	23.8	25.9	25.3	32.4	27.8	21.2	38.4	32.1	25.6
55	25.9	26.4	26.7	34.2	27.5	24.3	40.3	36.8	28.9
60	26.5	28.7	24.5	33.5	29.6	23.1	44.1	41.2	30.3
65	27.6	29.5	26.1	35.8	31.2	25.6	47.2	43.7	33.5
70	29.3	30.4	27.6	37.2	30.5	27.7	49.4	42.6	35.4

Tabla 36. pH óptimo según tipo de amperaje. Agua tipo IV:300 UNT

Tiempo (minutos)	pH=7.0 3A	pH natural=7.56 3A	pH=9.0 1A
0	300	300	300
3	230	250	282
5	132	180	247
7	65.7	90.3	185
10	31.4	40.5	94.6
15	22.6	29.4	80.3
20	15.4	24.2	50.4
25	16.7	20.3	28.5
30	18.6	17.4	24.3
35	20.4	18.6	20.5
40	22.8	19.6	21.3
45	23.1	24.3	24.3
50	25.9	27.8	25.6
55	26.4	27.5	28.9
60	28.7	29.6	30.3
65	29.5	31.2	33.5
70	30.4	30.5	35.4

Figura 44. Curvas de eficiencia del pH respecto de las mejores amperajes. Agua tipo IV:300 UNT



El consolidado de los mejores resultados en las tablas 35 y 36 y en la figura 44 las curvas de eficiencia del pH como los valores del pH óptimo: para el agua tipo IV: 300 UNT pH=7.0 y 3A, 15.4 UNT; pH=7.56 y 3A, 17.4 UNT; pH=9.0 y 1A, 20.5 UNT.

5.4.2.1.3 PH ÓPTIMO. AGUA TIPO V: 564 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

PH natural= 7.82

Conductividad = $378 \frac{\mu S}{cm}$

Distancia entre electrodos = 10 mm

Nº electrodos = 4 pares de Al - Fe

Volumen de tratamiento = 5.6 litros

Área de electrodos = 10x10 cm;

espesor= 1mm

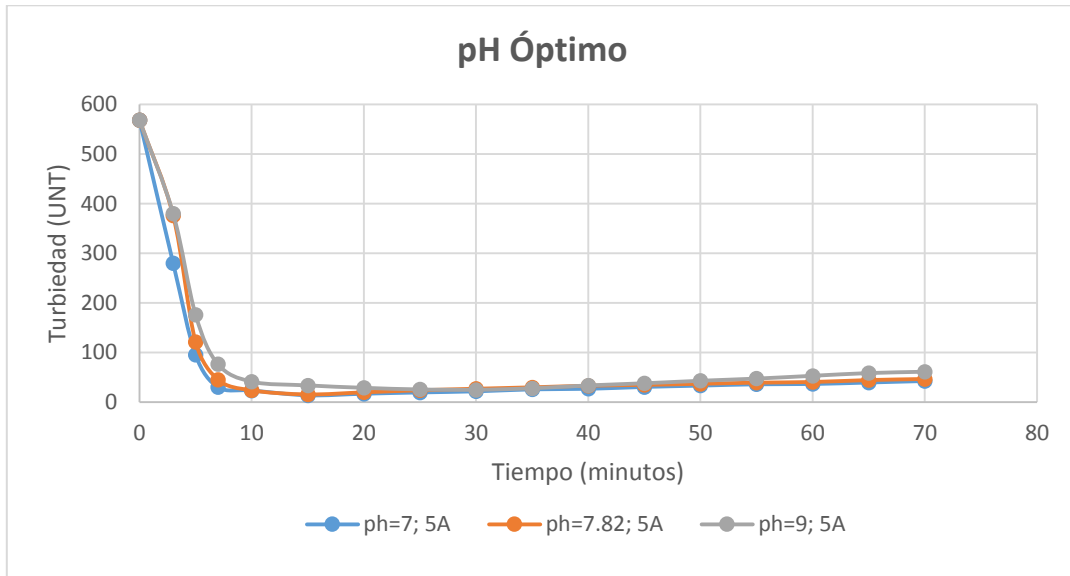
Tabla 37. Remoción de turbiedad mediante las variaciones del pH y amperaje. Agua tipo V: 564 UNT

Tiempo (minutos)	pH = 7.00			pH natural= 7.82			pH = 9.00		
	Amperios			Amperios			Amperios		
	5A	3A	1A	5A	3A	1A	5A	3A	1A
0	564	564	564	564	564	564	564	564	564
3	280	412	487	376	384	410	380	456	538
5	95.3	180	403	121	210	376	176	312	489
7	30.1	79.6	297	45.2	105	312	76.4	262	390
10	23.4	36.8	178	23.5	46.6	187	41.1	112	210
15	13.6	25.7	82.1	15.4	28.2	76.5	33.6	64.3	113
20	16.8	18.5	38.3	19.6	21.5	30.6	28.7	42.7	56.3
25	19.4	21.6	28.6	23.8	17.8	26.3	25.4	32.6	37.4
30	21.6	23.9	24.1	26.8	18.6	22.4	24.7	28.9	32.5
35	25.6	25.7	20.4	29.7	21.2	18.6	27.8	26.3	28.8
40	26.7	24.2	16.5	32.9	23.4	16.4	33.5	29.7	25.9
45	30.5	26.9	14.7	34.6	25.7	13.2	37.8	31.8	23.5
50	33.1	28.4	15.4	36.8	26.9	15.1	42.9	30.6	23.8
55	35.8	27.7	18.1	39.1	28.5	17.3	47.3	34.6	25.6
60	36.4	29.5	20.3	40.4	29.7	18.2	52.9	37.9	26.7
65	39.4	30.8	21.7	44.3	32.2	20.8	58.4	38.6	28.6
70	42.4	32.9	22.9	46.5	34.8	23.7	61.1	41.7	29.6

Tabla 38. pH óptimo según tipo de amperaje. Agua tipo V: 564 UNT

Tiempo (minutos)	pH=7.0 5A	pH natural=7.82 5A	pH=9.0 5A
0	564	564	564
3	280	376	380
5	95.3	121	176
7	30.1	45.2	76.4
10	23.4	23.5	41.1
15	13.6	15.4	33.6
20	16.8	19.6	28.7
25	19.4	23.8	25.4
30	21.6	26.8	24.7
35	25.6	29.7	27.8
40	26.7	32.9	33.5
45	30.5	34.6	37.8
50	33.1	36.8	42.9
55	35.8	39.1	47.3
60	36.4	40.4	52.9
65	39.4	44.3	58.4
70	42.4	46.5	61.1

Figura 45. Curvas de eficiencia del pH respecto de las mejores amperajes. Agua tipo V: 564 UNT



El consolidado de los mejores resultados en la tablas 37 y 38 y en la figura 45 las curvas de eficiencia del pH como los valores del pH óptimo: para el agua tipo V: 564 UNT pH=7.0 y 5A, 13.6 UNT; pH=7.82 y 5A, 15.4 UNT; pH=9 y 5A, 24.7 UNT.

5.4.2.1.4 PH ÓPTIMO. AGUA TIPO VIII: 990 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

PH natural= 7.61

Conductividad = $426 \frac{\mu S}{cm}$

Distancia entre electrodos = 10 mm

Nº electrodos = 4 pares de Al - Fe

Volumen de tratamiento = 5.6 litros
espesor= 1mm

Área de electrodos = 10x10 cm;

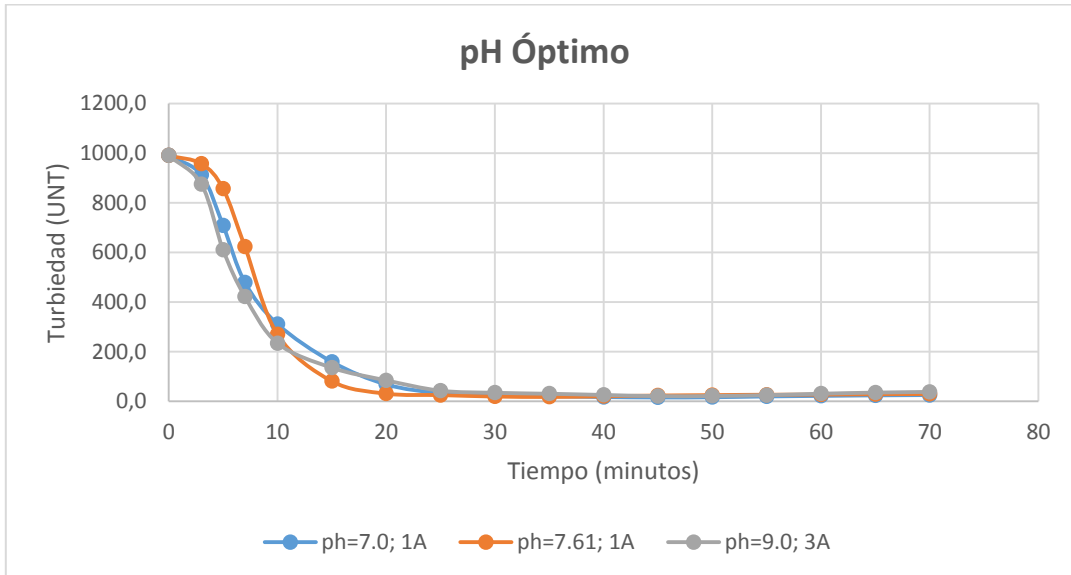
Tabla 39. Remoción de turbiedad mediante las variaciones del pH y amperaje. Agua tipo VIII: 990 UNT

Tiempo (minutos)	pH = 7.00			pH natural= 7.61			pH = 9.00		
	Amperios			Amperios			Amperios		
	5A	3A	1A	5A	3A	1A	5A	3A	1A
0	990.0	990.0	990.0	990.0	990.0	990.0	990.0	990.0	990.0
3	479.0	643.0	912.0	789.0	908.0	957.0	875	921.0	965.0
5	237.0	398.0	708.0	312.0	690.0	856.0	610	732.0	893.0
7	78.3	148.0	479.0	267.0	412.0	623.0	422	541.0	765.0
10	40.8	60.5	311.0	144.0	189.0	269.0	234	218.0	469.0
15	28.7	32.1	159.0	81.2	68.6	80.8	135	93.8	176.0
20	23.9	26.4	67.8	60.6	32.9	30.7	84.2	42.8	86.0
25	19.5	23.4	32.5	49.3	27.9	24.8	42.4	31.7	47.8
30	18.1	19.5	24.0	41.7	21.6	19.0	34.1	24.5	32.6
35	16.5	16.3	20.1	37.6	18.7	17.3	30.2	19.6	26.3
40	12.5	18.7	16.9	28.5	15.3	20.0	25.4	20.5	21.5
45	15.6	20.8	15.2	21.6	17.3	23.1	20.6	21.5	18.2
50	17.3	21.3	16.1	17.5	19.5	24.7	21.2	24.9	19.5
55	21.1	22.9	19.4	13.8	22.6	26.3	24.5	27.1	21.1
60	25.3	25.6	21.6	18.6	28.7	26.8	30.4	29.3	23.4
65	29.7	29.7	23.7	23.9	31.9	28.4	34.8	32.6	23.7
70	35.2	32.2	24.9	31.7	36.8	29.1	37.7	35.8	25.2

Tabla 40. pH óptimo según tipo de amperaje. Agua tipo VIII: 990 UNT

Tiempo (minutos)	Ph=7.0 1A	pH natural=7.61 1A	ph=9.0 3A
0	990.0	990.0	990.0
3	912.0	957.0	921.0
5	708.0	856.0	732.0
7	479.0	623.0	541.0
10	311.0	269.0	218.0
15	159.0	80.8	93.8
20	67.8	30.7	42.8
25	32.5	24.8	31.7
30	24.0	19.0	24.5
35	20.1	17.3	19.6
40	16.9	20.0	20.5
45	15.2	23.1	21.5
50	16.1	24.7	24.9
55	19.4	26.3	27.1
60	21.6	26.8	29.3
65	23.7	28.4	32.6
70	24.9	29.1	35.8

Figura 46. Curvas de eficiencia del pH respecto de las mejores amperajes. Agua tipo VIII: 990 UNT



El consolidado de los mejores resultados en las tablas 39 y 40 y en la figura 46 las curvas de eficiencia del pH como los valores del pH óptimo: para el agua tipo VIII: 990 UNT pH=7.0 y 1A, 15.2 UNT; pH=7.61 y 1A, 17.3 UNT; pH=9.0 y 3A, 19.6 UNT.

5.4.2.1.5 PH ÓPTIMO. AGUA TIPO IX: 2313 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

PH natural= 8.20

Conductividad = $487 \frac{\mu S}{cm}$

Distancia entre electrodos = 10 mm

Nº electrodos = 4 pares de Al - Fe

Volumen de tratamiento = 5.6 litros
 espesor= 1mm

Área de electrodos = 10x10 cm;

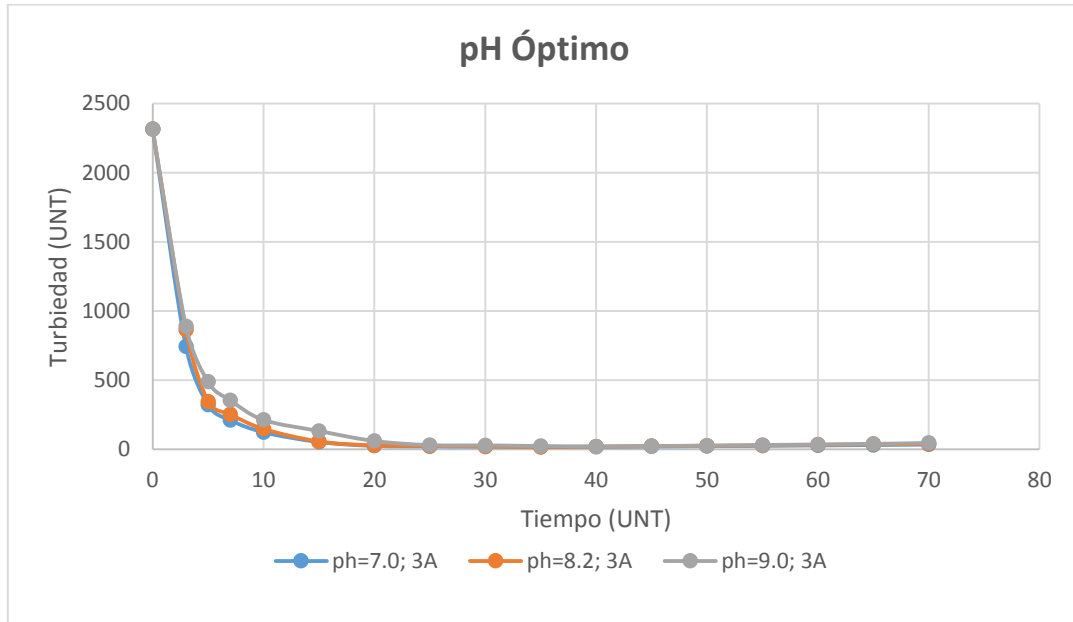
Tabla 41. Remoción de turbiedad mediante las variaciones del pH y amperaje. Agua tipo IX: 2313 UNT

Tiempo (minutos)	pH = 7.00			pH natural = 8.20			pH = 9.00		
	Amperios			Amperios			Amperios		
	5A	3A	1A	5A	3A	1A	5A	3A	1A
0	2313	2313	2313	2313	2313	2313	2313	2313	2313
3	793	743	1087	812	864	1800	856	889	1926
5	523	321	880	554	345	1589	576	487	1654
7	131	211	411	176	253	1342	213	354	1289
10	83.2	123	245	96.2	147	476	131	212	541
15	40.0	52.6	107	45.5	56.4	110	80.2	132	224
20	26.4	24.4	86.3	29.4	27.5	68.3	58.5	59.7	78.6
25	22.3	20.5	68.7	24.4	23.8	48.6	32.3	30.0	51.0
30	17.2	18.7	41.7	20.0	20.4	39.4	27.0	27.8	43.6
35	19.1	16.2	27.8	18.5	17.1	26.5	23.5	23.6	35.7
40	21.1	17.5	22.6	19.6	19.2	21.9	21.2	19.4	28.1
45	23.3	19.8	18.0	25.8	22.7	18.1	24.5	23.3	22.5
50	26.5	22.4	18.7	29.7	25.3	19.7	29.6	26.2	24.3
55	30.6	25.1	20.5	34.6	28.4	21.8	36.7	30.7	25.7
60	33.7	27.8	21.4	38.6	32.0	23.5	41.1	34.7	26.9
65	35.8	30.8	22.0	42.3	35.8	23.7	44.8	38.9	28.2
70	38.6	34.2	23.9	44.9	38.3	24.6	48.7	45.1	29.4

Tabla 42. pH óptimo según tipo de amperaje. Agua tipo IX: 2313 UNT

Tiempo (minutos)	pH=7.0 3A	pH natural=8.2 3A	pH=9.0 3A
0	2313	2313	2313
3	743	864	889
5	321	345	487
7	211	253	354
10	123	147	212
15	52.6	56.4	132
20	24.4	27.5	59.7
25	20.5	23.8	30.0
30	18.7	20.4	27.8
35	16.2	17.1	23.6
40	17.5	19.2	19.4
45	19.8	22.7	23.3
50	22.4	25.3	26.2
55	25.1	28.4	30.7
60	27.8	32.0	34.7
65	30.8	35.8	38.9
70	34.2	38.3	45.1

Figura 47. Curvas de eficiencia del pH respecto de las mejores amperajes. Agua tipo IX: 2313 UNT



El consolidado de los mejores resultados en las tablas 41 y 42 y en la figura 47 las curvas de eficiencia del pH como los valores del pH óptimo: para el agua tipo IX: 2313 UNT pH=7.0 y 3A, 16.2 UNT; pH=8.20 y 3A, 17.1 UNT; pH=9.0 y 3A, 19.4 UNT.

5.4.2.2 USO DE LA ELECTROQUÍMICA. AGUA TIPO I: 21 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

PH natural= 8.32

Conductividad = $237 \frac{\mu S}{cm}$

Distancia entre electrodos = 10 mm

Nº electrodos = 4 pares de Al - Fe

Volumen de tratamiento = 5.6 litros

Área electrodo= 10x10 cm; espesor= 1mm

1A – 3.9 voltios:

Tabla 43. Remoción de turbiedad a través del tiempo para agua tipo I: 21UNT a 1 amperio

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	33.6	37.1	39.4	35.2	33.2	33.3	33.1	34.8	31.5	29.0	25.5	24.1	22.1	22.5	19.7	20.4
	Sedimentación: 10'															
	32.7	36.3	38.4	33.45	30.4	31.2	32.1	31.2	30.5	28.5	23.4	22.1	20.7	20.1	18.3	19.2

El bajo amperaje que recibe el reactor, hace que la formación de iones coagulantes presentes en los hidróxidos solubles sea lenta, provocando que el tiempo de tratamiento se extienda. El proceso va formando flocs listos para flotar y decantar; pero si el tiempo se prolonga el mismo proceso que los formó termina por quebrar su estructura (por efecto de las reacciones electroquímicas) insertándolos al proceso, nuevamente, como partículas en suspensión en el agua tratada. Con este fenómeno adverso para la promoción de la formación de flocs se puede comprender por qué, la evolución de la remoción de la turbiedad mostrada en la tabla 43, la disminución de la turbiedad no es gradual y bien definida.

Este principio puede explicar también por qué es baja la eficiencia de remoción de turbiedad por efecto de los 10 minutos de sedimentación al que fueron sometidas las muestras que fueron tomadas a través del tiempo de tratamiento. La muestra de agua tratada presenta una composición de flocs muy finos que hace que decante muy lentamente.

3A – 11.7 voltios:

Tabla 44. Remoción de turbiedad a través del tiempo para agua tipo I: 21UNT a 3 amperios

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	25	19.7	16.3	14.7	15.7	16.7	17.0	19.1	20.0	21.6	22.5	24.6	24.5	26.7	28.6	29.1
	Sedimentación: 10'															
	24.2	18.3	15.2	13.4	14.2	15.2	16.3	17.7	18.4	20.6	20.4	23.1	22.7	25.2	26.8	25.6

Se mejora la remoción de turbiedad en tu tiempo de tratamiento de 10 minutos porque los 3 amperios generan a tiempo, los iones solubles para coagular las partículas; pero se repite el mismo fenómeno adverso mencionado en el proceso anterior de 1 amperio: la turbiedad empieza aumentar y las muestras sedimentadas no presentan una remoción de turbiedad importante (tabla 44).

5A – 23.4 voltios:

Tabla 45. Remoción de turbiedad a través del tiempo para agua tipo I: 21UNT a 5 amperios

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	29.4	28.4	32.7	35.6	38.4	39.5	40.6	40.3	42.5	46.3	47.7	48.4	47.2	45.6	44.8	46.8
	Sedimentación: 10'															
	28.5	26.4	30.8	33.4	36.4	37.1	38.8	38.3	40.3	45.6	44.3	45.6	44.9	43.5	42.4	44.6

El movimiento turbulento generado por una corriente de 5 amperios, provoca que desde un inicio los flocs no terminen por formarse y los que consiguen hacerlo, terminan por romperse. Los resultados de la tabla 45 lo muestran así, y basta ver que a los 70 minutos aún no termina por definirse la remoción de manera positiva e incluso ha aumentado en más del doble del valor inicial de la turbiedad de la muestra.

Figura 48. Remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo I: 21 UNT

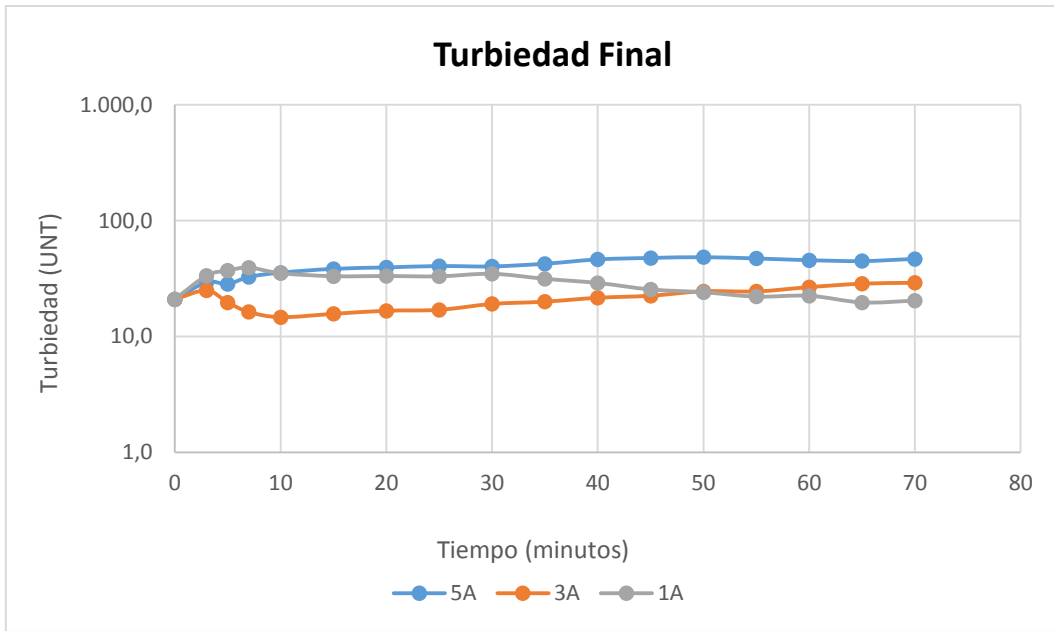
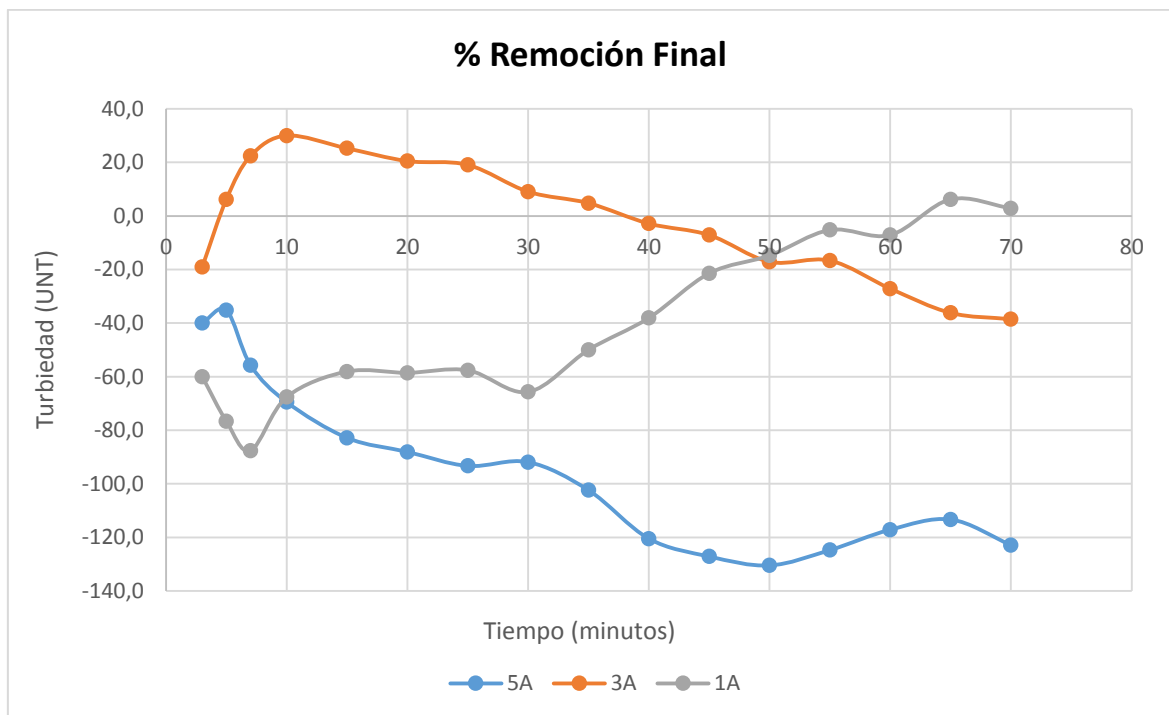


Figura 49. Porcentaje de remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo I: 21 UNT



La remoción de turbiedad para aguas claras no se desarrolla de manera eficiente, ver tablas 43 y 45. Debido al burbujeo de iones de hidrógeno que origina un aumento inicial de turbiedad superior al de la muestra, para luego estabilizarse y provocar la flotación y

sedimentación de las partículas coloidales. A mayor corriente de tratamiento (en el caso de 5 amperios), el incremento de turbiedad por parte del proceso, aumenta gradualmente. Sólo una corriente intermedia como la de 3 amperios responde a una remoción aceptable de la turbiedad, ver tabla 44.

Las figuras 48 y 49 pueden reflejar mejor dicho comportamiento poco eficiente del proceso para este tipo de agua, donde la corriente de 3 amperios presenta una remoción de turbiedad máxima de casi 40% en un tiempo de 10 minutos y que sólo se puede considerar como aceptable. Todas las muestras sometidas a 10 minutos de sedimentación tampoco producen una remoción importante de la turbiedad presentándose variaciones sólo entre 1 y 3.5 UNT. Así, para la mejor remoción de turbiedad que corresponde a la corriente de 3 amperios, los 14.7 UNT medidos a los 10 minutos sólo son removidos 1.3 UNT por efecto de la sedimentación entregando una turbiedad final de 13.4 UNT, ver tabla 44.

5.4.2.3 USO DE LA ELECTROQUÍMICA. AGUA TIPO II: 135 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

PH natural= 8.20

Conductividad = $370 \frac{\mu S}{cm}$

Distancia entre electrodos = 10 mm

Nº electrodos = 4 pares de Al - Fe

Volumen de tratamiento = 5.6 litros

Área electrodo= 10x10 cm; espesor= 1mm

1A -2.8 voltios:

Tabla 46. Remoción de turbiedad a través del tiempo para agua tipo II: 135 UNT a 1 amperio

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	130	88.5	68.4	58.8	45.6	38.0	34.2	31.8	30.3	28.5	24.9	22.1	19.2	23.4	24.6	25.6
	Sedimentación: 10'															
	123	77.7	70.4	47.1	42.0	35.3	30.8	28.9	27.8	26.3	22.7	20.4	19.0	18.7	21.3	23.4

El proceso no es favorecido por efecto de la corriente de 1 amperio. Tiempo de tratamiento muy prolongado y los valores de remoción no tan aceptables. Los valores de la sedimentación de las muestras tampoco presentan cambios importantes. Véase tabla 46.

3A – 12.1 voltios

Tabla 47. Remoción de turbiedad a través del tiempo para agua tipo II: 135 UNT a 3 amperios

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	125	87.9	54.6	29.9	22.3	20.6	20.8	34.5	28.8	35.1	31.6	38.7	34.7	33.0	32.0	35.7
	Sedimentación: 10'															
	96.5	68.7	46.0	27.5	20.5	19.6	19.2	26.4	22.0	24.8	24.7	34.1	30.3	31.5	30.8	33.7

Mejora el tiempo de tratamiento, pero la remoción de turbiedad casi no hay variación, véase tabla 47. Confirma que un aumento de la corriente no tan pronunciada mejoran los valores de la remoción. La sedimentación de las primeras muestras, hasta los 7 minutos, es alta respecto de la remoción de turbiedad; pero los siguientes minutos decae.

5A – 23.6 voltios:

Tabla 48. Remoción de turbiedad a través del tiempo para agua tipo II: 135 UNT a 5 amperios

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	68.0	37.4	20.1	18.7	29.3	42.7	33.0	30.6	28.5	24.3	21.9	20.3	18.3	17.4	20.9	21.3
	Sedimentación: 10'															
	60.2	35.2	19.3	17.2	24.7	38,4	29.1	27.5	26.8	22.9	20.1	19.2	17.4	17.2	18.6	20.1

Aquí, mejora la remoción de la turbiedad, pero el tiempo de tratamiento se extiende. La influencia de la corriente de 5 amperios produce turbulencia al medio por efecto de las reacciones electroquímicas. Los cambios en la sedimentación de las muestras no presentan cambios importantes (tabla 48).

Figura 50. Remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo II: 135 UNT

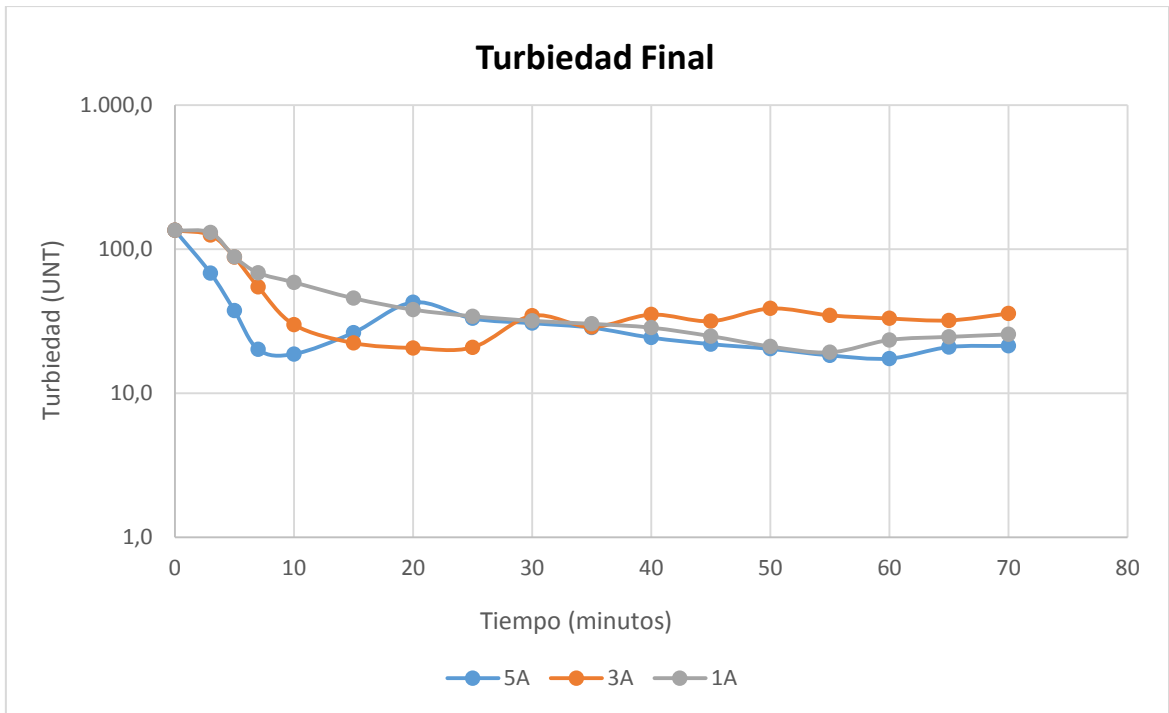
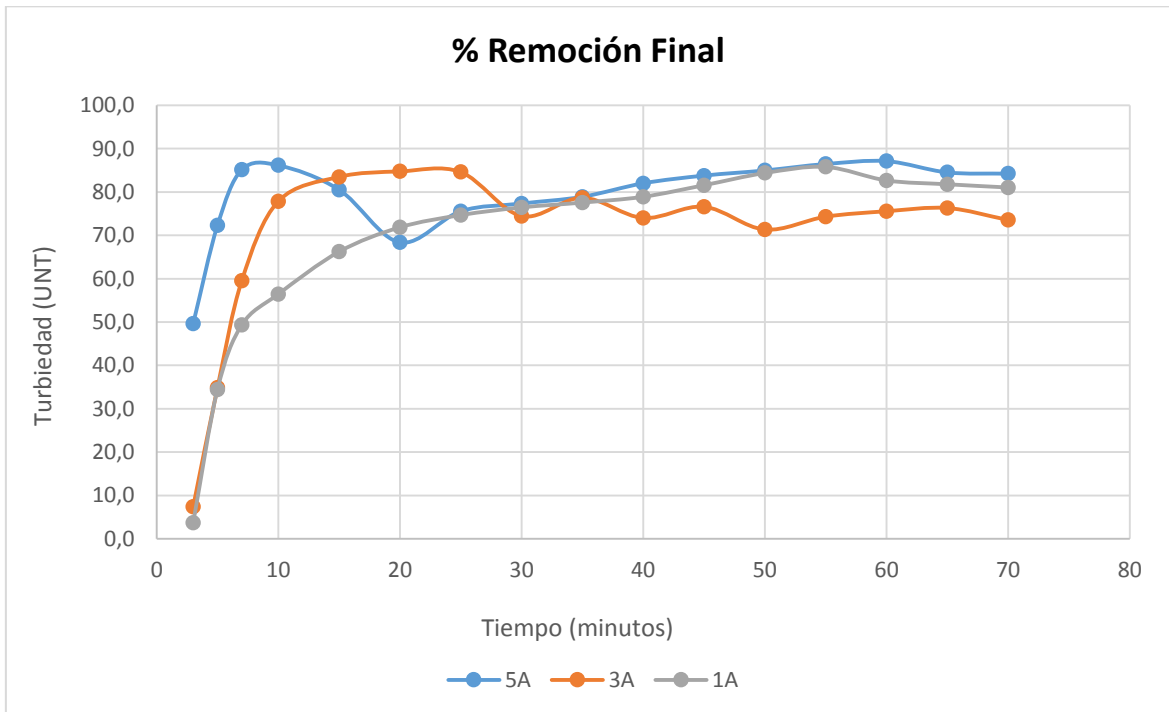


Figura 51. Porcentaje remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo II: 135 UNT



La remoción de turbiedad aumenta a medida que aumenta también la turbiedad de la muestra. Los porcentajes de remoción son 86.15%, 84.74% y 85.78% para amperajes

de 5A, 3A, 1A respectivamente. Así como también tiempos de tratamiento son 10, 20 y 55 minutos para las corrientes de 5A, 3A, 1A respectivamente. Aunque la corriente de 1 amperio presenta un mejor porcentaje de remoción que la de 3 amperios, el tiempo que necesita para lograrlo no sería muy favorable técnica y económicamente, ver figuras 50 y 51. La corriente de 3 amperios entrega el mejor valor de turbiedad final, 20.6 UNT, con porcentaje de remoción de 84.74% en un tiempo de 20 minutos. Por lo tanto, para una corriente de 3 amperios, se da las mejores condiciones de remoción de turbiedad y funcionamiento.

5.4.2.4 USO DE LA ELECTROQUÍMICA. AGUA TIPO III: 212 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

PH natural= 7.78

Conductividad = $322 \frac{\mu S}{cm}$

Distancia entre electrodos = 10 mm

Nº electrodos = 4 pares de Al - Fe

Volumen de tratamiento = 5.6 litros

Área electrodo= 10x10 cm; espesor= 1mm

1A - 2.9 voltios:

Tabla 49. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo III: 212 UNT a 1 amperios

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	205	195	180	170	79.9	47.9	40.4	32.7	26.4	23.7	20.2	18.1	21.3	25.0	29.0	30.0
	Sedimentación: 10'															
	178	169	160	120	40.3	38.6	36.2	30.4	23.2	20.5	18.4	17.3	20.4	23.4	26.8	27.6

Tenemos un tiempo de tratamiento extenso y una remoción de turbiedad sin mucha variación respecto al anterior tipo de agua. Igualmente las variaciones de remoción de turbiedad de las muestras de agua tratadas no presentan variación importante (tabla 49).

3A – 12.4 voltios:

Tabla 50. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo III: 212 UNT a 3 amperios.

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	180	90.2	48.2	32.1	26.5	20.5	16.3	18.6	19.0	20.0	24.0	26.0	31.0	33.2	35.1	36.7
	Sedimentación: 10'															
	170	83.5	44.3	30.5	24.6	18.5	15.3	16.7	18.3	18.2	22.5	24.8	30.1	32.6	34.1	34.3

Mejora la remoción de la turbiedad y el tiempo de tratamiento se reduce a un tiempo de 25 minutos. Los primeros 7 minutos presenta una importante remoción de la turbiedad por sedimentación y después la variación de remoción decae a valores entre 1 y 2.4 UNT, ver tabla 50.

5A – 23.9 voltios

Tabla 51. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo III: 212 UNT a 5 amperios

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	312	72.2	29.2	19.2	14.6	13.4	14.3	15.6	17.0	18.0	17.0	20.2	24.1	28.0	30.0	33.0
	Sedimentación: 10'															
	93.3	54.3	19.2	12.9	11.4	11.3	13.6	15.1	16.3	17.4	16.1	18.4	24.0	26.8	28.5	31.5

La corriente de 5 amperios empieza a ser más eficiente presentando mejores valores de remoción de turbiedad y tiempo de tratamiento, ver tabla 51. Para 13.4 UNT como mejor valor de remoción se ha conseguido disminuir la turbiedad hasta 11.3 UNT por sedimentación.

Figura 52. Remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo III: 212 UNT

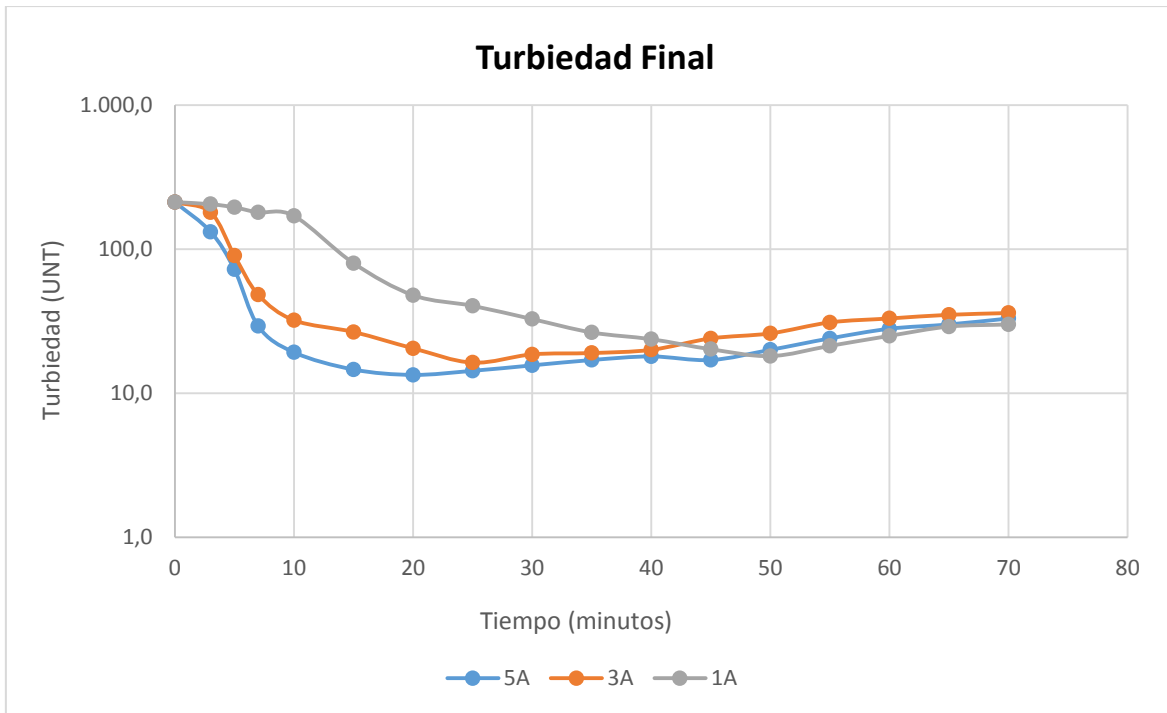
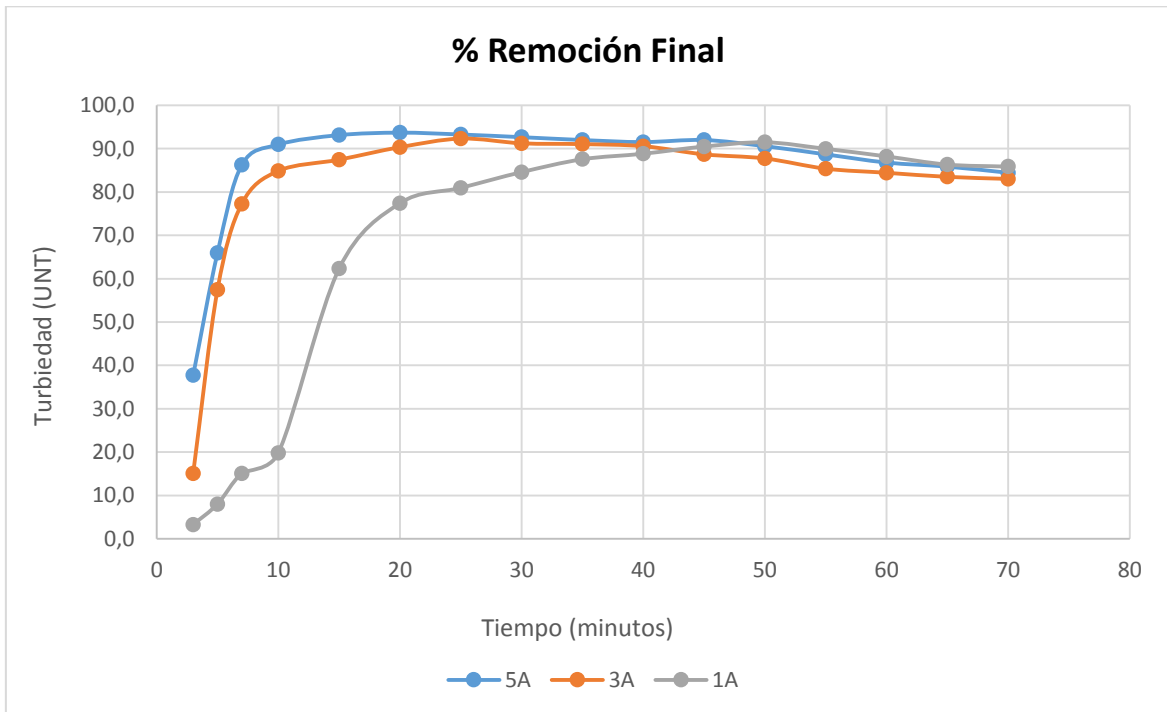


Figura 53. Porcentaje remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo III: 212 UNT



Nuevamente, la remoción de turbiedad aumenta a medida que aumenta también la turbiedad de la muestra. También, los porcentajes de remoción mejoran con 96.68%,

92.31% y 91.46% para amperajes de 5A, 3A, 1A respectivamente. Los mejores tiempos de tratamiento son 20, 25 y 50 minutos para las corrientes de 5A, 3A, 1A respectivamente. La corriente de 5 amperios entrega el mejor valor de turbiedad final, 13.4 UNT, con porcentaje de remoción de 96.68%, en un tiempo de tratamiento de 20 minutos, ver figuras 52 y 53. Por lo tanto, para una corriente de 5 amperios, se da las mejores condiciones de remoción de turbiedad y funcionamiento.

5.4.2.5 USO DE LA ELECTROQUÍMICA. AGUA TIPO IV: 300 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

PH natural= 7.56

Conductividad = $345 \frac{\mu S}{cm}$

Distancia entre electrodos = 10 mm

Nº electrodos = 4 pares de Al - Fe

Volumen de tratamiento = 5.6 litros

Área electrodos=10x10cm; espesor= 1mm

1A - 3.1 voltios:

Tabla 52. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo IV: 300 UNT a 1 amperio

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	200	197	182	135	60.2	35.2	23.7	17.3	15.3	16.1	17.4	17.9	19.3	21.0	25.3	27.4
	Sedimentación: 10'															
	145	130	135	110	45.3	23.7	21.3	15.4	14.2	15.1	16.5	16.3	18.2	19.4	24.1	25.6

El tiempo de tratamiento ha disminuido respecto a los anteriores tiempos de los otros tipos de agua con corriente de 1 amperio, presentando una remoción de turbiedad de 15.3 UNT en 35 minutos. Para 15.3 UNT como mejor valor de remoción se ha conseguido disminuir la turbiedad hasta 14.2 UNT por sedimentación (tabla 52).

3A – 12.5 voltios:

Tabla 53. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo IV: 300 UNT a 3 amperios

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	245	144	55.1	24.8	14.5	14.8	15.4	17.4	20.3	23.6	25.0	27.3	29.3	30.1	32.5	32.1
	Sedimentación: 10'															
	146	97.7	47.9	21.0	13.4	13.9	14.8	15.7	18.6	22.1	23.4	26.2	27.4	28.4	30.1	29.6

Mejora la remoción de turbiedad final, 14.5 UNT, y tiempo de tratamiento de 15 minutos. Para 14.5 UNT como mejor valor de remoción se ha conseguido disminuir la turbiedad hasta 13.4 UNT por sedimentación (tabla 53).

5A – 24.3 voltios:

Tabla 54. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo IV: 300 UNT a 5 amperios

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	122	38.5	15.1	13.2	14.6	20.8	21.1	22.4	23.0	25.2	25.7	26.1	29.2	29.7	30.0	34.3
	Sedimentación: 10'															
	80.3	20.6	14.7	13.1	13.9	18.3	20.4	21.8	22.1	23.6	24.3	25.1	28.4	27.9	28.4	32.7

Mejora la remoción de turbiedad final, 13.2 UNT, y tiempo de tratamiento, 10 minutos. Por efecto del aumento de la corriente, la remoción mejora. Para 13.2 UNT como mejor valor de remoción se ha conseguido disminuir la turbiedad hasta 13.1 UNT por sedimentación (tabla 54).

Figura 54. Remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo IV: 300 UNT

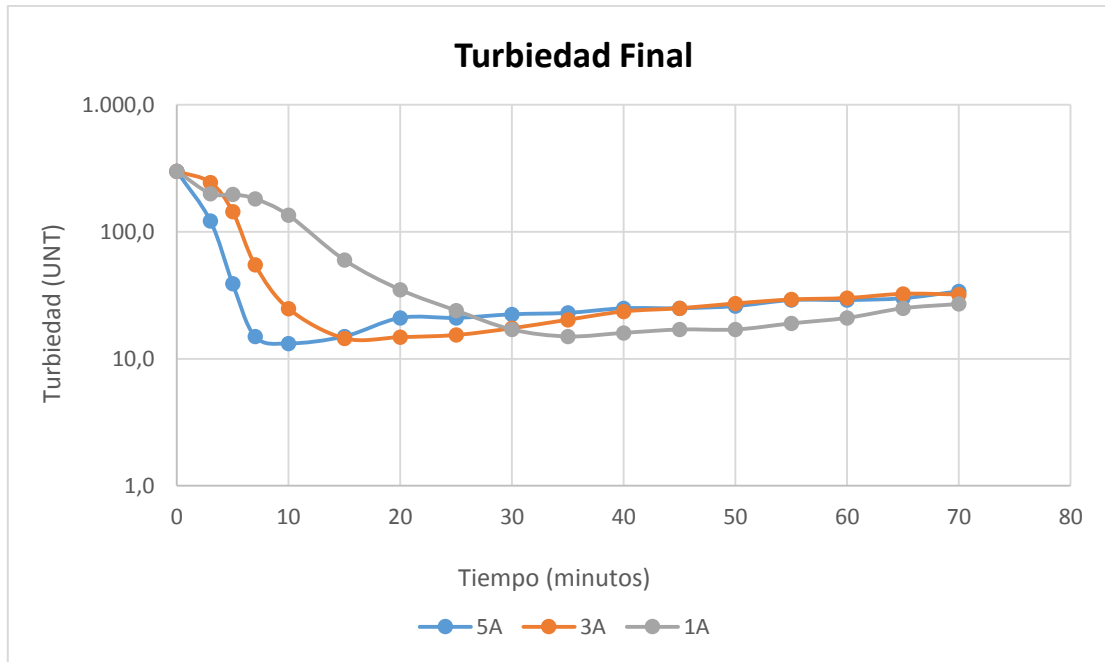
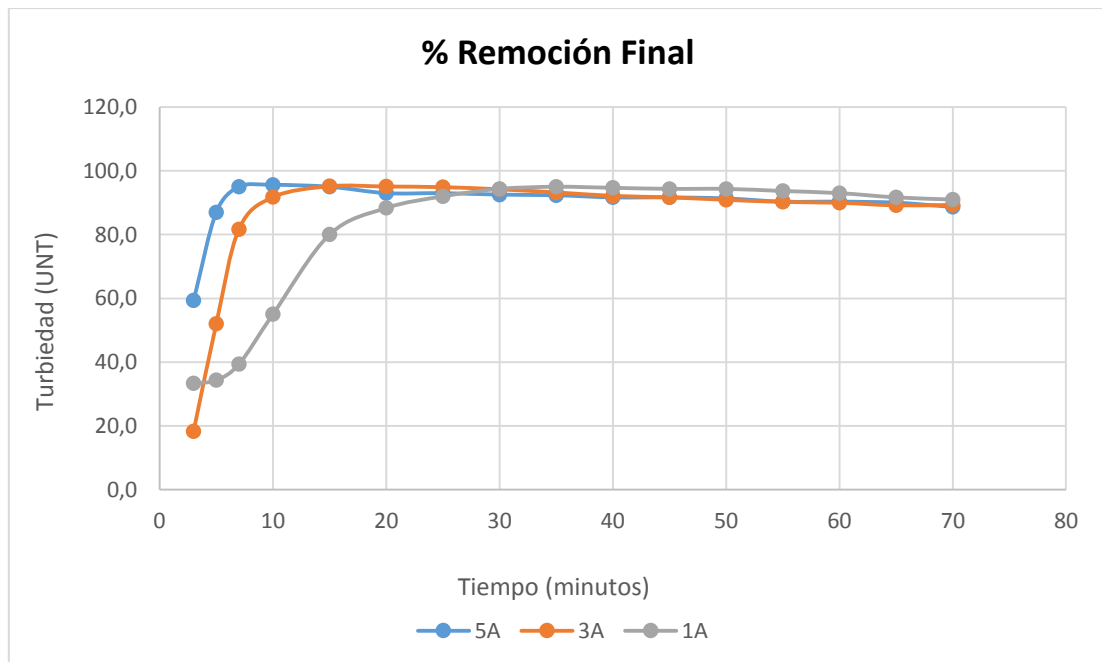


Figura 55. Porcentaje remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo IV: 300 UNT



El proceso presenta porcentajes de remoción de 95.60%, 95.17% y 94.90% para amperajes de 5A, 3A, 1A respectivamente. Los mejores tiempos de tratamiento son 10, 15 y 35 minutos para las corrientes de 5A, 3A, 1A respectivamente. La corriente de 5 amperios entrega el mejor valor de turbiedad final, 13.2 UNT, con porcentaje de

remoción de 95.60%, en un tiempo de tratamiento de 10 minutos, ver figuras 54 y 55. Por lo tanto, para una corriente de 5 amperios, se da las mejores condiciones de remoción de turbiedad y funcionamiento.

5.4.2.6 USO DE LA ELECTROQUÍMICA. AGUA TIPO V: 564 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

PH natural= 7.82

Conductividad = $378 \frac{\mu S}{cm}$

Distancia entre electrodos = 10 mm

Nº electrodos = 4 pares de Al - Fe

Volumen de tratamiento = 5.6 litros

Área electrodos=10x10 cm; espesor= 1mm

1A -2.9 voltios:

Tabla 55. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo V: 564 UNT a 1 amperio

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	442	386	333	253	99.3	41.6	25.5	20.3	17.8	15.7	14.4	12.5	13.5	16.4	18.6	25.3
	Sedimentación: 10'															
	269	244	228	161	77.7	37.1	22.7	18.8	16.6	15.2	13.3	11.7	11.3	15.2	16.8	24.1

El tiempo de tratamiento mantiene su valor alto que ya es propio de esta corriente. Presenta una remoción de turbiedad de 12.5 UNT en 55 minutos. Para 12.5 UNT como mejor valor de remoción se ha conseguido disminuir la turbiedad hasta 11.7 UNT por sedimentación (tabla 55).

3A – 12.3 voltios:

Tabla 56. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo V: 564 UNT a 3 amperios

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	365	188	70.6	31.8	19.6	18.7	15.7	17.4	19.1	19.8	23.4	25.6	26.8	28.9	30.4	33.5
	Sedimentación: 10'															
	196	129	61.0	24.5	15.6	15.9	14.4	15.3	17.3	16.8	22.4	23.6	24.2	26.1	27.8	31.1

La remoción de turbiedad final es de 15.7 UNT, y tiempo de tratamiento de 25 minutos. Para 15.7 UNT como mejor valor de remoción se ha conseguido disminuir la turbiedad hasta 14.4 UNT por sedimentación (tabla 56).

5A – 24.6 voltios:

Tabla 57. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo V: 564 UNT a 5 amperios

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	391	93.0	32.6	14.4	20.6	18.10	22.7	29.3	31.4	32.7	33.8	35.8	37.8	37.5	36.4	33.6
	Sedimentación: 10'															
	200	71.6	26.0	13.1	15.1	16.7	17.0	17.2	27.2	28.1	30.6	32.4	34.2	35.3	33.1	30.8

Mejora la remoción de turbiedad final a 14.4 UNT a un tiempo de tratamiento de 10 minutos. Por efecto del aumento de la corriente, la remoción mejora. Para 14.4 UNT como mejor valor de remoción se ha conseguido disminuir la turbiedad hasta 13.1 UNT por sedimentación (tabla 57).

Figura 56. Remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo V: 564 UNT

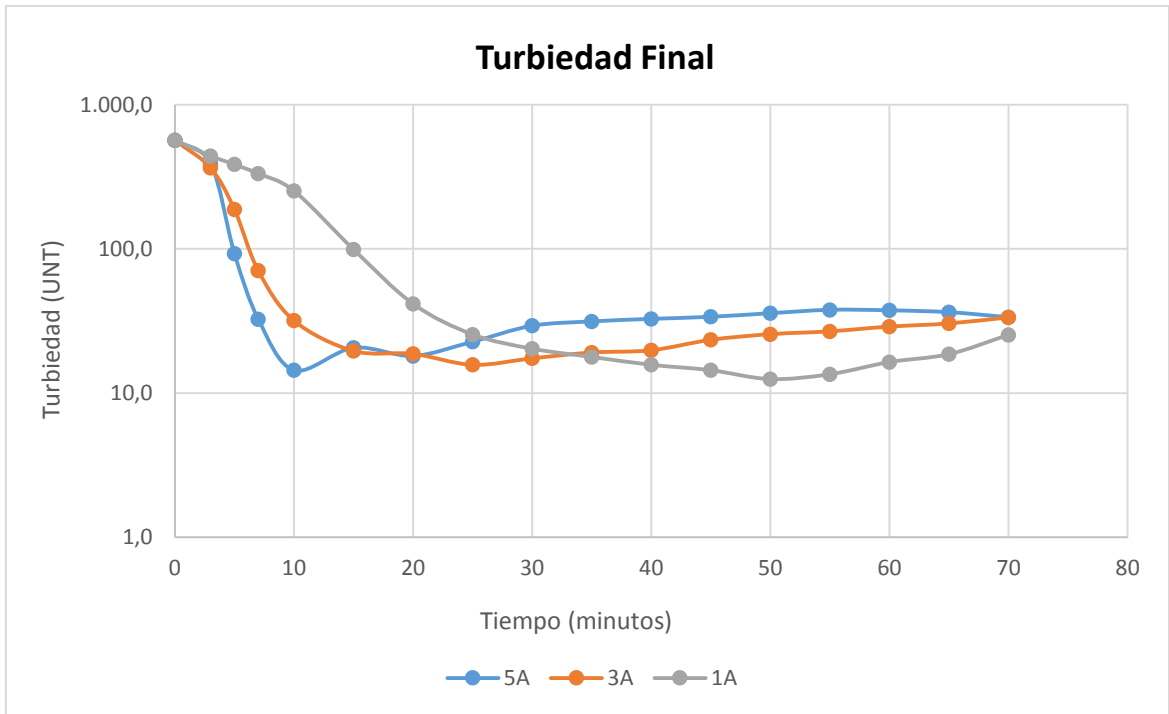
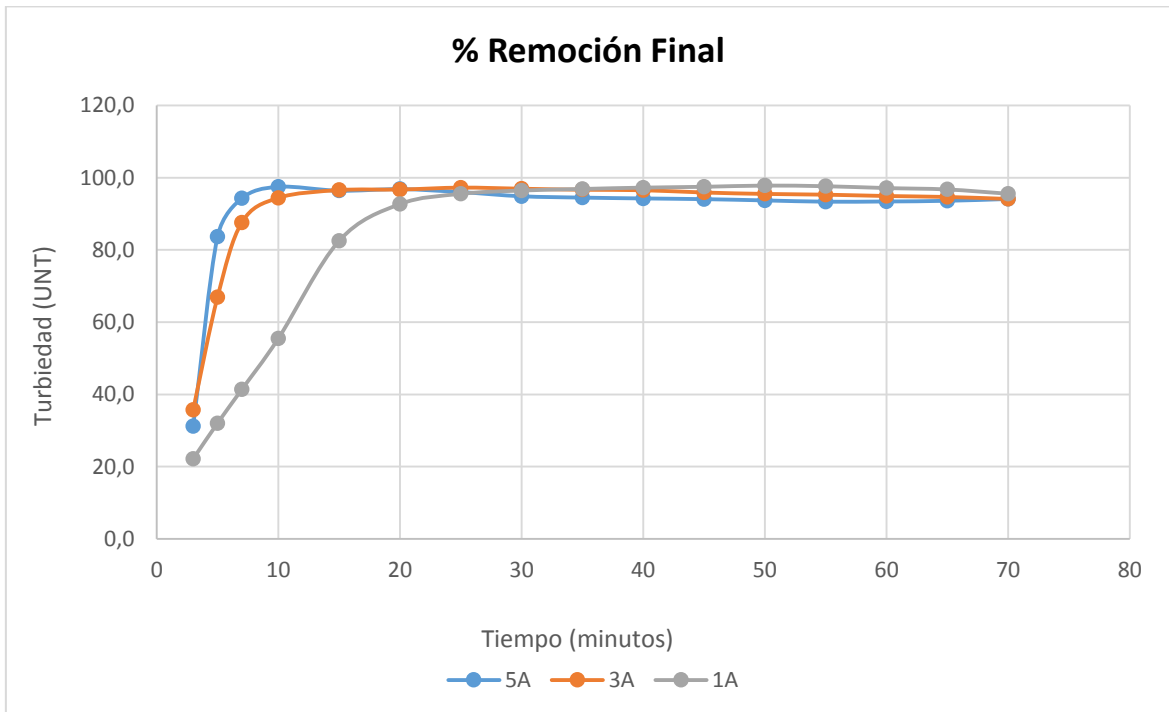


Figura 57. Porcentaje remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo V: 564 UNT



El proceso presenta porcentajes de remoción de 97.46%, 97.24% y 97.80% para amperajes de 5A, 3A, 1A respectivamente. Los mejores tiempos de tratamiento son 10,

25 y 50 minutos para las corrientes de 5A, 3A, 1A respectivamente. La corriente de 5 amperios entrega una turbiedad final de 14.4 UNT, con porcentaje de remoción de 97.46%, en un tiempo de tratamiento de 10 minutos, ver figuras 56 y 57. Estos valores no son el de mejor remoción de turbiedad final, el de 1 amperio es el que tiene los mejores valores, pero es determinante el tiempo de tratamiento. Por lo tanto, para una corriente de 5 amperios, se da las mejores condiciones de remoción de turbiedad y funcionamiento.

5.4.2.7 USO DE LA ELECTROQUÍMICA. AGUA TIPO VI: 742 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

PH natural= 8.14

Conductividad = $547 \frac{\mu S}{cm}$

Distancia entre electrodos = 10 mm

Nº electrodos = 4 pares de Al - Fe

Volumen de tratamiento = 5.6 litros
1mm

Área de electrodos = 10x10 cm; espesor=

1A - 3.1 voltios:

Tabla 58. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo VI: 742 UNT a 1 amperio

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	730	310	231	155	86.6	54.8	37.7	31.8	31.9	31.2	30.8	26.3	26.0	21.0	18.3	20.8
	Sedimentación: 10'															
	722	260	198	141	78.2	41.5	35.4	30.1	28.1	27.6	26.2	23.3	20.2	19.5	16.2	18.4

El tiempo de tratamiento mantiene su valor alto que ya es propio de esta corriente. Presenta una remoción de turbiedad de 18.3 UNT en 65 minutos. Para 18.3 UNT como mejor valor de remoción se ha conseguido disminuir la turbiedad hasta 16.2 UNT por sedimentación (tabla 58).

3A – 12.3 voltios:

Tabla 59. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo VI: 742 UNT a 3 amperios

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	359	149	74.8	56.6	52.3	51.7	46.6	45.8	40.4	23.6	18.2	19.4	20.3	22.3	25.7	26.8
	Sedimentación: 10'															
	299	137	64.7	50.1	38.1	31.6	30.1	26.4	32.3	20.5	16.5	18.2	17.9	20.5	23.4	24.1

La remoción de turbiedad final es de 18.2 UNT, y tiempo de tratamiento de 45 minutos. Para 18.2 UNT como mejor valor de remoción se ha conseguido disminuir la turbiedad hasta 16.5 UNT por sedimentación (tabla 59).

5A – 24.8 voltios:

Tabla 60. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo VI: 742 UNT a 5 amperios

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	223	113	67.8	58.0	60.8	50.3	49.7	38.9	28.9	27.6	25.4	22.4	17.4	19.8	22.0	26.8
	Sedimentación: 10'															
	186	106	42.8	46.8	41.2	30.6	31.5	28.4	21.5	25.0	24.3	20.4	16.2	17.7	20.5	24.1

La remoción de turbiedad final a 17.4 UNT a un tiempo de tratamiento de 55 minutos. Para 17.4 UNT como mejor valor de remoción se ha conseguido disminuir la turbiedad hasta 16.2 UNT por sedimentación (tabla 60).

Figura 58. Remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo VI: 742 UNT

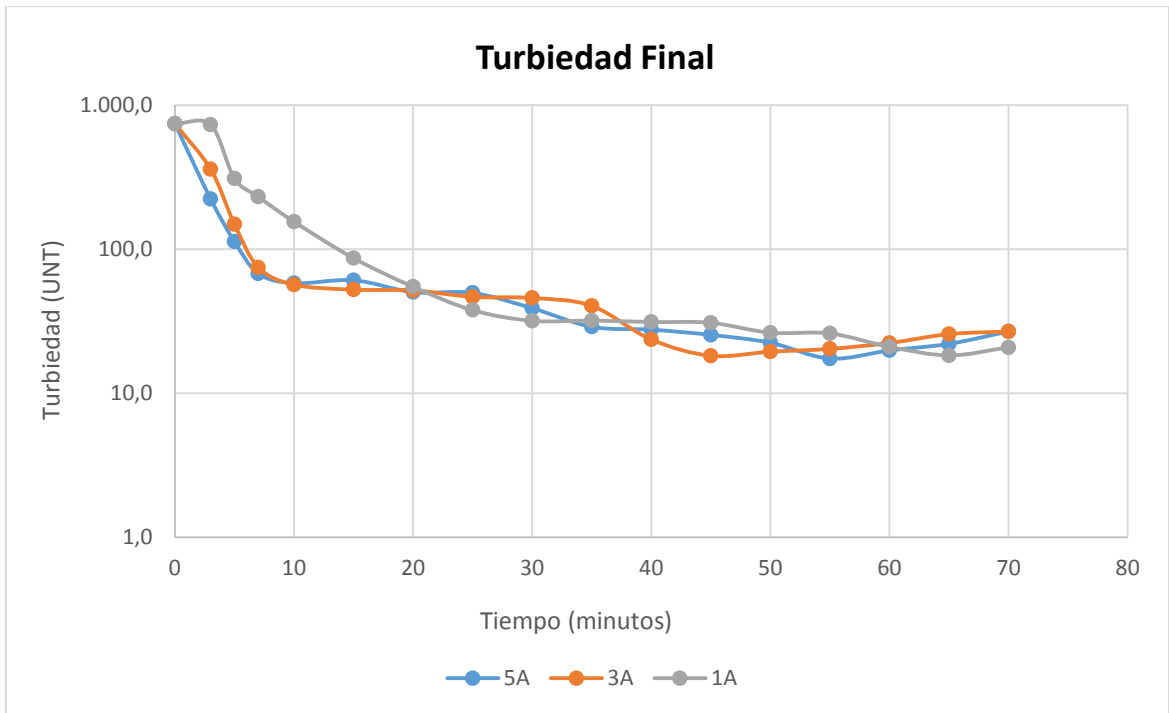
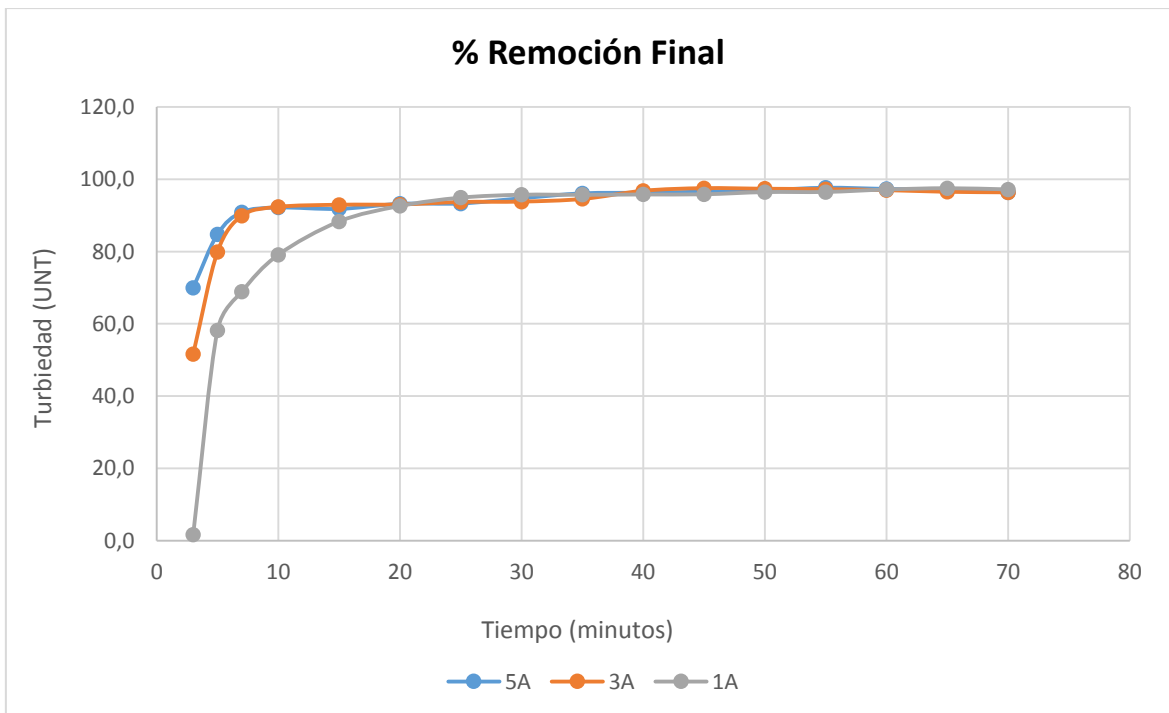


Figura 59. Porcentaje remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo VI: 742 UNT



El proceso presenta porcentajes de remoción de 97.65%, 97.55% y 97.53% para amperajes de 5A, 3A, 1A respectivamente. Los mejores tiempos de tratamiento son 55, 45 y 65 minutos para las corrientes de 5A, 3A, 1A respectivamente, ver tablas 58, 59 y 60. La corriente de 3 amperios entrega una turbiedad final de 18.2 UNT, con porcentaje de remoción de 97.55%, en un tiempo de tratamiento de 45 minutos, ver figuras 58 y 59. Por lo tanto, para una corriente de 3 amperios, se da las mejores condiciones de remoción de turbiedad y funcionamiento.

5.4.2.8 USO DE LA ELECTROQUÍMICA. AGUA TIPO VII: 865 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

PH natural= 7.85

Conductividad = $400 \frac{\mu S}{cm}$

Distancia entre electrodos = 10 mm

N° electrodos = 4 pares de Al - Fe

Volumen de tratamiento = 5.6 litros

Área electrodos=10x10 cm; espesor= 1mm

1A - 3.5 voltios:

Tabla 61. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo VII: 865 UNT a 1 amperio

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	862	850	823	765	632	498	333	190	110	40.5	39.3	27.8	24.4	20.3	19.5	21.1
	Sedimentación: 10'															
	855	840	801	721	308	230	198	165	82.9	33.1	30.2	25.6	22.6	20.1	18.3	19.6

El tiempo de tratamiento mantiene su valor alto que ya es propio de esta corriente. Presenta una remoción de turbiedad de 19.5 UNT en 65 minutos. Para 19.5 UNT como mejor valor de remoción se ha conseguido disminuir la turbiedad hasta 18.3 UNT por sedimentación (tabla 61).

3A – 12.1 voltios:

Tabla 62. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo VII: 865 UNT a 3 amperios

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	501	205	72.9	33.2	29.3	30.9	35.5	29.3	34.7	38.4	29.2	26.3	25.4	28.3	18.2	20.1
	Sedimentación: 10'															
	422	175	63.6	29.7	25.8	24.2	24.5	26.4	33.1	32.7	26.9	24.8	22.4	26.2	17.4	19.3

La remoción de turbiedad final es de 18.2 UNT, y tiempo de tratamiento de 65 minutos. Para 18.2 UNT como mejor valor de remoción se ha conseguido disminuir la turbiedad hasta 17.4 UNT por sedimentación (tabla 62).

5A – 24. 8 voltios:

Tabla 63. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo VII: 865 UNT a 5 amperios

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	352	105	37.6	26.9	39.8	33.3	40.6	42.5	40.4	33.6	30.5	24.5	21.5	18.5	22.5	23.6
	Sedimentación: 10'															
	175	63.6	29.7	25.8	24.2	24.5	30.2	40.3	33.5	30.4	28.5	21.2	20.7	17.2	21.3	21.1

La remoción de turbiedad final a 18.5 UNT a un tiempo de tratamiento de 60 minutos. Para 18.5 UNT como mejor valor de remoción se ha conseguido disminuir la turbiedad hasta 17.2 UNT por sedimentación (tabla 63).

Figura 60. Remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo VII: 865 UNT

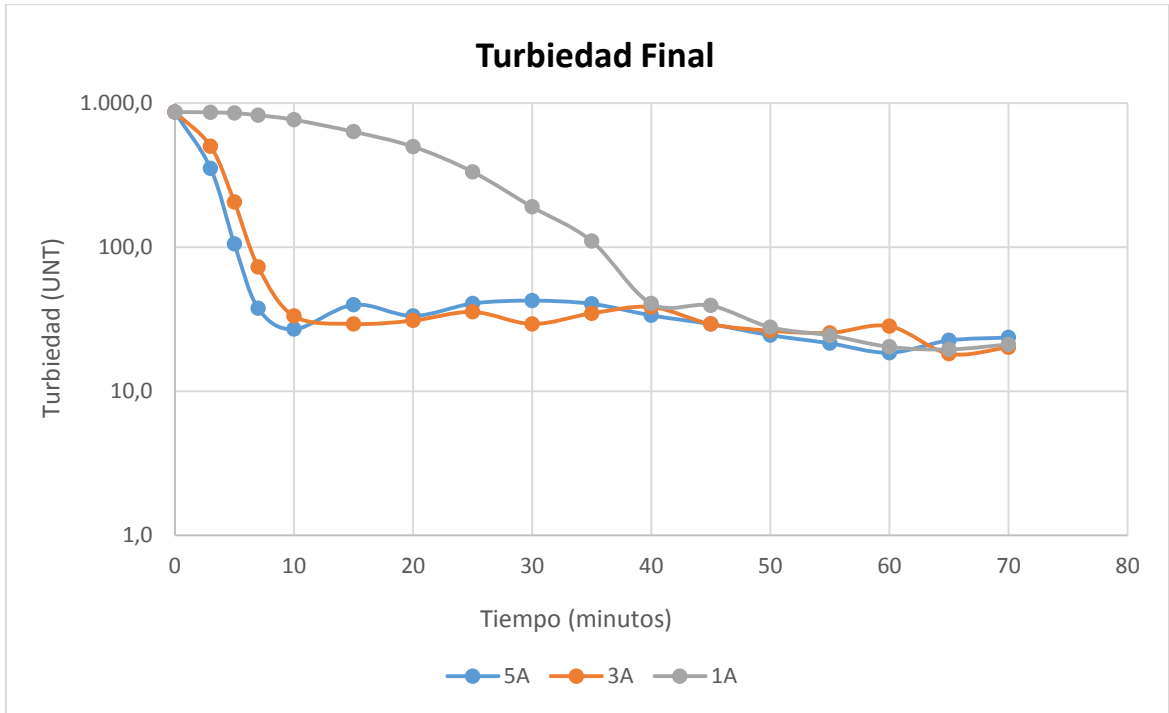
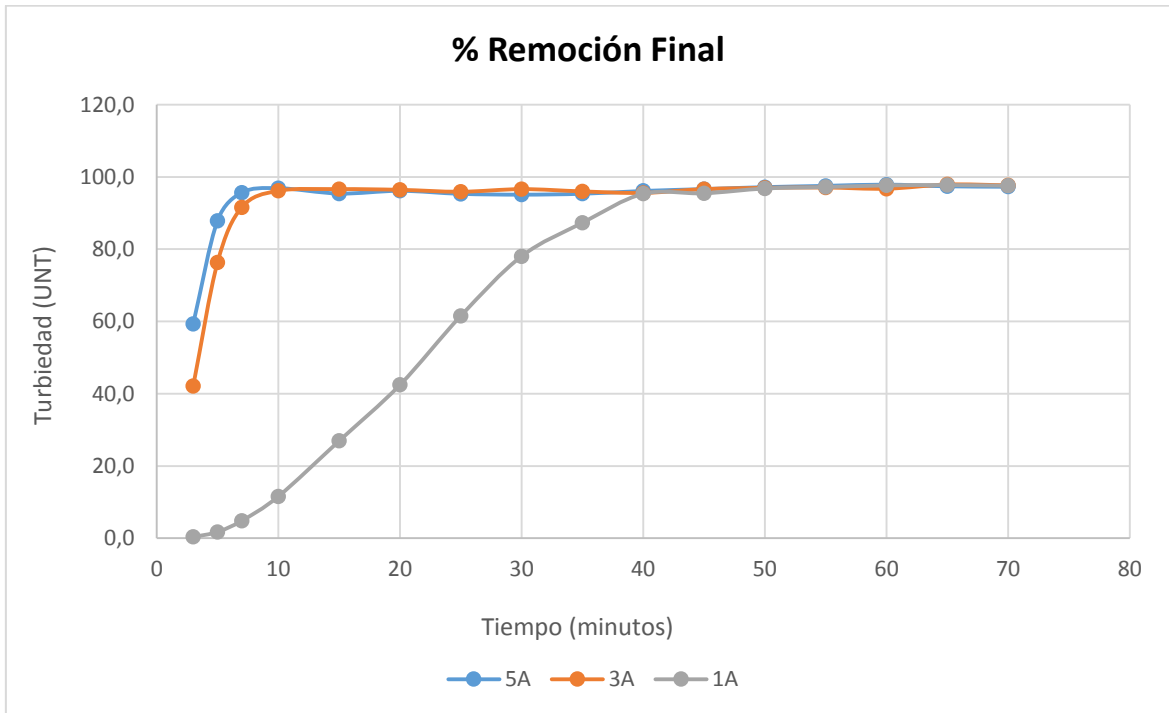


Figura 61. Porcentaje remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo VII: 865 UNT



El proceso presenta porcentajes de remoción de 97.86%, 97.90% y 97.75% para amperajes de 5A, 3A, 1A respectivamente. Los mejores tiempos de tratamiento son 60,65 y 65 minutos para las corrientes de 5A, 3A, 1A respectivamente, ver tablas 61, 62 y 63. La corriente de 3 amperios entrega una turbiedad final de 18.2 UNT, con porcentaje de remoción de 97.90%, en un tiempo de tratamiento de 65 minutos, ver gráficas 60 y 61. Por lo tanto, para una corriente de 3 amperios, se da las mejores condiciones de remoción de turbiedad y funcionamiento.

5.4.2.9 UTILIZANDO LA ELECTROQUÍMICA. AGUA TIPO VIII: 990UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA

PH natural= 7.11

Conductividad = $426 \frac{\mu S}{cm}$

Distancia entre electrodos = 10 mm

Nº electrodos = 4 pares de Al - Fe

Volumen de tratamiento = 5.6 litros

Área electrodos=10x10 cm; espesor= 1mm

1A - 2.1 VOLTIOS:

Tabla 64. Remoción de la turbiedad en el tiempo. Agua tipo VIII: 990 UNT a 1 amperio

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	988	980	910	878	799	502	307	186	101	50.9	29.5	23.5	21.6	18.2	16.5	18.4
	Sedimentación: 10'															
	984	978	900	774	637	412	272	165	88.4	46.1	27.4	22.4	19.7	18.0	16.2	17.2

El tiempo de tratamiento mantiene su valor alto que ya es propio de esta corriente. Presenta una remoción de turbiedad de 16.5 UNT en 65 minutos. Para 16.5 UNT como mejor valor de remoción se ha conseguido disminuir la turbiedad hasta 16.3 UNT por sedimentación (tabla 64).

3A - 11.9 VOLTIOS:

Tabla 65. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo VIII: 990 UNT a 3 amperios

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	980	859	721	425	187	92.2	73.4	65.5	50.4	45.0	39.6	41.3	40.2	30.9	13.2	15.7
	Sedimentación: 10'															
	818	530	375	156	112	62.3	54.5	48.5	31.3	30.9	27.3	27.8	27.4	18.9	13.1	14.4

La remoción de turbiedad final es de 13.2 UNT, y tiempo de tratamiento de 65 minutos. Para 13.2 UNT como mejor valor de remoción se ha conseguido disminuir la turbiedad hasta 13.1 UNT por sedimentación (tabla 65).

5A – 23.1 VOLTIOS:

Tabla 66. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo VIII: 990 UNT a 5 amperios

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	907	574	340	168	117	87.1	145	115	102	66.7	42.7	18.4	14.5	10.7	13.7	19.2
	Sedimentación: 10'															
	730	276	113	58.8	36.8	27.2	26.4	26.9	29.4	25.4	23.3	16.4	13.7	10.2	13.5	18.3

La remoción de turbiedad final a 10.7 UNT a un tiempo de tratamiento de 60 minutos, Por efecto del aumento de la corriente, la remoción mejora. Para 10.7 UNT como mejor valor de remoción se ha conseguido disminuir la turbiedad hasta 10.2 UNT por sedimentación (tabla 66).

Figura 62. Remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo VIII: 990 UNT

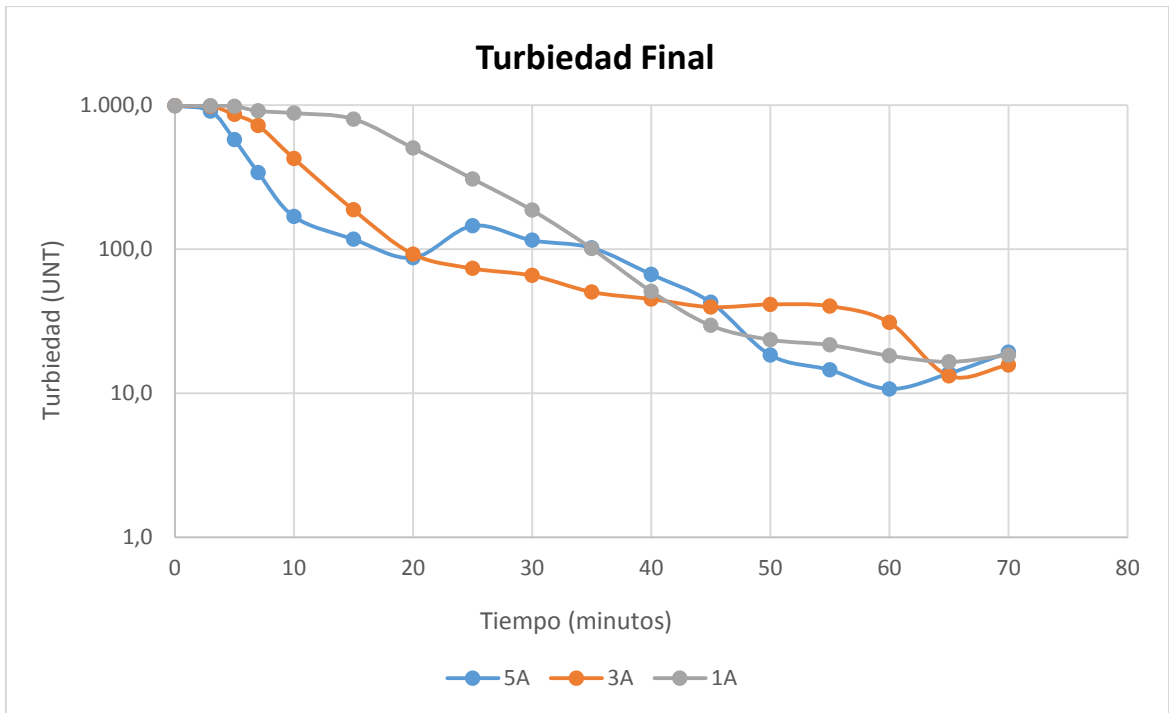
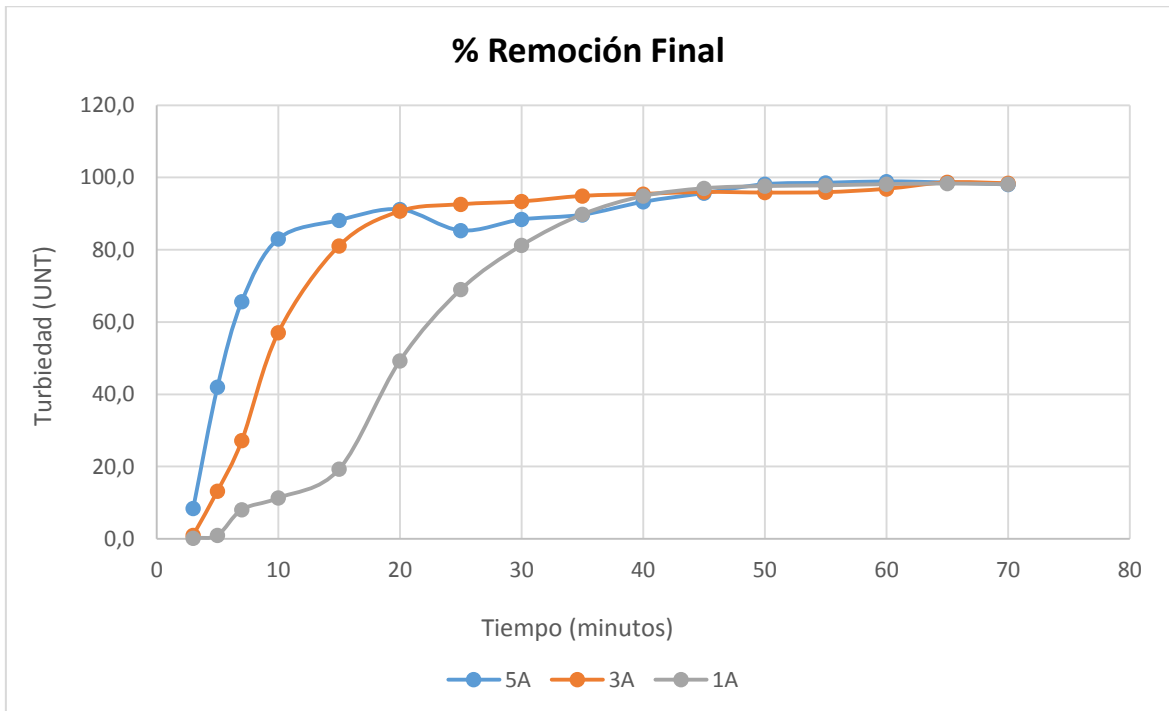


Figura 63. Porcentaje remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo VIII: 990 UNT



El proceso presenta porcentajes de remoción de 98.92%, 98.67% y 98.33% para amperajes de 5A, 3A, 1A respectivamente. Los mejores tiempos de tratamiento son 60,65 y 65 minutos para las corrientes de 5A, 3A, 1A respectivamente, ver tablas 64, 65 y 66. La corriente de 5 amperios entrega una turbiedad final de 10.7 UNT, con porcentaje de remoción de 98.92%, en un tiempo de tratamiento de 60 minutos, ver figuras 62 y 63. Por lo tanto, para una corriente de 5 amperios, se da las mejores condiciones de remoción de turbiedad.

5.4.2.10 UTILIZANDO LA ELECTROQUÍMICA. AGUA TIPO IX: 2313 UNT

PH natural= 8.20

Conductividad = $487 \frac{\mu S}{cm}$

Distancia entre electrodos = 10 mm

Nº electrodos = 4 pares de Al - Fe

Volumen de tratamiento = 5.6 litros

Área electrodos=10x10 cm; espesor= 1mm

1A – 1.1 VOLTIOS:

Tabla 67. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo IX: 2313 UNT a 1 amperio

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	2100	1650	1200	516	133	82.0	51.4	36.1	28.8	23.3	20.8	19.7	19.1	22.7	23.7	25.5
	Sedimentación: 10'															
	2000	833	721	338	113	72.9	47.7	33.0	27.1	22.0	19.9	19.3	18.2	21.1	22.3	23.7

El tiempo de tratamiento mantiene su valor alto que ya es propio de esta corriente, aunque para esta calidad de agua y ese valor de remoción, este tiempo es más que aceptable. Presenta una remoción de turbiedad de 19.1 UNT en 55 minutos. Para 19.1 UNT como mejor valor de remoción se ha conseguido disminuir la turbiedad hasta 18.2 UNT por sedimentación (tabla 67).

3A – 14.3 VOLTIOS:

Tabla 68. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo IX: 2313 UNT a 3 amperios

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	755	323	261	166	62.4	29.9	22.6	21.6	18.8	18.3	22.2	27.5	29.3	34.2	34.9	37.8
	Sedimentación: 10'															
	622	380	250	129	55.7	27.4	21.6	20.1	17.2	17.1	21.2	26.3	27.7	32.5	33.4	36.1

La remoción de turbiedad final es de 18.3 UNT, y tiempo de tratamiento de 40 minutos. Para 18.3 UNT como mejor valor de remoción se ha conseguido disminuir la turbiedad hasta 17.1 UNT por sedimentación (tabla 68).

5A – 22.9 VOLTIOS:

Tabla 69. Remoción de turbiedad a través del tiempo. Agua tipo IX: 2313 UNT a 5 amperios

Tiempo (minutos)	3'	5'	7'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'
Turbiedad (UNT)	793	586	198	110	48.6	32.1	28.1	21.5	18.2	16.5	18.9	22.1	32.5	34.8	38.9	40.7
	Sedimentación: 10'															
	511	370	170	69.1	43.2	30.3	26.4	19.6	17.3	15.6	16.6	20.8	30.9	33.1	37.2	38.6

La remoción de turbiedad final a 16.5 UNT a un tiempo de tratamiento de 40 minutos. Por efecto del aumento de la corriente, la remoción mejora. Para 16.5 UNT como mejor valor de remoción se ha conseguido disminuir la turbiedad hasta 15.6 UNT por sedimentación (tabla 69).

Figura 64. Remoción de turbiedad a distintas corrientes. Agua tipo IX: 2313 UNT

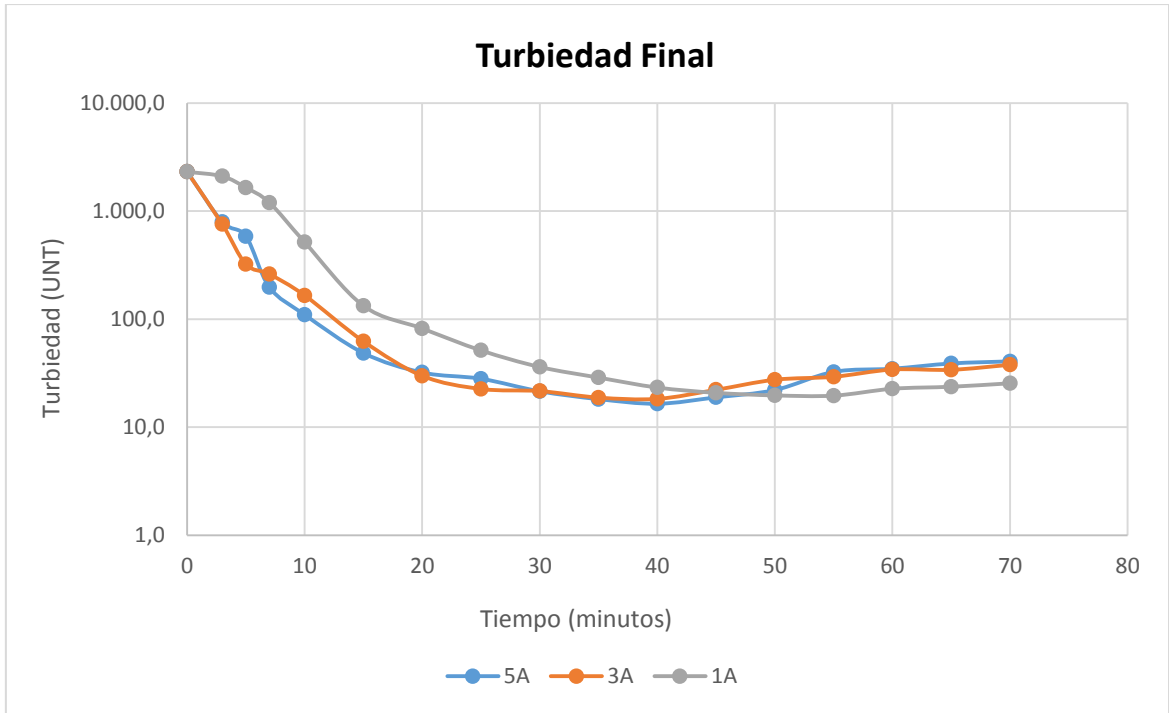
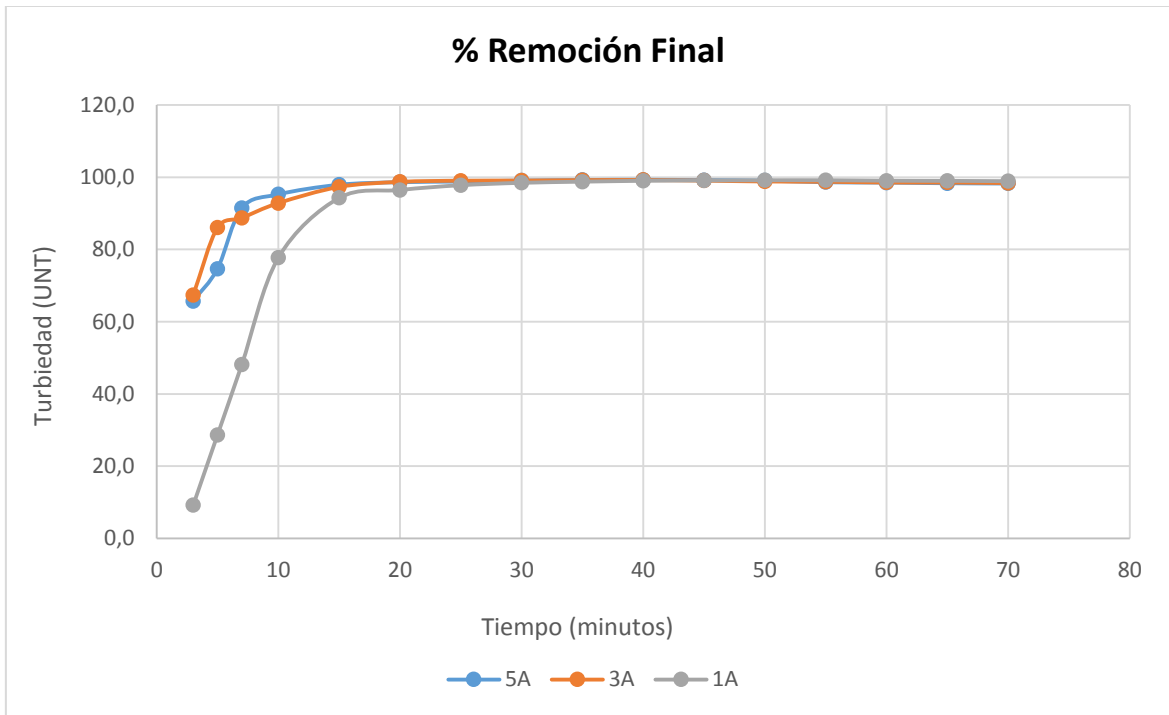


Figura 65. Porcentaje remoción de turbiedad a distintas corrientes. Tipo IX: 2313 UNT



El proceso presenta porcentajes de remoción de 99.29%, 99.21% y 99.15% para amperajes de 5A, 3A, 1A respectivamente. Los mejores tiempos de tratamiento son 40,40 y 55 minutos para las corrientes de 5A, 3A, 1A respectivamente. La corriente de 5 amperios entrega una turbiedad final de 16.5 UNT, con porcentaje de remoción de 99.29%, en un tiempo de tratamiento de 40 minutos, ver gráficas 64 y 65. Por lo tanto, para una corriente de 5 amperios, se da las mejores condiciones de remoción de turbiedad y funcionamiento.

Figura 66. Resumen de los tiempos eficientes de tratamiento respecto al tipo de agua para el proceso de la electrocoagulación.

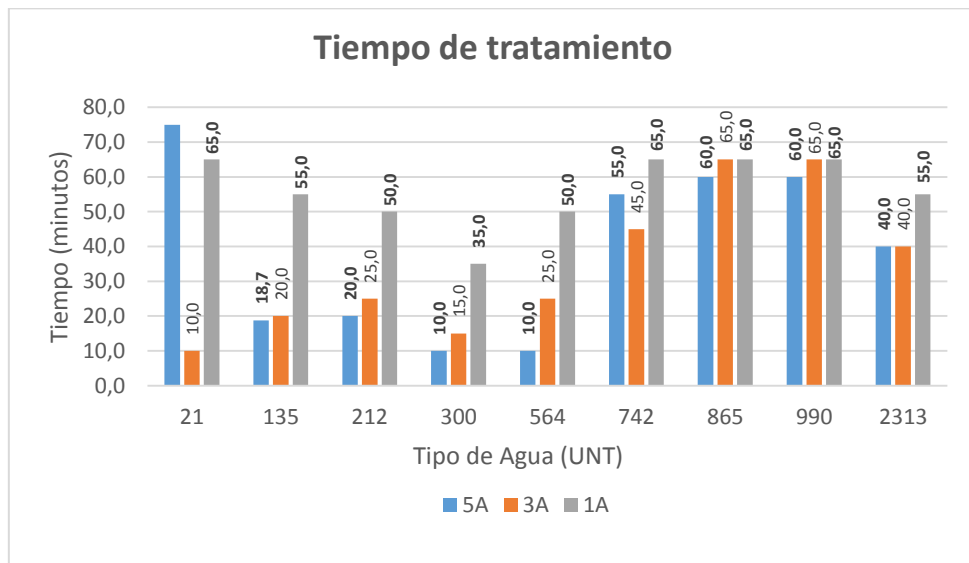
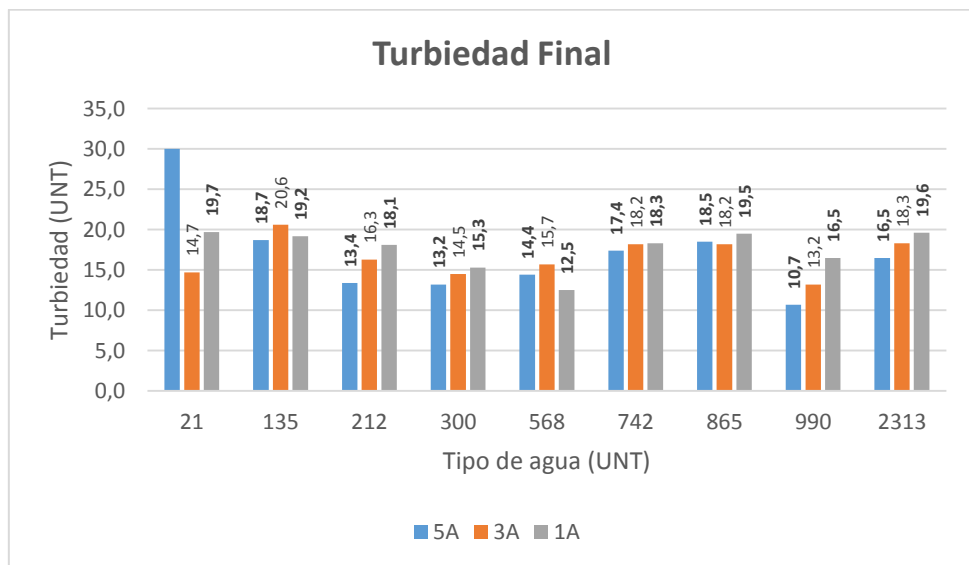


Figura 67. Resumen de turbiedades finales de tratamiento respecto al tipo de agua para el proceso de la electrocoagulación.



Finalmente, en la síntesis de las variables estudiadas y sus resultados expresados en sus valores eficientes respecto a los nueve tipos de agua analizadas, son presentados en las gráficas 66 y 67, los valores eficientes de las turbiedades finales respecto al tipo de agua, y en la gráfica 65 los tiempos más eficientes de tratamiento.

5.4.3 EVALUACION ECONÓMICA

Se ha considerado para la evaluación económica los que se están referidos sólo a los insumos químicos usados en el proceso fisicoquímico para esta investigación. Los costos de otras variables de costo como equipos de laboratorio, personal técnico, etc. los mantendremos constante en la evaluación del sulfato de aluminio y del consumo de energía por parte del proceso de electrocoagulación para la remoción de turbiedad.

Entonces, el precio de venta del sulfato de aluminio tipo B200 ofertado por la empresa Químicos Goicochea S.R.Ltda., es de S. / 1.50 por cada Kg, en su envase de bolsa de 50 kg.

Para lo siguiente, en la tabla 70, se muestra los costos de insumos para cada proceso de tratamiento

Tabla 70. Costos de insumos para cada tipo de tratamiento

Tratamiento	Material coagulante	Presentación	Unidad	Costo unitario (S./)	Tarifa comercial S/. /KW.h	Costo coagulante: 1kg (S/.)
Físico químico	Sulfato de aluminio tipo B	50	Kilogramo	75.0	-	1.50
EC	Corriente eléctrica	potencia	Watt	-	0.4(*)	-

(*): Sector comercial-consumo mensual de 50,000 KW.h: 11.76 ctv. U\$\$/KW.h. La conversión de dólares a soles se hizo con tipo de cambio de 3.37 soles por 1 dólar con fecha 26/12/18. Fuente: GRT-Osinergmin.

Para hallar la potencia, en Watt, en nuestro caso que es empleando corriente continua:

$$P_{(W)} = V_{(V)} \times I_{(A)}$$

Donde la potencia W , se describe en unidades Watt; el voltaje V , en voltios; el amperaje A , en amperios.

La energía consumida por el reactor de electrocoagulación vendría definida por una tarifa comercial promedio (Observatorio Energético Minero, Osinergmin, para el segundo trimestre del 2018). El consumo de energía por el proceso de electrocoagulación está expresado en KW.h o como consumo mensual promedio en KW, ver tabla 71.

La tarifa asumida es una tarifa comercial-consumo mensual de 50,000 citado por Osinergmin para el segundo trimestre del año 2018. Haciendo la conversión a soles:

$$\text{Tarifa en soles} = 11.76 \text{ ctv.} \frac{\text{US\$}}{\text{KW.h}} \times \frac{3.37 \text{ S./}}{100 \text{ ctv.US\$}} = 0.396 \times \frac{\text{S./}}{\text{KW.h}}$$

Tabla 71. Resumen de consumos para cada tipo de agua tratada por la EC

Calidad de agua (UNT)	Amperios (A)	Voltios (V)	Potencia (Watts)	Consumo (KW.h)	Consumo mensual (KW)
21	3	11.7	35.1	0.035	25.3
135	3	12.1	36.3	0.036	26.1
212	5	20.9	104.5	0.105	75.2
300	5	21.3	106.5	0.107	76.7
564	5	21.5	107.5	0.108	77.4
742	5	22.0	110.0	0.110	79.2
865	5	22.4	112.0	0.112	80.6
990	5	22.5	112.5	0.113	81.0
2313	5	22.9	114.5	0.115	82.4

5.4.3.1 COSTO DE INSUMOS QUÍMICOS PARA EL TRATAMIENTO EMPLEANDO EL SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE

Para el agua tipo I: 21 UNT

A) Dosis de sulfato de aluminio = 20mg/l

Entonces el costo para tratar 1 m³ de agua cuando se utiliza el sulfato de aluminio sería:

$$\text{Costo} = 20 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \times 1.50 \frac{\text{S/}}{\text{kg}}$$

$$\text{Costo} = 0.03 \frac{\text{S/}}{1 \text{ m}^3}$$

Para el agua tipo II: 135 UNT

A) Dosis de sulfato de aluminio = 25 mg/l

Entonces el costo para tratar 1 m³ de agua cuando se utiliza el sulfato de aluminio sería:

$$\text{Costo} = 25 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \times 1.50 \frac{\text{S/}}{\text{kg}}$$

$$\text{Costo} = 0.0375 \frac{\text{S/}}{1 \text{ m}^3}$$

Para el agua tipo III: 212 UNT

A) Dosis de sulfato de aluminio = 45 mg/l

Entonces el costo para tratar 1 m³ de agua cuando se utiliza el sulfato de aluminio sería:

$$\text{Costo} = 45 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \times 1.50 \frac{\text{S/}}{\text{kg}}$$

$$\text{Costo} = 0.0675 \frac{\text{S/}}{1 \text{ m}^3}$$

Para el agua tipo IV: 300 UNT

A) Dosis de sulfato de aluminio = 40 mg/l

Entonces el costo para tratar 1 m³ de agua cuando se utiliza el sulfato de aluminio sería:

$$\text{Costo} = 40 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \times 1.50 \frac{\text{S/}}{\text{kg}}$$

$$\text{Costo} = 0.060 \frac{\text{S/}}{1\text{m}^3}$$

Para el agua tipo V: 564 UNT

A) Dosis de sulfato de aluminio = 80 mg/l

Entonces el costo para tratar 1 m³ de agua cuando se utiliza el sulfato de aluminio sería:

$$\text{Costo} = 80 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \times 1.50 \frac{\text{S/}}{\text{kg}}$$

$$\text{Costo} = 0.120 \frac{\text{S/}}{1\text{m}^3}$$

Para el agua tipo VI: 742 UNT

A) Dosis de sulfato de aluminio = 70 mg/l

B) Concentración sulfato de aluminio = 2.5 %

Entonces el costo para tratar 1 m³ de agua cuando se utiliza el sulfato de aluminio sería:

$$\text{Costo} = 70 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \times 2.5 \times 1.50 \frac{\text{S/}}{\text{kg}}$$

$$\text{Costo} = 0.26 \frac{\text{S/}}{1\text{m}^3}$$

Para el agua tipo VII: 865 UNT

A) Dosis de sulfato de aluminio = 100 mg/l

B) Concentración sulfato de aluminio = 5.0 %

Entonces el costo para tratar 1 m³ de agua cuando se utiliza el sulfato de aluminio sería:

$$\text{Costo} = 100 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \times 5.0 \times 1.50 \frac{\text{S/}}{\text{kg}}$$

$$\text{Costo} = 0.750 \frac{\text{S/.}}{1\text{m}^3}$$

Para el agua tipo VIII: 990 UNT

A) Dosis de sulfato de aluminio = 100 mg/l

B) Concentración sulfato de aluminio = 5.0 %

Entonces el costo para tratar 1 m³ de agua cuando se utiliza sulfato de aluminio sería:

$$\text{Costo} = 100 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \times 5.0 \times 1.50 \frac{\text{S/.}}{\text{kg}}$$

$$\text{Costo} = 0.750 \frac{\text{S/.}}{1\text{m}^3}$$

Para el agua tipo IX: 2313 UNT

A) Dosis de sulfato de aluminio = 180 mg/l

B) Concentración sulfato de aluminio = 12.0 %

Entonces el costo para tratar 1 m³ de agua cuando se utiliza sulfato de aluminio sería:

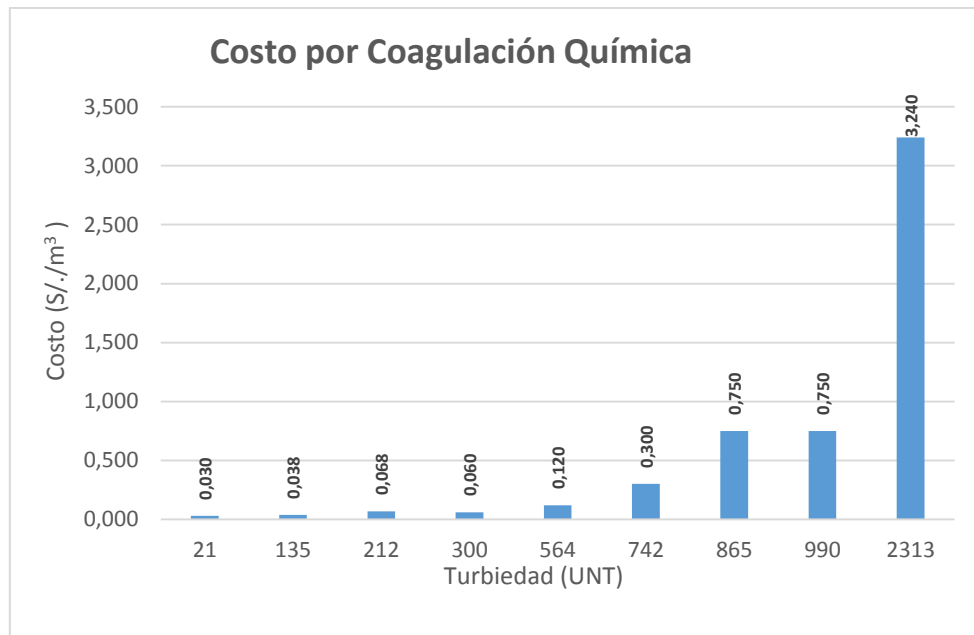
$$\text{Costo} = 180 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \times 12.0 \times 1.50 \frac{\text{S/.}}{\text{kg}}$$

$$\text{Costo} = 3.24 \frac{\text{S/.}}{1\text{m}^3}$$

Tabla 72. Resumen del costo de sulfato de aluminio

Calidad de agua (UNT)	COSTO ($\frac{\text{S/.}}{1\text{m}^3}$)
	Fisicoquímico
21	0.03
135	0.0375
212	0.0675
300	0.06
564	0.120
742	0.26
865	0.75
990	0.75
2313	3.24

Figura 68. Resumen del costo producido por el sulfato de aluminio



5.4.3.2 COSTO ENERGÉTICO EN EL TRATAMIENTO EMPLEANDO CORRIENTE ELÉCTRICA PARA EL PROCESO DE LA ELECTROCOAGULACIÓN

Para el agua tipo I: 21 UNT

- A) Costo de la energía consumida tarifa-comercial= $0.4 \frac{S/.}{KW.h}$
- B) Energía usada por la celda de electrocoagulación = $35.1 W$
- C) Tiempo empleado por la celda para tratamiento = $10' = 0.167h$
- D) Volumen de muestra de agua tratada por la celda = $0.0056 m^3$

Entonces el costo para tratar $1 m^3$ de agua cuando se utiliza la energía eléctrica sería:

$$\text{Costo} = 35.1W \times 0.167h \times 0.4 \frac{S/.}{KW.h} \times \frac{1}{0.0056m^3}$$

$$\text{Costo} = 0.419 \frac{S/.}{1m^3}$$

Para el agua tipo II: 135 UNT

- A) Costo de la energía consumida tarifa-comercial= $0.4 \frac{S/.}{KW.h}$
- B) Energía usada por la celda de electrocoagulación = $36.3 W$
- C) Tiempo empleado por la celda para tratamiento = $20' = 0.333h$
- D) Volumen de muestra de agua tratada por la celda = $0.0056 m^3$

Entonces el costo para tratar 1 m³ de agua cuando se utiliza la energía eléctrica sería:

$$\text{Costo} = 36.3W \times 0.333h \times 0.4 \frac{\$/}{KW.h} \times \frac{1}{0.0056m^3}$$

$$\text{Costo} = 0.863 \frac{\$/}{1m^3}$$

Para el agua tipo III: 212 UNT

- A) Costo de la energía consumida tarifa-comercial= $0.4 \frac{\$/}{KW.h}$
- B) Energía usada por la celda de electrocoagulación = 104.5 W
- C) Tiempo empleado por la celda para tratamiento = 20' = 0.333h
- D) Volumen de muestra de agua tratada por la celda = 0.0056 m³

Entonces el costo para tratar 1 m³ de agua cuando se utiliza la energía eléctrica sería:

$$\text{Costo} = 104.5W \times 0.333h \times 0.4 \frac{\$/}{KW.h} \times \frac{1}{0.0056}$$

$$\text{Costo} = 2.486 \frac{\$/}{1m^3}$$

Para el agua tipo IV: 300 UNT

- A) Costo de la energía consumida tarifa-comercial= $0.4 \frac{\$/}{KW.h}$
- B) Energía usada por la celda de electrocoagulación = 106.5 W
- C) Tiempo empleado por la celda para tratamiento = 10' = 0.167h
- D) Volumen de muestra de agua tratada por la celda = 0.0056 m³

Entonces el costo para tratar 1 m³ de agua cuando se utiliza la energía eléctrica sería:

$$\text{Costo} = 106.5W \times 0.167h \times 0.4 \frac{\$/}{KW.h} \times \frac{1}{0.0056m^3}$$

$$\text{Costo} = 1.273 \frac{\$/}{1m^3}$$

Para el agua tipo V: 564 UNT

- A) Costo de la energía consumida tarifa-comercial= $0.4 \frac{\$/}{KW.h}$
- B) Energía usada por la celda de electrocoagulación = 107.5 W
- C) Tiempo empleado por la celda para tratamiento = 10' = 0.167h
- D) Volumen de muestra de agua tratada por la celda = 0.0056 m³

Entonces el costo para tratar 1 m³ de agua cuando se utiliza la energía eléctrica sería:

$$\text{Costo} = 107.5W \times 0.167h \times 0.4 \frac{\$/}{KW.h} \times \frac{1}{0.0056m^3}$$

$$\text{Costo} = 1.282 \frac{\$/}{1m^3}$$

Para el agua tipo VI: 742 UNT

- A) Costo de la energía consumida tarifa-comercial= $0.4 \frac{\$/}{KW.h}$
- B) Energía usada por la celda de electrocoagulación = 110.0 W
- C) Tiempo empleado por la celda para tratamiento = 55' = 0.917h
- D) Volumen de muestra de agua tratada por la celda = 0.0056 m³

Entonces el costo para tratar 1 m³ de agua cuando se utiliza la energía eléctrica sería:

$$\text{Costo} = 110.0W \times 0.917h \times 0.4 \frac{\$/}{KW.h} \times \frac{1}{0.0056m^3}$$

$$\text{Costo} = 7.205 \frac{\$/}{1m^3}$$

Para el agua tipo VII: 865 UNT

- A) Costo de la energía consumida tarifa-comercial= $0.4 \frac{\$/}{KW.h}$
- B) Energía usada por la celda de electrocoagulación = 112.0 W
- C) Tiempo empleado por la celda para tratamiento = 60' = 1.0h
- D) Volumen de muestra de agua tratada por la celda = 0.0056 m³

Entonces el costo para tratar 1 m³ de agua cuando se utiliza la energía eléctrica sería:

$$\text{Costo} = 112.0W \times 1.0h \times 0.4 \frac{\$/}{KW.h} \times \frac{1}{0.0056m^3}$$

$$\text{Costo} = 8.00 \frac{\$/}{1m^3}$$

Para el agua tipo VIII: 990 UNT

- A) Costo de la energía consumida tarifa-comercial= $0.4 \frac{\$/}{KW.h}$
- B) Energía usada por la celda de electrocoagulación = 112.5 W
- C) Tiempo empleado por la celda para tratamiento = 60' = 1.0h
- D) Volumen de muestra de agua tratada por la celda = 0.0056 m³

Entonces el costo para tratar 1 m³ de agua cuando se utiliza la energía eléctrica sería:

$$\text{Costo} = 112.5W \times 1.0h \times 0.4 \frac{\text{S/.}}{\text{KW.h}} \times \frac{1}{0.0056m^3}$$

$$\text{Costo} = 8.036 \frac{\text{S/.}}{1m^3}$$

Para el agua tipo IX: 2313 UNT

- A) Costo de la energía consumida tarifa-comercial= $0.4 \frac{\text{S/.}}{\text{KW.h}}$
- B) Energía usada por la celda de electrocoagulación = $114.5 W$
- C) Tiempo empleado por la celda para tratamiento = $40' = 0.667h$
- D) Volumen de muestra de agua tratada por la celda = $0.0056 m^3$

Entonces el costo para tratar 1 m³ de agua cuando se utiliza la energía eléctrica sería:

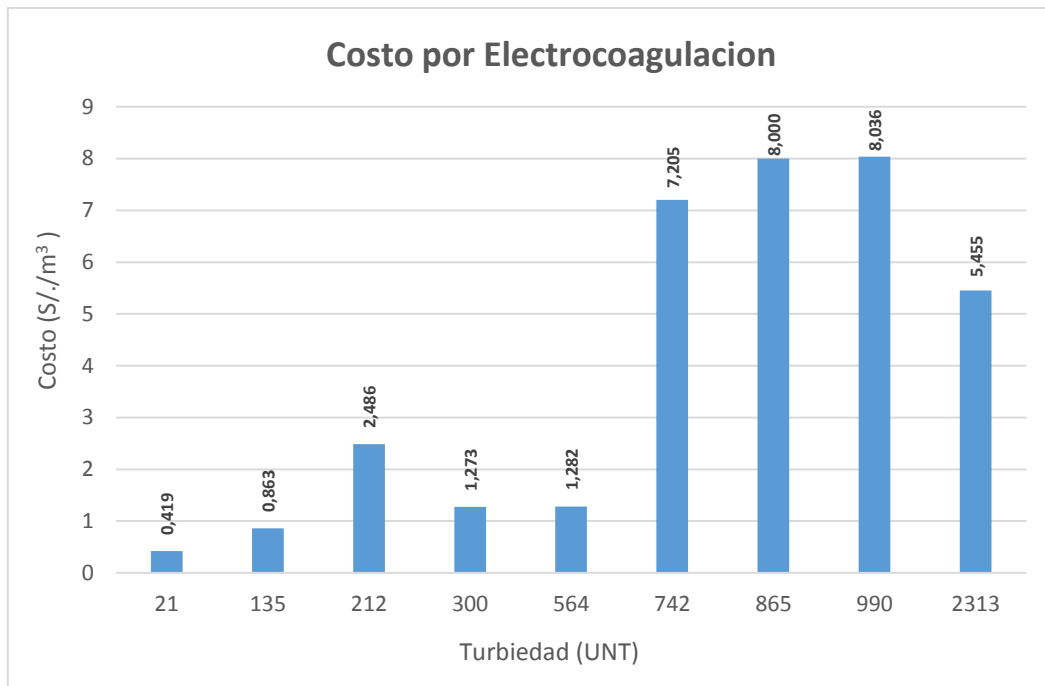
$$\text{Costo} = 114.5W \times 0.667h \times 0.4 \frac{\text{S/.}}{\text{KW.h}} \times \frac{1}{0.0056m^3}$$

$$\text{Costo} = 5.455 \frac{\text{S/.}}{1m^3}$$

Tabla 73. Resumen del costo de la electrocoagulación debido a la corriente eléctrica

Calidad de agua (UNT)	COSTO ($\frac{\text{S/.}}{1m^3}$)
	EC
21	0.419
135	0.863
212	2.486
300	1.273
564	1.282
742	7.205
865	8.00
990	8.036
2313	5.455

Figura 69. Costo producido por corriente eléctrica en el proceso de la EC



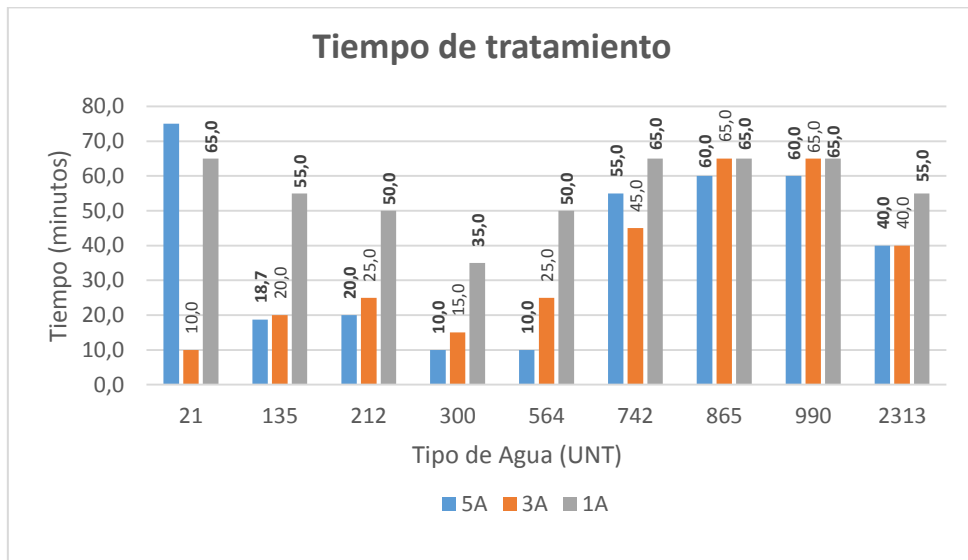
CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES GENERALES

- Los resultados de la investigación demuestran que la aplicación del proceso físico-químico es más eficiente que el proceso de la electrocoagulación en la remoción de la turbiedad para los mismos tiempos de estudio, salvo el agua tipo IX, en que el proceso de la electrocoagulación dio una mejor respuesta técnica. Esto último, nos sugiere que el proceso de la electrocoagulación da una mejor respuesta de remoción de turbiedad para aguas mayores a 1000 UNT si se considera como proceso de pre-tratamiento.

Calidad del agua (UNT)	EC	FQ
	(UNT)	
Tipo I: 21	19.1	2.10
Tipo II: 135	34.5	1.40
Tipo III: 212	15.6	1.16
Tipo IV: 300	22.4	1.41
Tipo V: 564	29.3	1.90
Tipo VI: 742	38.9	6.60
Tipo VII: 865	42.5	1.48
Tipo VIII: 990	115	1.97
Tipo IX: 2313	21.5	52.80

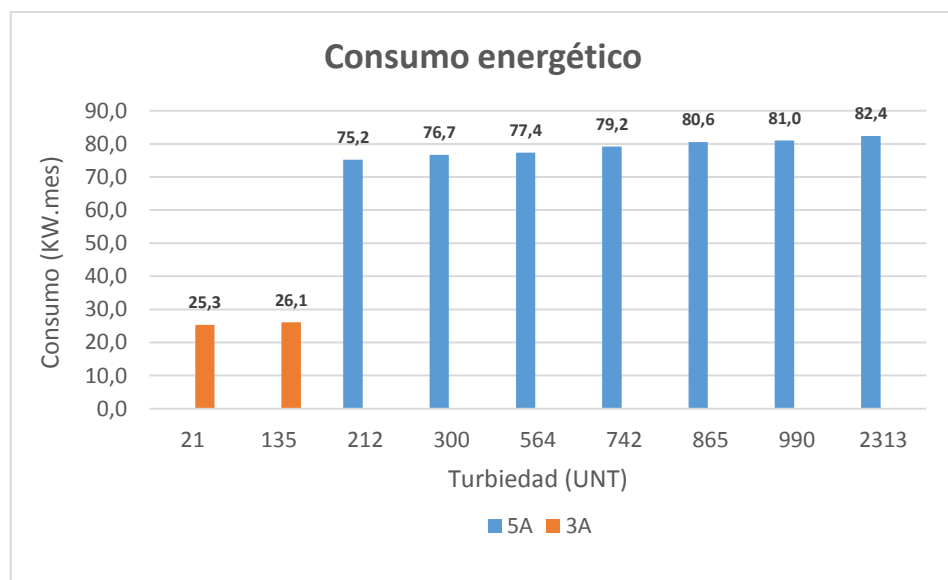
- Los resultados muestran que a medida que la turbiedad aumenta, el tiempo que usará el reactor de electrocoagulación en remover la turbiedad también aumentará. También, el amperaje influye en el tiempo de retención en el sentido de que si aumentamos el amperaje el tiempo de retención disminuye; pero habría que considerar el tema de costo energético en el aumento de la corriente eléctrica.



- La remoción de la turbiedad mediante el proceso de la electrocoagulación, ha sido posible sin la adición de algún compuesto químico. La remoción es debido por efecto del principio electroquímico de la electrólisis.
- El pH no influye de manera significativa en el proceso de la electrocoagulación como sí ocurre con el tratamiento de otros tipos de aguas mediante la electrocoagulación. Un pH con tendencia hacia un valor de 7 mejora los valores de remoción de turbiedad ligeramente; pero habría que considerar los subproductos en el agua tratada, la corrosión y picadura de los electrodos por efecto de la adición del ácido sulfúrico. Respecto a un pH de 9, el descenso de la remoción de la turbiedad es comprobada por los resultados, no siendo favorable para el tratamiento de aguas superficiales mediante la electrocoagulación.

- El consumo de energía mediante la electrocoagulación es bastante aceptable. Dicho consumo independientemente del caudal, sino más bien del volumen por ser rector Bach, presenta consumos mínimos en promedio de 25.3 KW.mes, para amperajes y turbiedades bajos (3A y 21 UNT, respectivamente), hasta consumos máximos en promedio de 82.4 KW.mes, para amperajes y turbiedades altas (5A y 2313 UNT, respectivamente).

Calidad de agua (UNT)	Amperios (A)	Consumo (KW.h)	Consumo mensual (KW)	Tiempo de retención (minutos)	Volumen mensual total tratado (m ³)
21	3	0.035	25.3	10	23.76
135	3	0.036	26.1	20	11.88
212	5	0.105	75.2	20	11.88
300	5	0.107	76.7	10	23.76
564	5	0.108	77.4	10	23.76
742	5	0.110	79.2	55	4.32
865	5	0.112	80.6	60	3.96
990	5	0.113	81.0	60	3.96
2313	5	0.115	82.4	40	2.64



6.2 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

6.2.1 RESPECTO DE LOS MÉTODOS DE LA COAGULACIÓN QUÍMICA Y DE LA ELECTROCOAGULACIÓN

AGUA TIPO I: 21 UNT

Tabla 74. Evolución de la remoción de la turbiedad (UNT) respecto al tipo de tratamiento. Agua tipo I: 21 UNT

Tratamiento	0'	5'	10'	20'	25'	30'
Electrocoagulación (3A)	21.0	19.7	14.7	16.7	17.0	19.1
Fisicoquímico	-	-	-	-	-	2.10

La remoción de la turbiedad es óptima para una corriente de 3 amperios y turbiedad final de 14.7 UNT. Para 5 amperios, el intenso burbujeo de hidrogeno aumenta la turbiedad inicial manteniéndose constante en el tiempo y en el caso de 1 amperio el lento burbujeo genera el aumento inicial de la turbiedad pero la remoción final no es significativa. En aguas claras el burbujeo provocado por la electrólisis adicionará turbiedad al agua por lo que no la hace eficiente en la remoción de turbiedad para esta calidad de agua si lo comparamos con la remoción mediante sulfato de aluminio, ver tabla 74.

AGUA TIPO II: 135 UNT

Tabla 75. Evolución de la remoción de la turbiedad (UNT) respecto al tipo de tratamiento. Agua tipo II: 135 UNT

Tratamiento	0'	5'	10'	20'	25'	30'
Electrocoagulación (3A)	135.0	87.5	29.9	20.6	20.8	34.5
Fisicoquímico	-	-	-	-	-	1.40

La corriente de 3A para un tiempo de 20 minutos nos dará la turbiedad final de **20.6 UNT**. Las demás corrientes lograrán alcanzar casi esa misma turbiedad final pero a tiempos 5A: 17.4 UNT en 60 minutos y 1A: 19.2 UNT en 55 minutos. El proceso fisicoquímico presenta una mayor respuesta técnica con 1.40 UNT (obtenido de la curva de dosis óptima) de calidad de agua, ver tabla 75.

AGUA TIPO III: 212 UNT

Tabla 76. Evolución de la remoción de la turbiedad (UNT) respecto al tipo de tratamiento. Agua tipo III: 212 UNT

Tratamiento	0'	5'	10'	20'	25'	30'
Electrocoagulación (5A)	212.0	72.2	19.2	13.4	14.3	15.6
Fisicoquímico	-	-	-	-	-	1.16

La corriente de 5A, tabla 76, es la más eficiente, para un tiempo de 20 minutos y turbiedad final de **13.4 UNT**. Las demás corrientes lograrán alcanzar casi esa misma turbiedad final pero a tiempos mayores (3A: 16.3 UNT en 25 minutos y 1A: 18.1 UNT en 50 minutos). El proceso fisicoquímico presenta una mayor respuesta técnica con 1.16 UNT (obtenido de la curva de dosis óptima) de calidad de agua.

AGUA TIPO IV: 300 UNT

Tabla 77. Evolución de la remoción de la turbiedad (UNT) respecto al tipo de tratamiento. Agua tipo IV: 300 UNT

Tratamiento	0'	5'	10'	20'	25'	30'
Electrocoagulación (5A)	300.0	38.5	13.2	20.8	21.1	22.4
Fisicoquímico	-	-	-	-	-	1.41

La corriente de 5A, ver tabla 77, es la más eficiente, para un tiempo de 10 minutos y turbiedad final de **13.2 UNT**. Las demás corrientes lograrán alcanzar casi esa misma turbiedad final pero a tiempos mayores (3A: 15.0 UNT en 15 minutos y 1A: 15.4 UNT en 35 minutos). El proceso fisicoquímico presenta una mayor respuesta técnica con 1.41 UNT (obtenido de la curva de dosis óptima) de calidad de agua.

AGUA TIPO V: 564 UNT

Tabla 78. Evolución de la remoción de la turbiedad (UNT) respecto al tipo de tratamiento Agua tipo V: 564 UNT

Tratamiento	0'	5'	10'	20'	25'	30'
Electrocoagulación (5A)	564.0	93.0	14.4	18.1	22.7	29.3
Fisicoquímico	-	-	-	-	-	1.90

La corriente de **5A**, ver tabla 78, es la más eficiente, para un tiempo de **10 minutos** y turbiedad final de **14.4 UNT**. Las demás corrientes lograrán alcanzar casi esa misma turbiedad final pero a tiempos mayores (3A: 15.7 UNT en 25 minutos y 1A: 13.5 UNT en 55 minutos). El proceso fisicoquímico presenta una mayor respuesta técnica con 1.90 UNT (obtenido de la curva de dosis óptima) de calidad de agua.

AGUA TIPO VI: 742 UNT

Tabla 79. Evolución de la remoción de la turbiedad (UNT) respecto al tipo de tratamiento. Agua tipo VI: 742 UNT

Tratamiento	0'	5'	10'	20'	25'	30'	55'
Electrocoagulación (5A)	742.0	113.0	58.0	60.8	49.7	38.9	17.4
Fisicoquímico	-	-	-	-	-	6.60	

La corriente de **5A**, ver tabla 79, es la más eficiente, para un tiempo de **55 minutos** y turbiedad final de **17.4 UNT**. Las demás corrientes lograrán alcanzar casi esa misma turbiedad final pero a tiempos mayores (3A: 18.2 UNT en 45 minutos y 1A: 18.3 UNT en 65 minutos). El aumento de turbiedad en el agua comienza afectar al proceso fisicoquímico aunque todavía presenta una mayor respuesta técnica con 6.60 UNT (obtenido de la curva de concentración óptima) de calidad de agua; pero la variación de la concentración del coagulante, que pasa de 1 % a 2.5%, va afectar directamente en el costo.

AGUA TIPO VII: 865 UNT

Tabla 80. Evolución de la remoción de la turbiedad (UNT) respecto al tipo de tratamiento. Agua tipo VII: 865 UNT

Tratamiento	0'	5'	10'	20'	25'	30'	60'
Electrocoagulación (5A)	865.0	352.0	26.9	33.3	40.6	42.5	18.5
Fisicoquímico	-	-	-	-	-	1.48	-

La corriente de **5A**, ver tabla 80, es la más eficiente, para un tiempo de **60 minutos** y turbiedad final de **18.5 UNT**. Las demás corrientes lograrán alcanzar casi esa misma turbiedad final pero a tiempos más avanzados (3A: 18.2 UNT en 65 minutos y 1A: 19.5 UNT en 65 minutos). El aumento de turbiedad en el agua comienza afectar al proceso

fisicoquímico aunque todavía presenta una mayor respuesta técnica con 1.48 UNT (obtenido de la curva de dosis óptima) de calidad de agua; pero la variación de la concentración del coagulante que pasa de 2.5 % a 5.0%, va afectar directamente en el costo.

AGUA TIPO VIII: 990 UNT

Tabla 81. Evolución de la remoción de la turbiedad (UNT) respecto al tipo de tratamiento. Agua tipo VIII: 990 UNT

Tratamiento	0'	5'	10'	20'	25'	30'	60'
Electrocoagulación (5A)	990.0	574.0	168.0	87.1	145.0	115.0	10.7
Fisicoquímico	-	-	-	-	-	1.97	-

La corriente de **5A**, ver tabla 81, es la más eficiente, para un tiempo de **60 minutos** y turbiedad final de **10.7 UNT**. Las demás corrientes lograrán alcanzar casi esa misma turbiedad final pero a tiempos más avanzados (3A: 13.2 UNT en 65 minutos y 1A: 16.5 UNT en 65 minutos). El aumento de turbiedad en el agua comienza afectar al proceso fisicoquímico aunque todavía presenta una mayor respuesta técnica con 1.97 UNT (obtenido de la curva de dosis óptima) de calidad de agua; pero con la concentración del coagulante de 5.0%, va afectar directamente en el costo.

AGUA TIPO IX: 2313 UNT

Tabla 82. Evolución de la remoción de la turbiedad (UNT) respecto al tipo de tratamiento. Agua tipo IX: 2312 UNT

Tratamiento	0'	5'	10'	20'	25'	30'	40'
Electrocoagulación (5A)	2312.0	586.0	110.0	32.1	28.1	21.5	16.5
Fisicoquímico	-	-	-	-	-	52.8	-

La corriente de **5A**, ver tabla 82, es la más eficiente, para un tiempo de **40 minutos** y turbiedad final de **16.5 UNT**. Las demás corrientes lograrán alcanzar casi esa misma turbiedad final pero a tiempos mayores (3A: 18.3 UNT en 40 minutos y 1A: 19.6 UNT en 55 minutos). La alta turbiedad en el agua afecta al proceso fisicoquímico: la remoción de turbiedad decae presentando una turbiedad final de 52.8 UNT (obtenido de la curva de concentración óptima), la dosis y la concentración aumenta de manera importante

(180 mg/l y 12 % de sulfato de aluminio). El proceso de la electrocoagulación presenta una mejor respuesta técnica (16.5 UNT) que el proceso fisicoquímico.

Tabla 83. Resumen de valores de remoción de turbiedad y tiempo de retención

Calidad del agua (UNT)	EC	FQ
	(UNT; minutos)	
Tipo I: 21	14.7; (10')	2.10; (30')
Tipo II: 135	20.6; (20')	1.40 ; (30')
Tipo III: 212	13.4; (20')	1.16; (30')
Tipo IV: 300	13.2; (10')	1.41; (30')
Tipo V: 564	14.4; (10')	1.90; (30')
Tipo VI: 742	38.9; (30')	6.60; (30')
	17.4; (55')	-
Tipo VII: 865	42.5; (30')	1.48; (30')
	18.5; (60')	-
Tipo VIII: 990	115; (30')	1.97; (30')
	10.7; (30')	-
Tipo IX: 2313	21.5; (30')	52.80; (30')
	16.5; (40')	-

Son mostrados en la tabla 83 los mejores valores de remoción de turbiedad respecto de sus tiempos de retención para los procesos de la electrocoagulación y del fisicoquímico. En la electrocoagulación, en varios tipos de aguas, sus mejores resultados ocurren a un tiempo mayor que el del fisicoquímico (30 minutos que incluye mezcla rápida, mezcla lenta y decantación).

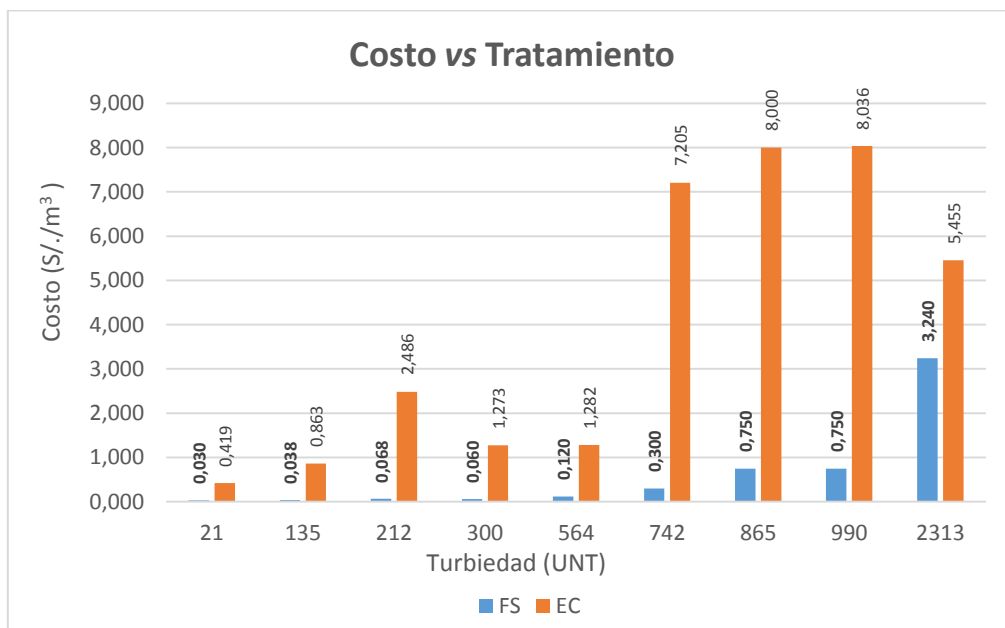
6.2.2 RESPECTO DE LA EVALUACIÓN ECONOMICA DE LOS MÉTODOS DE COAGULACIÓN QUÍMICA Y DE LA ELECTROCOAGULACIÓN

Considerando 1m³ de agua tratada, mediante el proceso fisicoquímico resulta más rentable remover la turbiedad en los nueve tipos de calidad de agua, ver tabla 84.

Tabla 84. Resumen de costos por tipo tratamiento

Calidad de agua (UNT)	COSTO ($\frac{\$/\cdot}{1m^3}$)	
	Fisicoquímico	EC
21	0.030	0.419
135	0.0375	0.863
212	0.0675	2.486
300	0.060	1.273
564	0.120	1.282
742	0.26	7.205
865	0.75	8.00
990	0.75	8.036
2313	3.24	5.455

Figura 70. Costo de cada tipo de tratamiento respecto del tipo de agua.



La muestra de agua de 2313 UNT presenta un costo superior por el proceso de la electrocoagulación para un tipo de agua complicado de tratar y una remoción final de la turbiedad aceptable, 16.5 UNT, si lo consideramos como un proceso de pre-tratamiento, frente a una remoción de turbiedad mediante el proceso fisicoquímico de 52.8 UNT. Ver tabla 84 y figura 70 de resumen de costos.

Tabla 85. Consumo promedio mensual según tipo de usuario

Usuario	Consumo promedio (KW)	Tarifa centavo (ctv.US\$/KW.h)
Hotelero	220.0	11.76
Ladrillos	280.0	8.95
Pinturas	300.0	8.95
Plásticos	320.0	8.95
Papelera	360.0	8.95
Fideos	580.0	8.95
Químico	600.0	8.95
Metal mecánica	1300.0	8.95
Textil	1650.0	8.95
Pesquero	2380.0	8.95

Fuente: portal rpp.pe. [https://rpp.pe/economia/mercados/tarifas electricas-suben-para-clientes-residenciales-e-industriales-noticia-1108462](https://rpp.pe/economia/mercados/tarifas-electricas-suben-para-clientes-residenciales-e-industriales-noticia-1108462). Sobre las tarifas de <http://observatorio.osinergmin.gob.pe/tarifas-eléctricas-industriales-comerciales-latinoamerica>

Calidad de agua (UNT)	Amperios (A)	Consumo (KW.h)	Consumo mensual (KW)
21	3	0.035	25.3
135	3	0.036	26.1
212	5	0.105	75.2
300	5	0.107	76.7
564	5	0.108	77.4
742	5	0.110	79.2
865	5	0.112	80.6
990	5	0.113	81.0
2313	5	0.115	82.4

Los consumos energéticos mensuales de cada tipo de agua varían, por desde 25.3 KW hasta 82.4 KW, . Si el consumo residencial eléctrico es de 90 KW teniendo en cuenta los consumos de los demás tipos de usuarios presentados en la tabla 85, tenemos un consumo por parte de la electrocoagulación por debajo de los valores establecidos.

6.3 RECOMENDACIONES

- De acuerdo a los resultados de obtenidos y analizados, la electrocoagulación puede ser asignado como una tecnología de pretratamiento en aguas superficiales. Por consiguiente las siguientes investigaciones y aplicaciones deberían dirigirse hacia dicha finalidad.

- En época de estiaje recomendamos recurrir a la coagulación convencional para la remoción de turbiedad en aguas superficiales para obtener soluciones técnicamente más viables.
- Las otras variables como dimensionamiento, área y cantidad de electrodos, tipo de material del electrodo, conductividad y composición del lodo producido, que definen el proceso de la electrocoagulación necesitan un mayor estudio para la comprensión del mismo, por lo que se recomienda realizar mayores investigaciones para lograr una mayor eficiencia del proceso.
- Debido a su consumo bajo de energía (0.115 KW.h, 0.0083 m³ de agua tratada, para 2313 UNT por dar el caso más exigente para el proceso de la electrocoagulación), esta puede ser atendida por energía renovables como por ejemplo la proveniente de las celdas solares. Así, la energía no sería un obstáculo para su aplicación en el tratamiento de aguas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Mollah, M. Y., Schennach, R., Parga, J., y Cocke D. (2001). Electrocoagulation (EC) - Science and applications. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 84, N° 1 (jun. 2001), pp. 29-41.

Morales, N. B., y Acosta, G.E. (2011). Empleo de la Electrocoagulación como método para remoción de cromo en aguas residuales de origen galvánico. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, Vol.7, N°1, pp 125-125.

Piña, M., Martín, A., González, C.A., y Prieto, F. (2011). Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, Vol. 10, N°2, pp. 257-271.

Elabbas, S., Ouazzani, N., Mandi, L., Berrekhis, F., Perdicakis, M., Pontvianne, S., Pons, M.-N., Lapique F., Leclerc, J.-P. (2015). Treatment of highly concentrated tannery wastewater using electrocoagulation: Influence of the quality of aluminium used for the electrode.

Arango, A. R., Garcés G., L. F. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea". *Revista Universidad EAFIT*, Vol. 43, N°. 147, pp. 56-67.

Aguilar A., Edwar. (2015). Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. *Revista del Instituto de Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM*. Vol. 18, N° 35, pp. 69-73.

Aguilar Ascón, Edwar, 2014. Viabilidad del proceso de electrocoagulación en el tratamiento de agua del río Rímac. Recuperado de http://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/ulima/2080/Aguilar_Ascón_2014.pdf?sequence=1

Perozo C., C. R, Abreu C., R. L. (2017). Evaluación de la electrocoagulación en el tratamiento de agua potable. *Revista Química Viva*, vol. 16, n°1, abril 2017, pp. 55-69.

Hakizimana, J.N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P., y Naja, J. (2016). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination* 404(2017) 1–21.

Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua. Coagulación y floculación. Recuperado de http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154

Howe, K.J., Hand, D.W., Crittenden, J.C., Trussell, R.R., Tchobanoglous, (2016). *Principios del Tratamiento del Agua*, México DF, México, CENCAGE Learning.

Mihelcic, J.R., Zimmerman, J.B., (2012). *Ingeniería Ambiental. Fundamentos, sustentabilidad, diseño*, México DF, México, Alfaomega.

Gray, N.F., (1994). *Calidad del agua potable. Problemas y soluciones*, España, Barcelona, Editorial Acribia.

Davis, L.M., Masten, S.J., (2005). *Ingeniería y ciencias ambientales*, México DF, México, McGraw-Hill Interamericana.

Henry, J.G., Heinke, G.W., (1999). *Ingeniería Ambiental*, México DF, México. Prentice Hall Hispanoamericana.

Vargas, L., (2004). Capítulo 3. Procesos unitarios y plantas de tratamiento. Recuperado de http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manuall/ tomo1/ma1_tomo1_cap3.pdf

Barrenechea, A. (2004). Capítulo 4. Coagulación. Recuperado de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/cuatro.pdf>

Martínez Navarro, Fabiola (2007). *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación y coagulación convencional*. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad de Castilla-La Mancha Recuperado:[https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/984/251Tratamiento deaguasresidualesindustriales.pdf?sequence=1](https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/984/251Tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20industriales.pdf?sequence=1)

Claudio Sánchez, Katherine y Hernández Sánchez, Mariel (2017). Tratamiento de agua del río Rímac para consumo humano utilizando el Quitosano como coagulante en época de estiaje. Tesis profesional de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/5420>

ANEXO 01

Tabla 01. Valores de parámetros caracterizados en la muestra de agua cruda superficial

Parámetro	21 UNT	135UNT	212UNT	300UNT
Alcalinidad (ppm)	90	90	98	112
PH	8.32	8.20	7.78	7.56
Conductividad (μs/cm)	237	370	332	345

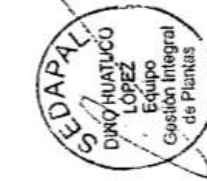
Tabla 02. Valores de parámetros caracterizados en la muestra de agua cruda superficial con arcilla comercial

Parámetro	564 UNT	742 UNT	865 UNT	990 UNT	2313 UNT
Alcalinidad (ppm)	115	115	80	85	103
PH	7.82	8.14	7.85	7.11	8.20
Conductividad(μs/cm)	378	547	400	426	687

ANEXO 02

PROMEDIO ANUAL DE PARAMETROS FISICOQUIMICOS EN BOCATOMAS DE LA PTAP LA ATARJEA - RIO RIMAC
AÑOS: 2010 - 2018

PARAMETROS	UNIDADES	2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017		2018	
		Rio Rimac	Bocatomas	Rio Rimac	Bocatomas	Rio Rimac	Bocatomas	Rio Rimac	Bocatomas	Rio Rimac	Bocatomas	Rio Rimac	Bocatomas	Rio Rimac	Bocatomas	Rio Rimac	Bocatomas	Rio Rimac	Bocatomas
PH	Unidades	7.89	7.78	7.92	8.12	8.00	7.80	8.15	8.15	8.00	7.80	8.15	8.15	8.15	8.15	8.15	8.15	8.15	8.22
COND. ESPECIFICA	uS/cm	592	565	520	542	520	529	531	503	520	529	531	503	503	531	503	503	520	520
HIERRO	Fe mg/L	2.497	2.342	5.443	4.095	0.924	0.851	4.378	12.961	0.924	0.851	4.378	12.961	12.961	4.378	12.961	12.961	1.181	1.181
ALUMINIO	Al mg/L	3.754	1.732	6.002	2.190	1.002	0.549	3.406	11.381	1.002	0.549	3.406	11.381	11.381	3.406	11.381	11.381	1.009	1.009
ARSENICO	As mg/l	0.039	0.047	0.085	0.049	0.025	0.021	0.048	0.061	0.025	0.021	0.048	0.061	0.061	0.048	0.061	0.061	0.018	0.018
CADMIO	Cd mg/L	0.0022	0.0029	0.0027	0.0023	0.0017	0.0020	0.0020	0.0029	0.0017	0.0020	0.0020	0.0029	0.0029	0.0020	0.0029	0.0029	0.0015	0.0015
PLOMO	Pb mg/L	0.0279	0.0250	0.0640	0.0370	0.0225	0.0166	0.0681	0.0753	0.0225	0.0166	0.0681	0.0753	0.0753	0.0681	0.0753	0.0753	0.0112	0.0112
ALCALINIDAD TOTAL	CaCO3 mg/L	103.02	103.51	101.82	111.45	99.301	103.63	108.39	97.36	99.301	103.63	108.39	97.36	97.36	108.39	97.36	97.36	98.02	98.02
DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	mg/L																		
DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO	mg/L	4.39	5.46	5.26	3.82	4.40	4.54	4.65	3.54	4.40	4.54	4.65	3.54	3.54	4.65	3.54	3.54	8.58	8.58



Quim. Mirian Vasquez Osorio
COP N° 432

ANEXO 03



Memorando No. 225 - 2019 -EGIP

A : Maribel Cieza García
Funcionaria Responsable de la Entrega de la Información Pública – COP La Atarjea

Asunto : Pedido de Información

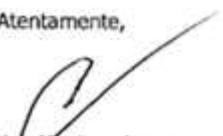
Referencia : Memorando N°054-2019-ESG

Fecha : Lima, 25 de enero del 2019

De acuerdo a lo solicitado mediante memorando de referencia, en el siguiente cuadro se informa la turbiedad promedio mensual registrada en las Bocatomas de la PTAP La Atarjea en el año 2018:

MES	Turbiedad (NTU)
ENERO	192.60
FEBRERO	95.66
MARZO	617.24
ABRIL	56.49
MAYO	18.84
JUNIO	16.94
JULIO	20.58
AGOSTO	22.65
SEPTIEMBRE	13.48
OCTUBRE	17.88
NOVIEMBRE	24.16
DICIEMBRE	69.39

Atentamente,



Dirio Huatuco Lopez
Jefe de Equipo Gestión Integral de Plantas

ANEXO 04



SERVICIO DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE LIMA

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la lucha contra la Corrupción y la Impunidad"

Carta N° 016-2019-ESG

Lima, **18 ENE. 2019**
Señor
Santos Cahuatico
Presente.-

Asunto: Atención a Solicitud de Acceso a la Información Pública – Ley N° 27806

Referencia: Correo electrónico del 09.01.2019 (Reg. 6154-19)

Es grato dirigirme a usted, con relación a su pedido de información efectuado con el documento de la referencia, a través del cual, y en mérito a la Ley N° 27806 - Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública, solicita se informe el consumo mensual de energía en KW de la PTAP y cuánto paga SEDAPAL por energía eléctrica.

Al respecto, El Equipo de Gestión Integral de Plantas de la Gerencia de Producción y Distribución Primaria, informa que el consumo de energía eléctrica mensual promedio de la Planta de Tratamiento de La Atarjea es de 444651.70 KWH, teniendo una facturación mensual promedio de S/ 175 653.15 (Ciento Setenta y Cinco Mil Seiscientos Cincuenta y Tres con Quince Céntimos).

Sin otro particular, me despido de usted,
Atentamente,

Maribel Cieza García
Funcionaria Responsable de la Entrega
de Información COP La Atarjea

FYNS

OFICINA PRINCIPAL LA ATARJEA:
Autopista Elexha Puente 710 - El Agustino - Central Telefónica 317 3000
Consultas e Informes: **Aguafono 112 3000**

www.sedapal.com.pe

CENTROS DE SERVICIOS
Comercio de Victor Andres Belaúza Ochoa Cuadra 5 - Urb. El Retablo
Callao: Av. General Duhalde N° 1111
Iquitos: Av. Jorge Basadre N° 600 - Comercio
Sucursal de Emergencia de Puerto de la Independencia N° 1825 - Centro Suroeste
Araucario: Av. Nicolás Ayllón N° 2309
Santiago: Av. Argentina Foto N° 1450
WETA El Solimón: Av. Segura y Bolognesi N° 300 Doc. Sector

ANEXO 05

Tabla 01. Porcentajes de remoción a distintas corrientes. Agua tipo I: 21 UNT

Tiempo (minutos)	5A % Remoción	3A % Remoción	1ª % Remoción
3	-40.00	-19.05	-60.00
5	-35.24	6.19	-76.67
7	-55.71	22.38	-87.62
10	-69.52	30.00	-67.62
15	-82.86	25.24	-58.10
20	-88.10	20.48	-58.57
25	-93.33	19.05	-57.62
30	-91.90	9.05	-65.71
35	-102.38	4.76	-50.00
40	-120.48	-2.86	-38.10
45	-127.14	-7.14	-21.43
50	-130.48	-17.14	-14.76
55	-124.76	-16.67	-5.24
60	-117.14	-27.14	-7.14
65	-113.33	-36.19	6.19
70	-122.86	-38.57	2.86
	100.000	100	100

Tabla 02. Porcentajes de remoción a distintas corrientes. Agua tipo II: 135 UNT

Tiempo (minutos)	5A % Remoción	3A % Remoción	1A % Remoción
3	49.63	7.41	3.70
5	72.30	34.89	34.44
7	85.11	59.56	49.33
10	86.15	77.85	56.44
15	80.52	83.48	66.22
20	68.37	84.74	71.85
25	75.56	84.59	74.67
30	77.33	74.44	76.44
35	78.89	78.67	77.56
40	82.00	74.00	78.89
45	83.78	76.59	81.56
50	84.96	71.33	84.37
55	86.44	74.30	85.78
60	87.11	75.56	82.67
65	84.52	76.30	81.78
70	84.22	73.56	81.04
	100.000	100	100

Tabla 03. Porcentajes de remoción a distintas corrientes. Agua tipo III: 212 UNT

Tiempo (minutos)	5A % Remoción	3A % Remoción	1A % Remoción
3	37.74	15.09	3.30
5	65.94	57.45	8.02
7	86.23	77.26	15.09
10	90.94	84.86	19.81
15	93.11	87.45	62.31
20	93.68	90.33	77.41
25	93.25	92.31	80.94
30	92.64	91.23	84.58
35	91.98	91.04	87.55
40	91.51	90.57	88.82
45	91.98	88.68	90.47
50	90.57	87.74	91.46
55	88.68	85.38	89.95
60	86.79	84.43	88.21
65	85.85	83.49	86.32
70	84.43	83.02	85.85
	100.000	100	100

Tabla 04. Porcentajes de remoción a distintas corrientes. Agua tipo IV: 300 UNT

Tiempo (minutos)	5A % Remoción	3A % Remoción	1A % Remoción
3	59.33	18.33	33.33
5	87.00	52.00	34.33
7	95.00	81.67	39.33
10	95.60	91.73	55.00
15	95.13	95.17	79.93
20	93.07	95.07	88.27
25	92.97	94.87	92.10
30	92.53	94.20	94.23
35	92.33	93.23	94.90
40	91.60	92.13	94.63
45	91.43	91.67	94.20
50	91.30	90.90	94.03
55	90.27	90.23	93.57
60	90.10	89.97	93.00
65	90.00	89.17	91.57
70	88.57	89.30	91.00
	100.000	100	100

Tabla 05. Porcentajes de remoción a distintas corrientes. Agua tipo V: 568 UNT

Tiempo (minutos)	5A % Remoción	3A % Remoción	1A % Remoción
3	31.16	35.74	22.18
5	83.63	66.90	32.04
7	94.26	87.57	41.37
10	97.46	94.40	55.46
15	96.37	96.55	82.52
20	96.81	96.71	92.68
25	96.00	97.24	95.51
30	94.84	96.94	96.43
35	94.47	96.64	96.87
40	94.24	96.51	97.24
45	94.05	95.88	97.46
50	93.70	95.49	97.80
55	93.35	95.28	97.62
60	93.40	94.91	97.11
65	93.59	94.65	96.73
70	94.08	94.10	95.55
	100.000	100	100

Tabla 06. Porcentajes de remoción a distintas corrientes. Agua tipo VI: 742 UNT

Tiempo (minutos)	5A % Remoción	3A % Remoción	1A % Remoción
3	69.95	51.62	1.62
5	84.77	79.92	58.22
7	90.86	89.92	68.87
10	92.18	92.37	79.11
15	91.81	92.95	88.33
20	93.22	93.03	92.61
25	93.30	93.72	94.92
30	94.76	93.83	95.71
35	96.11	94.56	95.70
40	96.28	96.82	95.80
45	96.58	97.55	95.85
50	96.98	97.39	96.46
55	97.65	97.26	96.50
60	97.33	96.99	97.17
65	97.04	96.54	97.53
70	96.39	96.39	97.20

100.000	100	100
---------	-----	-----

Tabla 07. Porcentajes de remoción a distintas corrientes. Agua tipo VII: 865 UNT

Tiempo (minutos)	5A % Remoción	3A % Remoción	1A % Remoción
3	59.31	42.08	0.35
5	87.86	76.30	1.73
7	95.65	91.57	4.86
10	96.89	96.16	11.56
15	95.40	96.61	26.94
20	96.15	96.43	42.43
25	95.31	95.90	61.50
30	95.09	96.61	78.03
35	95.33	95.99	87.28
40	96.12	95.56	95.32
45	96.62	96.62	95.46
50	97.17	96.96	96.79
55	97.51	97.06	97.18
60	97.86	96.73	97.65
65	97.40	97.90	97.75
70	97.27	97.68	97.56
	100.000	100	100

Tabla 08. Porcentajes de remoción a distintas corrientes. Agua tipo VIII: 990 UNT

Tiempo (minutos)	5A % Remoción	3A % Remoción	1A % Remoción
3	8.38	1.01	0.20
5	42.02	13.23	1.01
7	65.66	27.17	8.08
10	83.03	57.07	11.31
15	88.18	81.11	19.29
20	91.20	90.69	49.29
25	85.35	92.59	68.99
30	88.38	93.38	81.21
35	89.70	94.91	89.80
40	93.26	95.45	94.86
45	95.69	96.00	97.02
50	98.14	95.83	97.63
55	98.54	95.94	97.82
60	98.92	96.88	98.16
65	98.62	98.67	98.33

70	98.06	98.41	98.14
	100.000	100	100

Tabla 09. Porcentajes de remoción a distintas corrientes. Agua tipo VIII: 2313 UNT

Tiempo (minutos)	5A % Remoción	3A % Remoción	1A % Remoción
3	65.72	67.36	9.21
5	74.66	86.04	28.66
7	91.44	88.72	48.12
10	95.24	92.82	77.69
15	97.90	97.30	94.25
20	98.61	98.71	96.45
25	98.79	99.02	97.78
30	99.07	99.07	98.44
35	99.21	99.19	98.75
40	99.29	99.21	98.99
45	99.18	99.04	99.10
50	99.04	98.81	99.15
55	98.59	98.73	99.15
60	98.50	98.52	99.02
65	98.32	98.53	98.98
70	98.24	98.37	98.90
	100.000	100	100