

PROPUESTA PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES  
GENERADAS EN EL PROCESO DEL TALLER DE ELECTROQUÍMICA  
PERTENECIENTE A LA FUERZA AÉREA COLOMBIANA MADRID -  
CUNDINAMARCA

PAULA ANDREA MARTÍNEZ GUERRERO  
JESIKA ALEJANDRA PEÑA ANTONIO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C  
2019

PROPUESTA PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES  
GENERADAS EN EL PROCESO DEL TALLER DE ELECTROQUÍMICA  
PERTENECIENTE A LA FUERZA AÉREA COLOMBIANA MADRID -  
CUNDINAMARCA

PAULA ANDREA MARTÍNEZ GUERRERO  
JESIKA ALEJANDRA PEÑA ANTONIO

Proyecto Integral de grado para optar el título de  
INGENIERO QUÍMICO

Director:  
MARCELA JOHANA BARRERA VALBUENA  
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ  
2019

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina  
Firma Jurado

---

Ing. Felipe Correa Mahecha  
Firma Jurado

Bogotá D.C., Agosto 2019

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente Institucional y Rector del Claustro

**Dr. Mario Posada García-Peña**

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

**Dr. Luis Jaime Posada García-Peña**

Vicerrector Académico y de Posgrados

**Dra. Ana Josefa Herrera Vargas**

Decano general Facultad de Ingenierías

**Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi**

Director del Programa de Ingeniería Química

**Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y los docentes no son responsables por las ideas y conceptos emitidos en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

*A Dios que siempre guió mi camino y me lleno de fe a diario para lograr cumplir este sueño.*

*A mi mamá Emilce que, aunque no me acompañe hoy en día, sé que desde el cielo intercedió por mí, para darme la fortaleza y sabiduría de seguir emprendiendo no solo en mi carrera sino como persona, y aunque no puedas presenciar y celebrar conmigo el cumplimiento de este gran logro, te lo dedico a ti.*

*A cada una de las personas que aportó a mi formación empezando por mi familia quienes son mi pilar de vida, que me enseñaron desde pequeña a luchar por aquello que se desea y anhela; a mi papá Julián Mauricio que me dio la oportunidad de culminar con éxito mi carrera, enseñándome a diario el valor de la responsabilidad, honestidad y resiliencia; a mi hermano Andrés Mauricio que ha sido un gran ejemplo a seguir, demostrándome que no hay adversidad que no podamos sobrellevar juntos; a Jaquelin que aportó fortaleza en mi para continuar con este camino; a cada uno de mis familiares en especial mis tías que creyeron en mí, me apoyaron cuando lo necesite.*

*A mis amigos y profesores de infancia que, con sus palabras de aliento, animaban mis días. A Johan que se convirtió en apoyo fundamental, que me enseñó el valor de la perseverancia, paciencia y tranquilidad para sobrellevar cualquier dificultad. A mis amigos y muy pronto colegas quienes compartieron conmigo estos años de aprendizaje, enseñanzas y me demostraron el valor de la amistad; en especial a ti Jesika gracias por confiar en mí y ser un apoyo inmenso para culminar este gran logro de ser profesionales, Dios siga guiando tu camino, eres una gran mujer y sin duda serás una gran profesional.*

*A cada una de las personas que aportaron en mi vida, para poder hoy en día culminar el sueño de ser Ingeniera Química.*

**Paula Andrea Martínez Guerrero**

*A Dios y a la Virgen por permitirme cumplir este sueño de convertirme en ingeniera Química dándome sabiduría, entendimiento, fortaleza y guiándome a lo largo de mi formación profesional.*

*A mi madre Yaneth Antonio, porque sin ella nada de esto sería posible, por ser mi ejemplo e inspiración para luchar por lo que quiero, por su amor incondicional, por siempre tener las palabras adecuadas para animarme, creer en mí en todo momento, por sus consejos que me impulsaron en cada instante y en cada decisión que tomé y además por ser lo más importante de mi vida.*

*A mis hermanos Nicolás y Juan José por su cariño, su apoyo incondicional en cada paso que di, por llenarme de alegría día tras día con sus ocurrencias, por estar siempre para mí motivándome a seguir luchando por mis propósitos y sobre todo por ser el motor de mi vida.*

*A mis tíos Edgar, Ilber y Alirio por sus consejos, por su apoyo y colaboración, por confiar en mis capacidades, brindarme su cariño y por siempre querer lo mejor para mí. A mi abuela Matutina que desde el cielo me acompaña, por todas sus enseñanzas, por todos los valores y principios inculcados que me han permitido salir adelante. A mi abuelo Domingo por sus enseñanzas y ejemplo de perseverancia. A mis primos por sus consejos y sus palabras de ánimo cuando más las necesitaba; en especial a Stiven y Valery por creer siempre en que lograría convertirme en ingeniera química.*

*A Paula por su amistad, por su esfuerzo y dedicación para realizar este proyecto, por los conocimientos aportados y por su apoyo que permitió que este trabajo de grado se culminará con éxito.*

*A mis amigos y compañeros de la universidad, quienes hicieron esta etapa inolvidable por todas las experiencias y momentos compartidos, por las tristezas y alegrías vividas a lo largo de este camino, por permitirme entrar en sus vidas y por su compañía a lo largo de la carrera. A mis amigos, porque a pesar del tiempo y la distancia están ahí para escucharme, para darme consejos y palabras de motivación para seguir luchando por cumplir mis objetivos.*

*En general a todas las personas que han estado de una u otra forma a lo largo de mi camino permitiendo que culminara esta etapa de mi vida con éxito, cumpliendo mi sueño de convertirme en Ingeniera Química.*

**Jesika Alejandra Peña Antonio**

## **AGRADECIMIENTOS**

*A nuestra directora Marcela Johana Barrera Valbuena Ingeniera Química, subteniente de la Fuerza Aérea Colombiana por su orientación, apoyo, consejos y conocimientos aportados a lo largo de este proyecto.*

*Al Ingeniero Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez, director del programa de Ingeniería Química.*

*A los orientadores del comité de proyecto de grado de Ingeniería Química, en especial al Ingeniero Oscar Libardo Lombana por guiarnos con su asesoría profesional.*

*A la Fuerza Aérea Colombiana por darnos la oportunidad de llevar a cabo este proyecto. A la Universidad Militar Nueva Granada por apoyarnos con el préstamo de las instalaciones del laboratorio de calidad de aguas para el desarrollo experimental del proyecto.*

*A los profesores de la Fundación Universidad de América por sus enseñanzas para formarnos como profesionales.*

## CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	26
<b>OBJETIVOS</b>	27
<b>1. GENERALIDADES</b>	28
1.1 METALES PESADOS	28
1.2 CIANURO	30
1.3 PROCESO GALVÁNICO	31
1.3.1 Pretratamientos de las piezas	31
1.3.2 Recubrimientos metálicos	33
1.3.2.1 Cadmio	33
1.3.2.2 Cobre	33
1.3.2.3 Cromo duro	33
1.3.2.4 Níquel	34
1.3.2.5 Pavonado	34
1.3.2.6 Plata	34
1.3.2.7 Anodizado	35
1.3.2.8 Brush plating	35
1.4 MUESTREO DE AGUA	35
1.4.1 Métodos de aforo de caudales	36
1.4.2 Tipos de muestra	36
1.4.2.1 Muestra instantánea	36
1.4.2.2 Muestra integrada	36
1.4.2.3 Muestra compuesta	36
1.4.3 Tipos de Muestreo	37
1.4.3.1 Muestreo manual	37
1.4.3.2 Muestreo automático	37
1.5 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL AGUA	37
1.6 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	39
1.6.1 Pre-tratamiento	39
1.6.2 Tratamiento primario	39
1.6.3 Tratamiento secundario	39
1.6.4 Tratamiento terciario	40
1.6.5 Tratamiento físico	40
1.6.6 Tratamiento químico	40
1.6.7 Tratamiento biológico	40
1.7 TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	40
1.7.1 Precipitación Química	40
1.7.2 Coagulación	43
1.7.3 Floculación	43
1.7.4 Oxidación- reducción	44

1.7.5	Cloración alcalina	45
1.7.6	Intercambio iónico	45
1.7.7	Filtración de membrana	49
1.7.7.1	Ultrafiltración y microfiltración	50
1.7.7.2	Osmosis Inversa	51
1.7.7.3	Electrodialisis	52
1.7.8	Electrocoagulación	53
1.8	MARCO LEGAL	56
<b>2.</b>	<b>GENERALIDADES PROCESO ACTUAL</b>	<b>59</b>
2.1	PROCESO TALLER DE ELECTROQUÍMICA	60
2.1.1	Inspección de piezas a tratar	63
2.1.2	Lavador de piezas	63
2.1.3	Enjuague de piezas	64
2.1.4	Electrolimpieza	64
2.1.5	Enjuague	65
2.1.6	Activación	65
2.1.7	Enjuague	65
2.1.8	Recubrimiento Metálico	65
2.1.8.1	Recubrimiento de Cobre	65
2.1.8.2	Recubrimiento de Cadmio	66
2.1.8.3	Recubrimiento de Plata	66
2.1.8.4	Recubrimiento de Cromo	67
2.1.8.5	Recubrimiento de Níquel	67
2.1.8.6	Anodizado	68
2.1.8.7	Pavonado	69
2.1.8.8	Brush Plating	69
2.1.9	Horno deshidrogenación	70
2.2	DESCRIPCIÓN PLANTA DE TRATAMIENTO ACTUAL	71
2.3	DIAGNÓSTICO DE PROCESO EN PLANTA DE TRATAMIENTO ACTUAL	78
2.3.1	Histórico de la caracterización del agua a la entrada de la PTAR	78
2.3.2	Caracterización del agua a la salida de la PTAR	80
2.3.3	Evaluación de la PTAR y el proceso actual de tratamiento	81
<b>3.</b>	<b>SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO PARA LA DISMINUCIÓN DE METALES PESADOS Y CIANURO</b>	<b>91</b>
3.1	PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS	91
3.1.1	Alternativa A: Mejoramiento del proceso actual	91
3.1.2	Alternativa B: Intercambio Iónico	93
3.1.3	Alternativa C: Electrocoagulación	94
3.2	SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	96
3.2.1	Criterios de selección	96
3.2.2	Matriz de selección	99

<b>4 DESARROLLO EXPERIMENTAL</b>	104
4.1 TOMA DE MUESTRA	104
4.2 CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL AGUA RESIDUAL	105
4.3 OPCIONES PROPUESTAS PARA LA OXIDACIÓN DE CIANURO DE LA ALTERNATIVA A	107
4.3.1 Opción I: Tratamiento con hipoclorito de calcio como oxidante para cianuros	108
4.3.2 Opción II: Tratamiento con peróxido de hidrógeno e hipoclorito de calcio como oxidantes para cianuros	110
4.3.3 Selección de la opción más adecuada	111
4.4 PROPUESTA SELECCIONADA PARA TRATAMIENTO DE AGUA	112
4.4.1 Ajuste de pH a medio básico para oxidación de cianuro	115
4.4.2 Oxidación de cianuro	116
4.4.3 Ajuste pH a medio ácido para reducción de cromo	116
4.4.4 Reducción de cromo	118
4.4.5 Ajuste de pH a medio básico para precipitación cromo	120
4.4.6 Ajuste de pH a medio básico para precipitación metales	121
4.4.7 Ajuste de pH para cumplimiento de norma	122
4.4.8 Floculación	123
4.4.9 Filtración	126
4.5 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA TRATADA	127
<b>5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO</b>	132
5.1 ESPECIFICACIONES PREVIAS	132
5.2 CANTIDAD DE MATERIA PRIMA	136
5.3 BALANCE DE MATERIA	136
5.4 ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS	139
5.4.1 Tanque de almacenamiento	139
5.4.2 Bomba sumergible	139
5.4.3 Tanque de sedimentación	140
5.4.4 Agitador Mecánico	144
5.4.4.1 Tipo de agitador	144
5.4.4.2 Dimensiones del agitador	146
5.4.4.3 Potencia de trabajo requerida	147
5.4.5 Bombas centrifugas	150
5.4.6 Bombas y tanques de dosificación	151
5.4.7 Tuberías y válvulas	151
5.4.8 Filtros	151
5.4.9 Lechos de secado de lodos	154
5.5 EQUIPOS Y ACCESORIOS DE PROCESO	154
<b>6. ANALISIS FINANCIERO</b>	156
6.1 COSTOS INVERSIÓN	156
6.2 COSTOS DE OPERACIÓN	157

6.2.1 Costos materia prima	157
6.2.2 Costos servicio público	158
6.2.3 Costo tratamiento de lodos	159
6.2.4 Depreciación de equipos	159
6.3ANUALIDAD SALVAMENTO	160
6.4COSTO ANUAL EQUIVALENTE (CAE)	160
6.5SANCIÓN AMBIENTAL	161
6.5.1 Beneficio ilícito	162
6.5.2 Grado de afectación ambiental (i)	164
6.5.3 Circunstancias agravantes y atenuantes	166
6.5.4 Capacidad socioeconómica del infractor	166
6.5.5 Costos asociados	166
6.5.6 Multa generada por un mes	167
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>168</b>
<b>8. RECOMENDACIONES</b>	<b>170</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>171</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>191</b>

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Caracterización agua de entrada PTAR.	79
<b>Tabla 2.</b> Comparación de caracterizaciones a la entrada y salida de la PTAR (actual) de parámetros que no cumplen con la resolución 0631 de 2015.	80
<b>Tabla 3.</b> Parámetros evaluados por etapa.	90
<b>Tabla 4.</b> Matriz de factores ponderados	103
<b>Tabla 5.</b> Bitácora recubrimientos metálicos.	104
<b>Tabla 6.</b> Caracterización inicial (metales pesados, cianuro, fenoles).	106
<b>Tabla 7.</b> Caracterización inicial.	106
<b>Tabla 8.</b> Parámetros evaluados por etapa.	112
<b>Tabla 9.</b> pH inicial jarras.	115
<b>Tabla 10.</b> Datos registrados para ajuste de pH 9-11 (oxidación de cianuros).	115
<b>Tabla 11.</b> Datos registrados para ajuste de pH 2-3 (reducción de cromo).	117
<b>Tabla 12.</b> Datos registrados de conductividad en la reducción de cromo.	118
<b>Tabla 13.</b> Datos registrados para ajuste pH 8-8,5 (precipitación de cromo).	120
<b>Tabla 14.</b> Datos registrados para ajuste pH 9-11 (precipitación de metales).	121
<b>Tabla 15.</b> Datos registrados para ajuste de pH 6-9 (para cumplimiento de norma).	122
<b>Tabla 16.</b> Prueba de jarras para seleccionar dosificación de floculante adecuado.	124
<b>Tabla 17.</b> % de floc removido.	125
<b>Tabla 18.</b> % de aumento de cantidad de lodos.	126
<b>Tabla 19.</b> % remoción de turbiedad.	127
<b>Tabla 20.</b> Caracterización agua tratada (metales pesados, cianuro).	128
<b>Tabla 21.</b> Caracterización agua tratada.	128
<b>Tabla 22.</b> Comparación de % de remoción con tratamientos similares.	129
<b>Tabla 23.</b> Cantidad de materia prima.	136
<b>Tabla 24.</b> Costos de inversión de equipos y accesorios.	156
<b>Tabla 25.</b> Costo reactivos.	157
<b>Tabla 26.</b> Costos sistema de filtración.	158
<b>Tabla 27.</b> Costos servicio público energía.	158
<b>Tabla 28.</b> Costos de acueducto.	158
<b>Tabla 29.</b> Costo tratamiento de lodos.	159
<b>Tabla 30.</b> Datos experimentales para DQO.	204
<b>Tabla 31.</b> Datos experimentales para determinar OD de agua sin tratar.	205
<b>Tabla 32.</b> Valores obtenidos para OD de agua sin tratar.	206
<b>Tabla 33.</b> Datos experimentales para determinar OD de agua tratada.	207
<b>Tabla 34.</b> Valores obtenidos para OD de agua tratada.	208
<b>Tabla 35.</b> Datos experimentales para determinación grasas y aceites.	208

<b>Tabla 36.</b> Datos obtenidos para pH.	210
<b>Tabla 37.</b> Datos obtenidos para turbiedad.	210
<b>Tabla 38.</b> Datos experimentales para determinación de sólidos suspendidos totales.	211
<b>Tabla 39.</b> Datos para determinar la densidad de lodo.	213
<b>Tabla 40.</b> Turbidez promedio en tiempos de sedimentación para diferentes dosificaciones de floculante.	219

## LISTA DE CUADROS

	pág.
<b>Cuadro 1.</b> Toxicidad de metales pesados en seres humanos.	29
<b>Cuadro 2.</b> Toxicidad de metales pesados en medio ambiente.	30
<b>Cuadro 3.</b> Aplicación de algunas resinas y su nombre técnico.	48
<b>Cuadro 4.</b> Parámetros de vertimiento para tratamiento y revestimiento de metales.	57
<b>Cuadro 5.</b> Recubrimientos realizados por el taller de electroquímica de la FAC.	61
<b>Cuadro 6.</b> Tiempo de retención proceso actual.	71
<b>Cuadro 7.</b> Condiciones adecuadas para oxidación de cianuro con peróxido de hidrógeno e hipoclorito de calcio.	83
<b>Cuadro 8.</b> Condiciones adecuadas para reducción de cromo hexavalente a cromo trivalente.	84
<b>Cuadro 9.</b> Condiciones adecuadas para la precipitación de metales.	85
<b>Cuadro 10.</b> Ventajas y desventajas Alternativa A.	92
<b>Cuadro 11.</b> Ventajas y desventajas Alternativa B.	94
<b>Cuadro 12.</b> Ventajas y desventajas Alternativa C.	95
<b>Cuadro 13.</b> Criterios de selección.	97
<b>Cuadro 14.</b> Inversión.	97
<b>Cuadro 15.</b> Costos de operación y mantenimiento.	97
<b>Cuadro 16.</b> Consumo energético.	98
<b>Cuadro 17.</b> Requerimiento de espacio.	98
<b>Cuadro 18.</b> Vida útil de equipos.	98
<b>Cuadro 19.</b> Rendimiento.	99
<b>Cuadro 20.</b> Tiempo de operación.	99
<b>Cuadro 21.</b> Peligrosidad de reactivos.	99
<b>Cuadro 22.</b> Criterios económicos.	100
<b>Cuadro 23.</b> Criterios Técnicos.	101
<b>Cuadro 24.</b> Criterios Operativos.	101
<b>Cuadro 25.</b> Condiciones adecuadas para la remoción de cianuros mediante cloración alcalina.	109
<b>Cuadro 26.</b> Tiempos de retención alternativa seleccionada.	132
<b>Cuadro 27.</b> Parámetros agua generada en taller de electroquímica.	144
<b>Cuadro 28.</b> Tipos de agitadores.	145
<b>Cuadro 29.</b> Características agitador.	150
<b>Cuadro 30.</b> Equipos y accesorios de proceso.	155

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> Solubilidad de metales en función del pH.	42
<b>Figura 2.</b> Resina de Intercambio Iónico.	46
<b>Figura 3.</b> Intercambio Iónico.	47
<b>Figura 4.</b> Espectro de separación por membranas.	50
<b>Figura 5.</b> Osmosis Inversa.	51
<b>Figura 6.</b> Membrana de electrodiálisis.	53
<b>Figura 7.</b> Electrocoagulación.	54
<b>Figura 8.</b> Celda de Electrocoagulación.	55
<b>Figura 9.</b> Taller de Electroquímica-CAMAN.	59
<b>Figura 10.</b> Taller de Electroquímica de la FAC.	61
<b>Figura 11.</b> Diagrama de bloques proceso taller de electroquímica.	62
<b>Figura 12.</b> Banco de Inspección de piezas.	63
<b>Figura 13.</b> Lavador de piezas.	63
<b>Figura 14.</b> Enjuague de piezas.	64
<b>Figura 15.</b> Cuba electrolítica de Electrolimpieza.	64
<b>Figura 16.</b> Activación.	65
<b>Figura 17.</b> Cuba electrolítica recubrimiento de cromo.	66
<b>Figura 18.</b> Cuba electrolítica recubrimiento de cadmio.	66
<b>Figura 19.</b> Cuba electrolítica recubrimiento de plata.	67
<b>Figura 20.</b> Cuba electrolítica recubrimiento de cromo.	67
<b>Figura 21.</b> Cuba electrolítica recubrimiento de níquel.	68
<b>Figura 22.</b> Cuba electrolítica recubrimiento de Anodizado tipo II.	68
<b>Figura 23.</b> Cuba electrolítica de pavonado.	69
<b>Figura 24.</b> Banco de Brush Plating.	69
<b>Figura 25.</b> Horno deshidrogenación.	70
<b>Figura 26.</b> Canaleta de evacuación de agua.	70
<b>Figura 27.</b> Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) –FAC.	71
<b>Figura 28.</b> Diagrama de Tratamiento actual de la PTAR.	73
<b>Figura 29.</b> Diagrama de Proceso PTAR.	74
<b>Figura 30.</b> Tanque de almacenamiento.	75
<b>Figura 31.</b> Tanque de sedimentación TK2.	75
<b>Figura 32.</b> Bomba Centrífuga.	76
<b>Figura 33.</b> Tanque de sedimentación TK3.	77
<b>Figura 34.</b> Filtros de Grava.	77
<b>Figura 35.</b> Lecho de secado de lodos.	78
<b>Figura 36.</b> Desarrollo pre-experimental tratamiento actual.	89
<b>Figura 37.</b> Diagrama de bloques Alternativa A.	92
<b>Figura 38.</b> Diagrama de bloques Alternativa B.	93

<b>Figura 39.</b> Diagrama de bloques Alternativa C.	95
<b>Figura 40.</b> Desarrollo experimental opción I de tratamiento.	110
<b>Figura 41.</b> Desarrollo experimental opción II de tratamiento.	111
<b>Figura 42.</b> Diagrama de bloques Alternativa Seleccionada.	113
<b>Figura 43.</b> Muestra agua residual inicial.	115
<b>Figura 44.</b> Cambio color reducción cromo hexavalente y trivalente.	119
<b>Figura 45.</b> Prueba de jarras después de precipitación de metales.	122
<b>Figura 46.</b> Formación de flocs.	125
<b>Figura 47.</b> Montaje de laboratorio para filtración.	127
<b>Figura 48.</b> Diagrama de Tratamiento seleccionado.	134
<b>Figura 49.</b> Diagrama de proceso PTAR alternativa seleccionada.	135
<b>Figura 50.</b> Diagrama tratamiento seleccionado con balance de materia.	138
<b>Figura 51.</b> Bomba sumergible clase JP.	139
<b>Figura 52.</b> Sección cónica del tanque.	142
<b>Figura 53.</b> Dimensiones tanque de sedimentación.	144
<b>Figura 54.</b> Curva experimental número de potencia $N_p$ .	149
<b>Figura 55.</b> Bomba centrífuga Barnes.	150
<b>Figura 56.</b> Bomba dosificadora Blue-White.	151
<b>Figura 57.</b> Desarrollo experimental determinación DQO.	205
<b>Figura 58.</b> Desarrollo experimental $DBO_5$ .	208
<b>Figura 59.</b> Desarrollo experimental determinación grasas y aceites.	209
<b>Figura 60.</b> Determinación turbiedad.	211
<b>Figura 61.</b> Determinación SSED agua sin tratar.	212
<b>Figura 62.</b> Determinación SSED agua tratada.	213
<b>Figura 63.</b> Lodos residuales.	214
<b>Figura 64.</b> Índice de floculación Willcomb.	219

## LISTA DE REACCIONES

	pág.
<b>Reacción 1.</b> Precipitación Química.	41
<b>Reacción 2.</b> Precipitación cromo trivalente.	42
<b>Reacción 3.</b> Proceso electrocoagulación.	55
<b>Reacción 4.</b> Desionización de agua.	56
<b>Reacción 5.</b> Reacción en el cátodo.	56
<b>Reacción 6.</b> Oxidación de cianuro con peróxido de hidrógeno.	83
<b>Reacción 7.</b> Oxidación de cianuro con hipoclorito de calcio.	83
<b>Reacción 8.</b> Reducción de cromo hexavalente cromo trivalente con metabisulfito de sodio.	85
<b>Reacción 9.</b> Precipitación Química.	85

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
<b>Gráfica 1.</b> Ajuste pH 9-11- Oxidación de cianuro.	116
<b>Gráfica 2.</b> Ajuste pH 2-3- Reducción de cromo.	117
<b>Gráfica 3.</b> Reducción cromo hexavalente a cromo trivalente.	119
<b>Gráfica 4.</b> Ajuste pH 8-8,5- Precipitación de cromo.	120
<b>Gráfica 5.</b> Ajuste pH 9-11- Precipitación de metales.	121
<b>Gráfica 6.</b> Ajuste de pH 6-9 (para cumplimiento de norma).	123
<b>Gráfica 7.</b> % de floc removido para diferentes dosificaciones.	125

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
<b>Ecuación 1.</b> Factores ponderados.	102
<b>Ecuación 2.</b> Volumen tanque de sedimentación.	140
<b>Ecuación 3.</b> Volumen del cilindro.	140
<b>Ecuación 4.</b> Relación h/D.	141
<b>Ecuación 5.</b> Angulo de inclinación.	142
<b>Ecuación 6.</b> Volumen del cono.	143
<b>Ecuación 7.</b> Volumen del cilindro.	143
<b>Ecuación 8.</b> Altura total tanque.	143
<b>Ecuación 9.</b> Diámetro agitador.	146
<b>Ecuación 10.</b> Distancia entre el fondo del tanque y el agitador.	147
<b>Ecuación 11.</b> Longitud agitador.	147
<b>Ecuación 12.</b> Numero de Reynolds.	148
<b>Ecuación 13.</b> Potencia agitador.	149
<b>Ecuación 14.</b> Numero de filtros.	152
<b>Ecuación 15.</b> Tasa de filtración.	152
<b>Ecuación 16.</b> Ancho del filtro.	153
<b>Ecuación 17.</b> Longitud del filtro.	153
<b>Ecuación 18.</b> Anualidad inversión.	156
<b>Ecuación 19.</b> Depreciación equipos en línea recta.	159
<b>Ecuación 20.</b> Anualidad salvamento.	160
<b>Ecuación 21.</b> Costo anual equivalente.	161
<b>Ecuación 22.</b> Tasación de multa.	162
<b>Ecuación 23.</b> Beneficio ilícito.	162
<b>Ecuación 24.</b> Costos evitados.	163
<b>Ecuación 25.</b> Importancia de afectación.	164
<b>Ecuación 26.</b> Valor monetario de la importancia de la afectación.	165
<b>Ecuación 27.</b> Factor de temporalidad.	165
<b>Ecuación 28.</b> Circunstancias agravantes y atenuantes.	166
<b>Ecuación 29.</b> Determinación DQO.	204
<b>Ecuación 30.</b> Determinación Oxígeno disuelto para DBO <sub>5</sub> .	205
<b>Ecuación 31.</b> Determinación DBO <sub>5</sub> .	206
<b>Ecuación 32.</b> Determinación grasas y aceites.	209
<b>Ecuación 33.</b> Determinación sólidos sedimentables totales.	211
<b>Ecuación 34.</b> Densidad de lodo.	213
<b>Ecuación 35.</b> Dilución.	217
<b>Ecuación 36.</b> % de floc removido.	220
<b>Ecuación 37.</b> Densidad.	226

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
<b>Anexo A.</b> Histórico caracterizaciones entrada PTAR.	192
<b>Anexo B.</b> Histórico caracterización agua salida ptar.	194
<b>Anexo C.</b> Informes mantenimiento PTAR-FAC.	195
<b>Anexo D.</b> Caracterización tratamiento orden actual de etapas.	199
<b>Anexo E.</b> Test kit cianuro.	200
<b>Anexo F.</b> Test kit cromo.	201
<b>Anexo G.</b> Criterios matriz.	202
<b>Anexo H.</b> Caracterización agua antes de tratamiento.	203
<b>Anexo I.</b> Datos y resultados caracterización realizada en el laboratorio de la universidad militar antes y después de tratamiento.	204
<b>Anexo J.</b> Caracterización agua tratada opción I y II.	215
<b>Anexo K.</b> Preparación de soluciones para laboratorio.	217
<b>Anexo L.</b> Índice willcomb y datos obtenidos para floculación.	219
<b>Anexo M.</b> Caracterización agua tratada.	221
<b>Anexo N.</b> Cantidad de productos químicos en planta.	222
<b>Anexo O.</b> Cotizaciones de equipos, materias primas, servicios públicos y tratamiento de lodos.	228

## ABREVIATURAS

**Ca(ClO)<sub>2</sub>**. Hipoclorito de calcio  
**CAMAN**. Comando Aéreo de Mantenimiento  
**DBO<sub>5</sub>**. Demanda Bioquímica de Oxígeno  
**DQO**. Demanda Química de Oxígeno  
**FAC**. Fuerza Aérea colombiana  
**g**. Gramos  
**g/ cm<sup>3</sup>**. Gramo por centímetro cubico  
**HP**. Caballos de fuerza  
**H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**. Peróxido de hidrógeno  
**H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**. Ácido sulfúrico  
**HV**. Dureza Vickers  
**IDEAM**. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia)  
**in**. Pulgadas  
**kg**. Kilogramos  
**kW/h**. Kilo Watts por hora  
**L**. Litros  
**m<sup>2</sup>**. Metro cuadrado  
**m<sup>3</sup>/h**. Metro cubico por hora  
**mA/cm<sup>2</sup>**. Mili amperios por centímetro cuadrado  
**MCL**. Niveles máximos de contaminantes  
**mg/L**. Miligramos por litro  
**min**. Minutos  
**mm**. Milímetros  
**ml o mL**. Mililitros  
**NaOH**. Hidróxido de sodio  
**Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>**. Metabisulfito de sodio  
**nm**. Nanómetros  
**NTU**. Unidad nefelometrica de turbidez  
**OD**. Demanda Oxígeno  
**pH**. Índice de acidez y basicidad  
**PLC**. Controlador lógico programable  
**ppm**. Partes por millón  
**PTAR**. Planta de tratamiento de aguas residuales  
**rpm**. Revoluciones por minuto  
**rps**. Revoluciones por segundo  
**SSED**. Sólidos suspendidos sedimentables  
**SST**. Sólidos suspendidos totales  
**V**. Voltios  
**°C**. Grados centígrados  
**%p/p**. porcentaje volumen por volumen  
**%v/v**. porcentaje volumen por volumen  
**µm**. Micrómetros  
**\$**. Pesos Colombianos

## GLOSARIO

**ACTIVACIÓN:** proceso por el cual se elimina el óxido de un metal y una capa de metal de la superficie con el fin de que se active electroquímicamente y permita realizar el recubrimiento<sup>1</sup>.

**AGUAS RESIDUALES:** aguas procedentes de procesos químicos y/o físicos, las cuales presentan concentración de sustancias contaminantes que afectan las propiedades del agua<sup>2</sup>.

**CUBA:** recipiente metálico abierto, donde se realiza la electrolisis y donde se encuentra el electrolito, se usa en procesos de galvanotecnia<sup>3</sup>.

**EFLUENTE:** corresponde a la salida o flujos salientes de sistemas que expulsan flujos de agua<sup>4</sup>.

**ELECTROLIMPIEZA:** consiste en realizar una inmersión de la pieza dentro de una solución anódica o catódica.

**ELECTRÓLISIS:** consiste en agregar una sustancia en un electrodo sumergido en un electrolito al transcurrir corriente eléctrica a través de este<sup>5</sup>.

**FLOCULACIÓN:** proceso que implica la formación de puentes químicos entre las impurezas presentes, de manera que se forma una malla de coágulos, siendo esta tridimensional y porosa<sup>6</sup>.

**GALVANOTECNIA:** proceso que consiste en la deposición de un recubrimiento por electrólisis<sup>7</sup>.

**LODOS:** subproductos semilíquidos que se obtienen en las plantas de tratamiento de aguas residuales, debido a la precipitación de contaminantes<sup>8</sup>.

---

<sup>1</sup> VELASQUEZ, Johana. Propuesta para el mejoramiento de la PTAR en Inversiones Suarez Rios LTDA. ZN'S. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2010. p. 18.

<sup>2</sup> CORREDOR, Héctor y DIAZ, Elkin. Alternativa para la disminución de metales pesados en los efluentes de proceso de la Industria Galvánica Galvanotecnica. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2011.p. 16.

<sup>3</sup> FRANCO, Daniela. Propuesta para la reutilización de aguas residuales del proceso de recubrimientos electroquímicos de la empresa ZINTEPEC LTDA. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2018. p. 16.

<sup>4</sup> CORREDOR. Op. cit., p.16.

<sup>5</sup> DAVIS, J.R. Surface Engineering to Add a Surface Layer or Coating. En: Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance. p 145. [En línea]. Estados Unidos: ASM International. [Citado el 11 de septiembre de 2018]. ISBN 9781591249634. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSECWR005/surface-engineering-corrosion/surface-engineering-corrosion>.

<sup>6</sup> CORREDOR. Op. cit., p. 23.

<sup>7</sup> DAVIS, J.R. Op. cit., p. 145

<sup>8</sup> CORREDOR. Op. cit., p. 17.

**METALES PESADOS:** hace referencia a elementos que tienen pesos atómicos entre 63,5 y 200,6 y su densidad sobrepasa los 5 g/ cm<sup>3</sup><sup>9</sup>.

**PAVONADO:** consiste en un proceso con el fin de proteger un objeto metálico en el cual se produce la oxidación superficial de este, por medio del calentamiento en un ambiente oxidante. Se produce un recubrimiento color negro<sup>10</sup>.

**PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR):** conjunto de equipos, accesorios y materiales requeridos para efectuar los procesos que permitan cumplir las normas para el vertimiento y la calidad de aguas residuales<sup>11</sup>.

**PRECIPITACIÓN:** tratamiento de aguas que se basa en el principio de solubilidad de iones y compuestos presentes en el agua, por ejemplo, para los metales<sup>12</sup>.

**RECUBRIMIENTO ELECTROLÍTICO:** recubrimiento realizado por vía electrolítica a un material de capas delgadas de metal, se realiza por medio de electricidad. Se usan metales como zinc, cromo, plata, oro, níquel, cobre, estaño entre otros<sup>13</sup>.

**VERTIMIENTO:** descarga final de un elemento, sustancia o compuesto, de un líquido residual de cualquier origen, ya sea agrícola, minero, industrial de servicios, aguas negras o servidas, a un cuerpo de agua, o al ambiente<sup>14</sup>.

---

<sup>9</sup> SRIVASTAVA, N.K y MAJUMDER, C.B. Novel biofiltration methods for the treatment of heavy metals from industrial wastewater. Journal of Hazardous Materials [en línea]. 2008, February, 151 (1). p. 1-8. [Consultado 14 diciembre 2018]. ISSN 03043894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.101>.

<sup>10</sup> MORRAL, Facundo Rolf; JIMENO, Emilio y MOLERA, P. Metalurgia General. [en línea]. Barcelona, España: Reverté, 1985. [citado el 2 de mayo de 2019]. Disponible en: [https://books.google.com.co/books/about/Metalurgia\\_general.html?hl=es&id=mtVwUijNSi4C&redir\\_esc=y](https://books.google.com.co/books/about/Metalurgia_general.html?hl=es&id=mtVwUijNSi4C&redir_esc=y). ISBN: 9788429160710.

<sup>11</sup> AYALA, Ximena y BOHORQUEZ, Liliana. Propuesta para la reutilización del agua residual tratada proveniente del proceso Galvánico de industrias Tiber S.A. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. 2011. p 22.

<sup>12</sup> CORREDOR. Op. cit., p. 24.

<sup>13</sup> ALZATE, Adriana. Guía De Producción Más Limpia Para El Sector De Recubrimientos Electrolíticos En Colombia. p. 10. En: INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS. [sitio web]. Buenaventura: INVEMAR. [Consulta 2 mayo 2019]. Archivo pdf. Disponible en: [http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/RinconLiterario/2009/octubre/JE\\_64.pdf](http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/RinconLiterario/2009/octubre/JE_64.pdf)

<sup>14</sup> AYALA. Op. cit., p. 22.

## RESUMEN

En el presente proyecto se expone la propuesta para un sistema de tratamiento de aguas residuales generadas en el proceso del taller de electroquímica perteneciente a la Fuerza Aérea Colombiana Madrid-Cundinamarca, con el fin de mejorar la calidad del agua residual tratada, disminuyendo la carga contaminante del efluente para dar cumplimiento a los parámetros establecidos por la resolución 0631 de 2015 para el vertimiento al sistema de alcantarillado para la totalidad del agua generada.

Para el desarrollo de este proyecto inicialmente se realizó el diagnóstico del proceso de tratamiento ya existente en la PTAR, donde se encontró que solo se trata el 29% del total de agua generada, además no se tiene en cuenta un orden adecuado de etapas, dosificaciones, pH y tiempos correctos para eliminación de los contaminantes presentes en el agua, siendo cadmio, cianuro, cromo, níquel, DBO<sub>5</sub>, DQO, grasas y aceites, SSED, SST y pH aquellos que no cumple con lo establecido por la resolución anteriormente mencionada.

Mediante una matriz de decisión, basándose en criterios económicos, operativos y técnicos, se seleccionó la alternativa A, que corresponde al mejoramiento del proceso actual. Se llevó a cabo el desarrollo experimental, para determinar los mejores oxidantes para la etapa de cianuro; posteriormente se evaluó la propuesta seleccionada que consta de oxidación de cianuro, reducción de cromo, precipitación de metales pesados, floculación y filtración; evidenciando que cianuro con porcentaje de reducción de 94,33% es el único parámetro que no se encuentra dentro de los límites establecidos en la resolución 0631 de 2015.

A continuación, se definieron las especificaciones técnicas de equipos, accesorios y materia prima para la implementación de la propuesta seleccionada; determinando las dimensiones y características de cada uno de los equipos requeridos por etapa. Finalmente, se realizó un análisis financiero donde se indica el costo de inversión, costo de operación y se determinaron los costos que implica una sanción ambiental, obteniendo que es más viable económicamente la implementación de la alternativa seleccionada cumpliendo de esta manera los objetivos planteados.

**PALABRAS CLAVES:** PTAR, Recubrimientos electrolíticos, precipitación química, floculación, metales pesados, cianuro, galvanotecnia.

## INTRODUCCIÓN

La Fuerza Aérea Colombiana (FAC) cuenta con un Comando Aéreo de Mantenimiento (CAMAN), ubicado en La Base Aérea My Justino Mariño Cuesto en Madrid Cundinamarca, este comando posee un taller de electroquímica donde se llevan a cabo procesos de reparación y mantenimiento de piezas aeronáuticas con el fin de hacer limpieza y revisión del deterioro de las mismas, empleando recubrimientos electrolíticos, para que éstas adquieran mayor resistencia a la corrosión, abrasión, rayos ultravioletas, dureza superficial y coeficiente de fricción. Actualmente se llevan a cabo recubrimientos electrolíticos por inmersión de cromo, cadmio, níquel, plata, cobre y anodizado; por oxidación como pavonado y brush plating por contacto.

Como este proceso genera gran cantidad de aguas residuales con sustancias tóxicas como agentes de limpieza alcalinos, cianuros, metales pesados, disolventes, desengrasantes, aceites y grasas<sup>15</sup>, se hace necesario tratar la misma con procesos químicos como oxidación de cianuro, precipitación de metales pesados, floculación y filtración para cumplir los parámetros para el vertimiento al sistema de alcantarillado según lo establecido por la resolución 0631 de 2015.

Por tal razón, este proyecto pretende mejorar la calidad del agua residual tratada, disminuyendo la carga contaminante del efluente, y tratando la totalidad del agua generada por el taller de electroquímica, mediante el estudio de alternativas que cumplan con este fin. Durante la ejecución del presente proyecto, inicialmente se tiene en cuenta un diagnóstico del proceso actual y los contaminantes presentes en el agua generada, para luego establecer diferentes alternativas de tratamiento y la selección de ésta, considerando criterios económicos, técnicos y operativos previamente establecidos; posteriormente por medio de un desarrollo experimental se definen las dosificaciones de reactivos, y especificaciones técnicas como equipos y accesorios requeridos por la alternativa seleccionada; finalmente se realiza un análisis financiero de la misma, para realizar una comparación de los costos que implica la implementación de la alternativa seleccionada con la sanción ambiental en caso de seguir incumpliendo con la normatividad vigente.

---

<sup>15</sup> HEIDMAN, I y CALMANO, W. Removal of Zn(II), Cu(II), Ni(II), Ag(I) and Cr(VI) present in aqueous solutions by aluminium electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*. [en línea]. 2008, April, 152 (3). p. 934. [Consultado 14 diciembre 2018]. ISSN 03043894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.068>

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar una propuesta para un sistema de tratamiento de aguas residuales provenientes del taller de electroquímica perteneciente a la Fuerza Aérea Colombiana (Madrid-Cundinamarca).

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diagnosticar el estado actual del proceso de generación de vertimientos y los residuos presentes en el agua procedente del taller de electroquímica.
- Seleccionar la alternativa de tratamiento de agua, teniendo en cuenta diferentes etapas de adecuación, por medio de un desarrollo experimental.
- Establecer requerimientos técnicos de la alternativa de tratamiento de agua seleccionada.
- Realizar análisis financiero del sistema de tratamiento seleccionado.

# 1. GENERALIDADES

## 1.1 METALES PESADOS

Los metales pesados son elementos que tienen pesos atómicos entre 63,5 y 200,6<sup>16</sup>, su densidad sobrepasa los 5 g/cm<sup>3</sup>. Estos causan graves efectos en la salud, dentro de los cuales se encuentran: crecimiento y desarrollo reducido, cáncer, daño al sistema nervioso y órganos, e incluso la muerte<sup>17</sup>, tal como se observa en el Cuadro 1. El zinc provoca calambres estomacales, irritaciones de la piel, vómitos, náuseas y anemia<sup>18</sup>. La ingesta excesiva de cobre induce a problemas toxicológicos, como vómitos, calambres, convulsiones y hasta la muerte<sup>19</sup>. El plomo causa daños al sistema nervioso central, riñón, hígado, sistema reproductivo, procesos celulares básicos y funciones cerebrales; los síntomas tóxicos que se presentan son: anemia, insomnio, dolor de cabeza, mareos, alucinaciones, debilidad de los músculos y daños renales<sup>20</sup>.

Por otro lado, cuando el níquel pasa su nivel máximo permitido puede ocasionar problemas pulmonares, renales, gastrointestinales, fibrosis pulmonar, dermatitis cutánea y cáncer<sup>21</sup>. El mercurio es una neurotoxina que causa daños al sistema nervioso central, disminución de funciones pulmonares y renales, dolor en el pecho y disnea<sup>22</sup>. La exposición a cadmio conlleva a disfunciones renales y niveles crónicos que dan lugar a la muerte<sup>23</sup>. El cromo (VI) es más tóxico que el cromo (III), este primero afecta la fisiología humana provocando desde irritación de la piel hasta el carcinoma de pulmón<sup>24</sup>.

---

<sup>16</sup> SRIVASTAVA. Op. cit., p.1-8.

<sup>17</sup> BARAKAT, M.A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*. [en línea]. 2011, October. 4 (4). p. 362. [Consultado 14 diciembre 2018]. ISSN 18785352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.07.019>.

<sup>18</sup> OYARO, N, et al. The contents of Pb, Cu, Zn and Cd in meat in Nairobi, Kenya. *Journal of Food Agriculture and Environment*. [en línea]. 2007, July. 5 (3). p. 119-121. [Consultado 14 diciembre 2018]. ISSN 14590255.

<sup>19</sup> PAULINO, A.T, et al. Novel adsorbent based on silkworm chrysalides for removal of heavy metals from wastewaters. *Journal of Colloid and Interface Science*. [en línea]. 2006, September. 301 (2). p. 479-487. [Consultado 15 diciembre 2018]. ISSN 00219797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.05.032>

<sup>20</sup> NASEEM, R y TAHIR, S.S. Removal of Pb(II) from aqueous solution by using bentonite as an adsorbent. *Water Research*. [en línea]. 2001, November. 35 (16). p. 3982-3986. [Consultado 15 diciembre 2018]. ISSN 00431354. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00130-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00130-0).

<sup>21</sup> BORBA, C. E, et al. Removal of nickel(II) ions from aqueous solution by biosorption in a fixed bed column: experimental and theoretical breakthrough curves. *Biochemical Engineering Journal*. [en línea]. 2006, June .30 (2). p. 184-191. [Consultado 15 diciembre 2018]. ISSN 1369703X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2006.04.001>

<sup>22</sup> NAMASIVAYAM, C y DADIRVELU, K. Uptake of mercury (II) from wastewater by activated carbon from unwanted agricultural solid by-product: coirpith. *Carbon*. [en línea]. 1999, January. 37 (1). p. 79-84. [Consultado 15 diciembre 2018]. ISSN 00086223. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(98\)00189-4](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(98)00189-4).

<sup>23</sup> FU, Fenglian y WANG, Qi. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*. [en línea]. 2011, March. 92 (3). p. 407. [Consultado 16 diciembre 2018]. ISSN 03014797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>

<sup>24</sup> KHEZAMI, L y CAPART, R. Removal of chromium (VI) from aqueous solution by activated carbons: kinetic and equilibrium studies. *Journal of Hazardous Materials*. [en línea]. 2005, August. 123 (1-3). p. 223-231. [Consultado 16 diciembre 2018]. ISSN 03043894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.04.012>

**Cuadro 1.** Toxicidad de metales pesados en seres humanos.

<b>Metal pesado</b>	<b>Toxicidad</b>	<b>MCL (mg/L)</b>
Arsénico	Manifestaciones cutáneas, cánceres viscerales, enfermedad vascular.	0,05
Cadmio	Daño renal, trastorno renal, carcinógeno humano	0,01
Cromo	Dolor de cabeza, diarrea, náuseas, vómitos, carcinogénico	0,05
Cobre	Daño hepático, enfermedad de Wilson, insomnio	0,25
Níquel	Dermatitis, náuseas, asma crónica, tos, carcinógeno humano	0,2
Zinc	Depresión, letargo, signos neurológicos y aumento de sed.	0,8
Plomo	Daño al cerebro fetal, enfermedades de los riñones, sistema circulatorio y sistema nervioso.	0,006
Mercurio	Artritis reumatoide y enfermedades de los riñones, sistema circulatorio y sistema nervioso	0,00003

**Fuente:** BABEL, S.y. KURNIAWAN, T.A. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. *Journal of hazardous materials*. [en línea]. 2003, February. 97(1-3): p. 219-243. [Consultado 17 diciembre 2018]. ISSN 03043894. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00263-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00263-7).

Las aguas residuales industriales que contienen metales pesados también contaminan el agua y el suelo, causando alteraciones en plantas, degradación del suelo, disminución en su productividad y cuando se presenta contaminación en exceso puede producir desertificación. En cuanto a ríos y lagos afecta principalmente la fauna<sup>25</sup>.

La contaminación en el suelo por metales pesados influye en la generación, calidad y bienestar de los alimentos, debido a que éstos son tóxicos para las plantas cuando sobrepasan los límites permisibles causan cambios en su metabolismo, medios fisiológicos y bioquímicos que resultan en la acumulación de metales, menor generación de biomasa y reducción en el crecimiento de ésta<sup>26</sup>.(Cuadro 2)

La liberación de aguas residuales con presencia de metales pesados en sistemas acuáticos da lugar a diversos procesos físicos, químicos y biológicos causando disminución en la diversidad y densidad de las poblaciones debido a cambios de

<sup>25</sup> ROMERO LEDEZMA, Karla Pamela. Contaminación por metales pesados. *Revista Científica Ciencia Médica*. [en línea]. 2009. 12 (1). p 45. [Consultado 6 julio 2019]. ISSN 20773323 Disponible en [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1817-74332009000100013&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1817-74332009000100013&lng=es&nrm=iso).

<sup>26</sup> HARSHA, Kilaru; SENTHIL, Ponnusamy y PANDA, Rames. A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids*. [en línea]. 2019, June. p 4. [Consultado 6 julio 2019]. ISSN 01677322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111197>

pH, contenido orgánico del sustrato y tamaño de partículas en el agua<sup>27</sup>. La contaminación con metales a lagos y ríos puede conducir a bioacumulación y biomagnificaciones debido a que no son fácilmente degradables en la naturaleza y se acumulan en los animales y el cuerpo humano hasta alcanzar una cantidad tóxica alta que conduce a efectos indeseables para la salud<sup>28</sup>.

**Cuadro 2.** Toxicidad de metales pesados en medio ambiente.

<b>Metal pesado</b>	<b>Impacto</b>
Plomo	En el suelo instaura una morfología irregular en muchas especies de plantas <sup>29</sup>
Níquel	En los tejidos de las plantas demuestra la incapacidad del equilibrio de nutrientes y da como resultado la dispersión de las capacidades de la membrana celular <sup>30</sup>
Cromo	Conduce a afectar el proceso de fotosíntesis con respecto a la fijación de dióxido de carbono, las actividades de las enzimas, la fotofosforilación y el transporte de electrones <sup>31</sup> .
Mercurio	Problemas fisiológicos en las plantas <sup>32</sup>
Cobre	En las plantas conduce a producir las especies reactivas de oxígeno y el estrés oxidativo <sup>33</sup>
Cadmio	La fitotoxicidad de este afecta el crecimiento de la planta y sus actividades metabólicas <sup>34</sup>

**Fuente:** elaboración propia

## 1.2 CIANURO

Es un compuesto químico que contiene un átomo de carbono y un átomo de nitrógeno, es una molécula de triple enlace con carga negativa. Debido a su capacidad para unir el hierro en la sangre por medio de la formación de complejos puede inhibir la transferencia de oxígeno a las células, provocando asfixia en

<sup>27</sup> *Ibíd.*, p.11

<sup>28</sup> PAUL, Dipak. Research on heavy metal pollution of river Ganga: A review. *Annals of Agrarian Science*. [en línea]. 2017, June. 15 (2). p 278. ISSN 15121887. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2017.04.001>

<sup>29</sup> KUSHWAHA, Anamika, et al. A critical review on speciation, mobilization and toxicity of lead in soil-microbe-plant system and bioremediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. [en línea]. 2018, January. 147. p 1035-1045. [Consultado 6 julio 2019]. ISSN 01476513. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.049>

<sup>30</sup> MÉNDEZ, A, et al. Biochar from pyrolysis of deinking paper sludge and its use in the treatment of a nickel polluted soil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. [en línea]. 2014, May. 107. p 46-52. [Consultado 6 julio 2019]. ISSN 01652370. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.02.001>

<sup>31</sup> HARSHA. *Op. cit.*, p. 14

<sup>32</sup> FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ, Rodolfo, et al. Mercury accumulation and speciation in plants and soils from abandoned cinnabar mines. *Geoderma*. [en línea]. 2015, September. 253-254. p 30-38. [Consultado 6 julio 2019]. ISSN 00167061. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.04.005>

<sup>33</sup> SAĞLAM, Aykut, et al. Chapter 2 - Copper Stress and Responses in Plants. En: *Plant Metal Interaction*. 2016. p 21-40. [En línea]. Elsevier. [Citado el 6 de julio de 2019]. ISBN 9780128031582. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03536-8>

<sup>34</sup> BŘENDOVÁ, Kateřina, et al. Utilization of biochar and activated carbon to reduce Cd, Pb and Zn phytoavailability and phytotoxicity for plants. *Journal of Environmental Management*. [en línea]. 2016, October. 181. p 637-645. ISSN 03014797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.042>

humanos y animales<sup>35</sup>. El cianuro presenta una alta toxicidad, puede causar temblores, problemas neurológicos, pérdida de peso efectos de la tiroides<sup>36</sup>.

El cianuro tiene efectos potenciales para plantas y animales terrestres y de aguas superficiales mediante la descarga en estos, debido a que se liberan iones cianuros los cuales son tóxicos en casi todas sus formas para estas especies<sup>37</sup>

### 1.3 PROCESO GALVÁNICO

La galvanización es un proceso de revestimiento de superficie que se usa para proteger los metales de la corrosión<sup>38</sup>. La galvanotecnia consiste en la deposición de un recubrimiento por electrólisis, es decir, poner una sustancia en un electrodo sumergido y mediante un electrolito pasar corriente eléctrica a través de este. El proceso puede tener lugar en un electrolito acuoso cerca de la temperatura ambiente (llamado galvanotecnia en solución acuosa) o en una sal de metal fundida a altas temperaturas (llamado galvanotecnia de metalización o sal fundida)<sup>39</sup>; este proceso electroquímico se basa en una celda electrolítica formada por lo que se va a recubrir (cátodo) y un ánodo que es una solución acuosa de sales del metal a depositar, al realizar la aplicación de voltaje, los iones metálicos en la solución son atraídos por el cátodo, donde obtienen electrones y se depositan como metal puro en su superficie<sup>40</sup>.

**1.3.1 Pretratamientos de las piezas.** Se debe tener en cuenta las siguientes operaciones antes de realizar el respectivo recubrimiento:

- a) Detersión preliminar: Se aplica a piezas que presentan superficies con grasa y polvo, se realiza con medios mecánicos (con toneles rotativos, etc.) o con medios químicos (solvente)<sup>41</sup>.
- b) Decapage, enjuague y secado: El decapage sirve para quitar las partes oxidadas del metal mediante vía química (inmersión en solución adecuada) o electrolíticamente. El decapado generalmente se realiza con ácido sulfúrico

---

<sup>35</sup> KUYUCAK, Nural y AKCIL, Ata. Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes. *Minerals Engineering*. [en línea]. 2013, September. 50-51, p.14. [Consultado 17 diciembre 2018]. ISSN 08926875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.05.027>

<sup>36</sup> KHODADAD, A, et al. Detoxification of Cyanide in a Gold Processing Plant Tailings Water Using Calcium and Sodium Hypochlorite. *Mine Water and the Environment*. [en línea]. 2008, June. 57 (2), p. 52. [Consultado 18 diciembre 2018]. ISSN 16161068. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10230-008-0042-8>.

<sup>37</sup> RAZANAMAHANDRY, Lovasoa, et al. Bioremediation of soil and water polluted by cyanide: A review. *African Journal of Environmental Science and Technology*. [en línea]. 2017, June. 11 (6). p 279. DOI: 10.5897/ajest2016.2264

<sup>38</sup> OZTURK, F; EVIS, Z y KILIC, S. 3.12 Hot-Dip Galvanizing Process. En: *Comprehensive Materials Finishing*. p. 178. [En línea]. Kidlington, Oxford: Elsevier, 2017 [Citado el 18 de diciembre de 2018].]. ISSN 978-0-12-803249-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09175-X>.

<sup>39</sup> DAVIS, J.R. Op. cit., p. 145

<sup>40</sup> Coating Materials and Methods. En: *ENGINEERING DESIGN HANDBOOK - DESIGN GUIDANCE FOR PRODUCIBILITY: (AMCP 706-100)*. [Anónimo]. p. 1-19. [En línea]. U.S: Army Materiel Command. [Citado el 18 de diciembre de 2018]. Disponible en <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEDHDGPA1/engineering-design-handbook-32/engineering-design-handbook-32>.

<sup>41</sup> MORNELL, Horacio y FERNANDEZ, Luis. *Manual del galvanotécnico Niquelado, cromado y otras electrodeposiciones*. Barcelona, 1953. 30 p.

(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) al 10% y puede realizarse en frío o en caliente a temperatura de 45-50°C, también se puede realizar con soda caustica (NaOH), sulfato de sodio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), este proceso favorece la adhesión natural y químico física del revestimiento<sup>42</sup>.

- c) Levigado y pulido: Generalmente se realiza por vía mecánica o pulido electrolítico<sup>43</sup>.
- d) Desengrasado y enjuague: Se efectúa por vía química (solventes inorgánicos u orgánicos) y por vía electrolítica (procesos catódicos y anódicos); el desengrase previo se realiza comúnmente con kerosene pero ha sido reemplazado en mayor escala por la bencina <sup>44</sup>. Para el desengrase electrolítico se emplean soluciones de soda caustica (NaOH), carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) y cianuro de potasio (KCN).
- e) Neutralización y enjuague: se realiza a través de inmersión a temperatura ambiente; para la neutralización después de tratamientos alcalinos se usan soluciones de ácido sulfúrico diluido (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y para tratamientos ácidos se utilizan soluciones diluidas de álcali o de cianuro de sodio (NaCN) o de potasio (KCN)<sup>45</sup>.
- f) Electrodeposición: Se realiza sobre los objetos colocados como cátodos en los baños galvánicos; se emplean soluciones de álcalis cáusticos, carbonatos alcalinos, fosfatos trisódico, etc.<sup>46</sup>.
- g) Inmersiones, se realizan en soluciones de neutralización (para tratamientos alcalinos se usan soluciones de ácido sulfúrico diluido (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y para tratamientos ácidos se utilizan soluciones diluidas de álcali o de cianuro de sodio (NaCN) o de potasio (KCN)) , barnices protectores (son usados a base de nitrocelulosa o de resinas sintéticas), abrillantado (mediante pulidora dependiendo del requerimiento de la pieza<sup>47</sup>.
- h) Secado<sup>48</sup>.
- i) Tratamientos particulares, corresponde a los revestimientos que se realizan a cada pieza<sup>49</sup>.

---

<sup>42</sup> *Ibíd.*, p. 147.

<sup>43</sup> *Ibíd.*, p. 30.

<sup>44</sup> *Ibíd.*, p. 134-139.

<sup>45</sup> *Ibíd.*, p. 171.

<sup>46</sup> *Ibíd.*, p. 30.

<sup>47</sup> *Ibíd.*, p. 171.

<sup>48</sup> *Ibíd.*, p. 29.

<sup>49</sup> *Ibíd.*, p. 29.

**1.3.2 Recubrimientos metálicos.** Algunos de los recubrimientos metálicos que se pueden realizar son:

**1.3.2.1 Cadmio.** Los revestimientos de cadmio proporcionan protección contra la corrosión galvánica y se usan para la protección de piezas aeronáuticas que presentan aleaciones de acero de alta corrosión atmosférica; debido a que el cadmio es anódico contra el acero el proceso se da de manera satisfactoria. Este es un metal tóxico y un agente carcinogénico que es depositado en un baño acuoso de sales de cianuro<sup>50</sup>. En este proceso se usan baños de cianuro alcalino que se realizan disolviendo óxido de cadmio (CdO) en una solución de cianuro de sodio (NaCN). El hidróxido de sodio (NaOH) y el carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) se forman por reacciones dentro de este baño<sup>51</sup>.

**1.3.2.2 Cobre.** Los recubrimientos de cobre requieren de soluciones acuosas de sulfato de cobre (CuSO<sub>4</sub>) que son la fuente de los iones Cu<sup>2+</sup>, además contienen ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) como electrolito de soporte<sup>52</sup>. Requieren de tres tipos de baño: sulfato de ácido, pirofosfato de cobre y cianuro de cobre (CuCN)<sup>53</sup>. Estos recubrimientos se usan en la fabricación de circuitos impresos, conectores eléctricos, placas decorativas o funcionales en automóviles, electrodomésticos, accesorios de plomería, perillas y diversos productos, además se emplea como capa base para otros recubrimientos metálicos<sup>54</sup>. Las aguas residuales resultantes de los enjuagues de este proceso contienen sales metálicas solubles, como CuSO<sub>4</sub>, ZnSO<sub>4</sub> y NiSO<sub>4</sub><sup>55</sup>,

**1.3.2.3 Cromo duro.** El cromado duro se realiza por electrodeposición a partir de una solución formada por ácido crómico (CrO<sub>3</sub>) y un anión catalítico. El metal así producido es extremadamente duro (850 a 1000 HV) y resistente a la corrosión<sup>56</sup>. Los revestimientos de cromo duro son usados para pistones y cilindros hidráulicos, anillos de pistón, piezas de motores de aviones y moldes de plástico, donde se requieren resistencia al desgaste, abrasión por calor y / o corrosión<sup>57</sup>. El agua

---

<sup>50</sup> AGÜERO, A, et al. Aluminum slurry coatings to replace cadmium for aeronautic applications. *Surface and Coatings Technology*. [en línea]. 2012, December. 213, p. 229-238. [Consultado 18 diciembre 2018]. ISSN 02578972. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.10.052>.

<sup>51</sup> MORROW, Hugh. Cadmium plating. *Metal Finishing*. [en línea]. 2002, January. 100 (1), p. 201. [Consultado 18 diciembre 2018]. ISSN 00260576. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(02\)82021-9](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(02)82021-9)

<sup>52</sup> HAUMESSER, P. Copper Electroplating: from Superconformal to Extreme Fill. En: *Nucleation and Growth of Metals*. p. 71-106. [En línea]. London: ISTE Press - Elsevier, 2016, [Citado el 18 de diciembre de 2018]. ISBN 9781785480928. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-092-8.50004-5>.

<sup>53</sup> YLI-PENTTI, A. Electroplating and Electroless Plating. *Comprehensive*. En: *Materials Processing*. p. 293. [En línea]. Amsterdam: Elsevier, 2014. [Citado el 19 de diciembre de 2018]. ISBN 9780080965338. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00413-1>

<sup>54</sup> *Ibid.*, p. 293.

<sup>55</sup> KUCHAR, D, et al. Sulfidation treatment of copper-containing plating sludge towards copper resource recovery. *Journal of Hazardous Materials*. [en línea]. 2006, November. 138 (1), p. 86. [Consultado 19 diciembre 2018]. ISSN 03043894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.037>

<sup>56</sup> DAVIS, J.R. Process Selection Guide. En: *Surface Hardening of Steels - Understanding the Basics*. p. 7. [En línea]. ASM International, 2002. [Citado el 19 de diciembre de 2018]. ISBN 9781680159530 Disponible en <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSHSUB003/surface-hardening-steels/surface-hardening-steels>.

<sup>57</sup> DAVIS, J.R. *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*. Op. cit., p. 147.

residual resultante en este proceso contiene altas concentraciones de cromo, que pueden estar presentes en forma trivalente o hexavalente<sup>58</sup>.

**1.3.2.4 Níquel.** El níquel es uno de los más empleados para aumentar la resistencia a la corrosión o la conductividad eléctrica. El proceso más utilizado es el níquel de Watts, compuesto por cloruro de níquel ( $\text{NiCl}_2$ ), sulfato de níquel ( $\text{NiSO}_4$ ) y ácido bórico ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) y compuestos orgánicos que se agregan para mejorar las características<sup>59</sup>. Este proceso genera aguas residuales con sales de níquel y aditivos orgánicos que deben ser tratados<sup>60</sup>. Se usa ampliamente para dar resistencia a la corrosión y al desgaste, suele ser usado para aplicar en pistones, paredes de cilindros, pernos de bolas, etc<sup>61</sup>.

**1.3.2.5 Pavonado.** Permite formar una capa de óxido negro en una superficie metálica, generalmente sobre aceros por medio de una sal que provoca la oxidación acelerada; da propiedades anticorrosivas y adherencia<sup>62</sup>. El pavonado se puede realizar de diferentes maneras; electrolíticamente por oxidación anódica con una solución de agua con hiposulfito, por otro lado, químicamente por oxidación alcalina con hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) y nitrato sódico ( $\text{NaNO}_3$ ) o potásico ( $\text{KNO}_3$ ) y mediante baño de sales<sup>63</sup>.

**1.3.2.6 Plata.** Las características de los revestimientos dependen de la composición del baño, de la temperatura y de las condiciones eléctricas. Se realizan con soluciones de cianuro de plata; generalmente en piezas de cobre, latón, estaño, alpaca y otras aleaciones<sup>64</sup>. El baño de plata contiene sal de cianuro de plata, cianuro alcalino, carbonato alcalino e hidróxido alcalino. Este revestimiento es usado para aplicaciones decorativas, ingeniería electrónica, industria de semiconductores y partes de máquinas como superficie de apoyo<sup>65</sup>.

---

<sup>58</sup> TENÓTIO, J.A y ESPINOSA, D.C. Treatment of chromium plating process effluents with ion exchange resins. Waste Management. [en línea]. 2001. 21 (7). p. 637. [Consultado 19 diciembre 2018]. ISSN 0956053X. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00118-5](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00118-5)

<sup>59</sup> SCHARIO, Mark. Troubleshooting decorative nickel plating solutions (Part II of III installments): The deposition of two layers of nickel on a given substrate has its advantages. However, caution must be taken to ensure adequate adhesion and finish performance. Metal Finishing. [en línea]. 2007, May. 105 (5). p. 41-44. [Consultado 19 diciembre 2018]. ISSN 00260576. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(07\)80550-2](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(07)80550-2)

<sup>60</sup> BENVENUTI, T, et al. Closing the loop in the electroplating industry by electro dialysis. Journal of Cleaner Production. [en línea]. 2017, July. 155 (1). p.130. [Consultado 19 diciembre 2018]. ISSN 09596526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.139>

<sup>61</sup> DAVIS, J.R. Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance. Op. cit., p. 147

<sup>62</sup> MONTIEL, Adriana. Estudio de la aplicación de tratamientos de conversión de pavonado sellado con cerio sobre acero de refuerzo embebido en concreto como protección anticorrosiva. [en línea]. Trabajo de grado Maestro en Tecnología Avanzada. Instituto Politécnico nacional, centro de investigación en ciencia aplicada y tecnología avanzada unidad Altamira, 2014. [Consultado 11 septiembre 2018]. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/13305/TESIS%20A14-MONTIEL%20GARCIA%20ADRIANA.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.

<sup>63</sup> MANTILLA, Fanny y MARTÍNEZ, María. Propuesta para el manejo de los residuos generados en los procesos de zincado, pavonado y fosfatizado de la empresa Ingezinc Ltda. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2009. p 35.

<sup>64</sup> MORNELL, Op. cit., p 271-272.

<sup>65</sup> YLI-PENTTI, A, Op. cit., p. 294.

**1.3.2.7 Anodizado.** Es un acabado obtenido por medio de una oxidación anódica, generalmente se usa aluminio como material anodizado<sup>66</sup>. Para este proceso se usan electrolitos de ácido sulfúrico, crómico, fosfórico u oxálico<sup>67</sup>, los más comunes están formados por ácido sulfúrico, ya que pueden ser empleados para dar protección o con fines decorativos con espesores de 4 a 30  $\mu\text{m}$ <sup>68</sup>.

**1.3.2.8 Brush plating.** El proceso también se conoce como chapado selectivo o chapado de contacto, ya que, en lugar de sumergir la pieza de trabajo en una solución de recubrimiento, se aplica mediante una herramienta recubierta de un material absorbente que está saturado de la solución de recubrimiento. La herramienta generalmente está hecha de grafito y tiene un mango aislado<sup>69</sup>. La mayoría de los metales se pueden depositar mediante esta técnica generalmente en acero o aleaciones de cobre como sustratos. Los metales más comúnmente depositados son níquel, cromo, estaño, cobre, zinc, cadmio, oro y plata. El brush plating se utiliza principalmente en montajes costosos en los que el desmontaje es demasiado caro o impracticable. También se puede emplear para la construcción de piezas desgastadas y para la reparación de defectos locales en circuitos impresos<sup>70</sup>.

## 1.4 MUESTREO DE AGUA

Para llevar a cabo un análisis de agua residual, inicialmente se debe tener en cuenta un protocolo para la toma de muestras, estos se pueden encontrar en el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia), éste se basa en materiales necesarios para cada tipo de muestra, equipos requeridos, tipo de muestreo teniendo en cuenta el caudal de efluente, conservación de muestras y parámetros a analizar<sup>71</sup> y además en las normas NTC-ISO 5667 de gestión ambiental calidad de agua dentro de la cual se contempla la NTC-ISO 5667/1 que especifica las directrices para el diseño de programas de muestreo, la NTC-ISO 5667/2 que presenta técnicas generales de muestreo, NTC-ISO 5667/3

---

<sup>66</sup> GUASTALLI, Andrea. Estudio sobre la aplicación de la tecnología de membranas para la reducción del ácido fosfórico de las aguas de lavado en el proceso de anodizado del aluminio. [en línea] Tesis Doctoral, Barcelona: Universidad de Barcelona. Facultad de Química. Departamento de Ingeniería Química, 2006. p 1. [Consultado 11 septiembre 2018]. Disponible en: [https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/69956/GUASTALLI\\_TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/69956/GUASTALLI_TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

<sup>67</sup> GRUBBS, C. A. Anodizing of Aluminum. Metal Finishing. [en línea]. 2007. 105(10). p. 397-412. [Consultado 19 diciembre 2018]. ISSN 00260576. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(07\)80359-X](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(07)80359-X)

<sup>68</sup> GUASTALLI, Op. cit., p.3.

<sup>69</sup> DAVIS, J.R. Handbook of Thermal Spray Technology. ASM International [En línea]. ASM International, 2004. [Citado el 11 de septiembre de 2018]. ISBN 9781615032624. Disponible en: [https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpHTST0006/viewerType:toc//root\\_slug:handbook-thermal-spray/url\\_slug:handbook-thermal-spray](https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpHTST0006/viewerType:toc//root_slug:handbook-thermal-spray/url_slug:handbook-thermal-spray).

<sup>70</sup> SHREIE, L.L.; JARMAN, R.A y BURSTEIN, G.T. Protection by Metallic Coating. Corrosion. p 111. [En línea]. 3ª. ed. Elsevier, 1994. [Citado el 11 de septiembre de 2018]. ISBN 9780080523514. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCEV00003/corrosion-3rd-edition/corrosion-3rd-edition>.

<sup>71</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Instructivo Para la Toma de Muestras De Aguas Residuales. Toma de muestras de aguas residuales. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: [http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma\\_Muestras\\_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428](http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428)

donde se muestra la preservación y manejo de muestras<sup>72</sup> y la NTC-ISO 5667/10 para muestreo de aguas residuales<sup>73</sup>

**1.4.1 Métodos de aforo de caudales.** Para la determinación de caudal el IDEAM, establece métodos de aforo teniendo en cuenta el tipo de afluente, como lo son el método volumétrico mediante una caneca o balde y cronómetro que se emplea para canales abiertos o tubería con caída de agua; el método del vertedero que se realiza en industrias teniendo en cuenta condiciones físicas iniciales del efluente; el método de canales abiertos que se lleva a cabo en ríos, quebradas o canales; el método con flotadores<sup>74</sup>; el método molinete; el método con colorantes, fluorescentes, o trazadores químicos radioactivos<sup>75</sup>.

**1.4.2 Tipos de muestra.** Existen tres tipos de muestra:

**1.4.2.1 Muestra instantánea.** En esta se realiza caracterización de la muestra en el momento de recogerla, se debe realizar solo cuando el agua presenta propiedades constantes y las descargas son intermitentes<sup>76</sup>.

**1.4.2.2 Muestra integrada.** Es aquella en la que se compone de diferentes muestras recogidas en diversos sitios del efluente en el mismo tiempo<sup>77</sup>.

**1.4.2.3 Muestra compuesta.** Se compone de varias muestras que se recolecta en un tiempo o caudal similar, se realiza cuando el efluente no cuenta con características constantes<sup>78</sup>. Estas estas conformadas por muestras compuestas medida por el tiempo y muestras compuestas medidas por flujo; las primeras se caracterizan por ser aquellas en las que se realiza una muestra puntual de igual volumen, con intervalos constantes de tiempo; mientras que las muestras compuestas medidas por flujo son aquellas que se toman a intervalos constantes pero volúmenes de muestra variables<sup>79</sup>.

---

<sup>72</sup>OJEDA, Luis. Técnicas De Muestreo de Aguas Recolección, manejo y preservación de muestras. En: Hanna Instruments. [sitio web]. [Consulta 8 julio 2019]. Archivo pdf. Disponible en: [http://cdn.hannachile.com/hannacdn/marketing/capacitacion/2015/12/Tecnicas\\_de\\_muestreo\\_de\\_aguas\\_en\\_terrenos.pdf](http://cdn.hannachile.com/hannacdn/marketing/capacitacion/2015/12/Tecnicas_de_muestreo_de_aguas_en_terrenos.pdf)

<sup>73</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Gestión ambiental calidad de agua. NTC-ISO 5667-10. Bogotá, D.C. ICONTEC.

<sup>74</sup> *Ibíd.*, p 7.

<sup>75</sup> DÍAZ FRANKY, María Carolina. Capítulo 4. Estimación y medición de caudales de aguas residuales. En: ACADEMIA.EDU. [sitio web]. ACADEMIA.EDU. [Consulta 11 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: [https://www.academia.edu/24271087/UNIVERSIDAD\\_NACIONAL\\_ABIERTA\\_Y\\_A\\_DISTANCIA\\_UNAD\\_Cap%C3%ADtulo\\_4\\_Estimaci%C3%B3n\\_y\\_medic%C3%B3n\\_de\\_caudales\\_de\\_aguas\\_residuales](https://www.academia.edu/24271087/UNIVERSIDAD_NACIONAL_ABIERTA_Y_A_DISTANCIA_UNAD_Cap%C3%ADtulo_4_Estimaci%C3%B3n_y_medic%C3%B3n_de_caudales_de_aguas_residuales)

<sup>76</sup> RAMÍREZ, Carlos. Capítulo 7 Monitoreo calidad de agua. En: Calidad Del Agua: Evaluación y Diagnóstico. p. 219. [En línea]. Colombia: Universidad de Medellín. 2011. [Citado el 11 de septiembre de 2018]. ISBN 9789588692067. Disponible en: [https://www.academia.edu/9511155/Calidad\\_del\\_agua\\_evaluaci%C3%B3n\\_y\\_diagn%C3%B3stico](https://www.academia.edu/9511155/Calidad_del_agua_evaluaci%C3%B3n_y_diagn%C3%B3stico).

<sup>77</sup> *Ibíd.*, p. 221.

<sup>78</sup> *Ibíd.*, p. 220.

<sup>79</sup> RAMÍREZ, Lina y ZORRILLA, Jorge. Ingeniería Básica para el tratamiento de los vertimientos del proceso de Zincado en ASTECNICA LTDA. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2010. p 48.

### 1.4.3 Tipos de Muestreo. Existen dos tipos de muestreo:

**1.4.3.1 Muestreo manual.** Este se lleva a cabo cuando se tiene acceso de manera fácil al efluente, el personal encargado debe identificar características fisicoquímicas in-situ como olor y color<sup>80</sup>.

**1.4.3.2 Muestreo automático.** Se realiza cuando no se tiene un acceso fácil a la fuente vertimiento, además de que se cuenta con un equipo de muestreo automático, haciendo que se reduzca la mano de obra humana, sin embargo, se requiere de controles continuos y constantes<sup>81</sup>.

## 1.5 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DEL AGUA

Algunos de los parámetros fisicoquímicos a determinar en las muestras de aguas, para comprobar la calidad de estas y que logren cumplir con los parámetros de vertimiento según la resolución 0631 de 2015, son los que se muestran a continuación:

- Demanda Química de Oxígeno DQO, método de reflujo cerrado y volumetría ( $\text{mgO}_2/\text{L}$ ); sirve para determinar la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica y oxidable en la muestra de agua, teniendo en cuenta un agente oxidante, temperatura y tiempo<sup>82</sup>.
- Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 días  $\text{DBO}_5$ , método de incubación de 5 días-modificación azida ( $\text{mgO}_2/\text{L}$ ); se emplea para determinar la concentración de materia orgánica a través de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos para la degradación de sustancias orgánicas contenidas en la muestra durante incubación de 5 días<sup>83</sup>.
- Determinación de grasas y aceites, método de extracción Soxhlet (ppm); Se determinan lípidos biológicos, hidrocarburos y niveles de grasas no volátiles; en este procedimiento no se mide una cantidad absoluta de una sustancia específica si no se determinan grupos en sustancias con características físicas similares con base en su solubilidad en el solvente, puede incluir compuestos

---

<sup>80</sup> TRIANA NOVOA, María de Pilar. Capítulo 3. Muestreo de Aguas. En: ACADEMIA. EDU. [sitio web]. ACADEMIA. EDU. [Consulta 11 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: [https://www.academia.edu/15697855/UNIVERSIDAD\\_NACIONAL\\_ABIERTA\\_Y\\_A\\_DISTANCIA\\_UNIVERSIDAD\\_NACIONAL\\_ABIERTA\\_Y\\_A\\_DISTANCIA\\_UNAD](https://www.academia.edu/15697855/UNIVERSIDAD_NACIONAL_ABIERTA_Y_A_DISTANCIA_UNIVERSIDAD_NACIONAL_ABIERTA_Y_A_DISTANCIA_UNAD)

<sup>81</sup> *Ibíd.*, p. 147.

<sup>82</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Demanda Química de Oxígeno por Reflujo cerrado y volumetría. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>

<sup>83</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Demanda Bioquímica de Oxígeno - 5 días en aguas. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Bioqu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/ca6e1594-4217-4aa3-9627-d60e5c077dfa>

azufrados, clorofila o colorantes orgánicos que no se volatilizan durante el mismo<sup>84</sup>.

- pH por electrometría, se determina para expresar la condición acida o alcalina de la muestra, consiste en una forma de expresar la concentración de ion hidrógeno, es decir la actividad del ion hidrógeno<sup>85</sup>.
- Turbiedad por nefelometría (NTU), se basa en el grado de tratamiento necesario a implementar en la fuente de agua cruda, su tasa de filtración más adecuada y establecer la efectividad en los procesos de coagulación, sedimentación y filtración. Esta indica la cantidad de materia suspendida y coloidal, materia orgánica e inorgánica e incluso microorganismos microscópicos<sup>86</sup>.
- Conductividad, método electrométrico ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ); se basa en la propiedad que tiene la muestra de agua, para conducir corriente eléctrica; esta es dependiente de la presencia de iones, concentración, valencia, movilidad y temperatura de la medición. Al presentarse una variación de la misma, proporciona información de la descomposición de materia orgánica<sup>87</sup>.
- Sólidos Sedimentables, método de sedimentación (ppm); se consideran partículas grandes (mayores a 0,01 mm) que sedimentan rápido<sup>88</sup>.
- Sólidos Suspendidos totales secados a 103°C – 105°C (ppm), por gravimetría; se consideran partículas que son transportados mediante el arrastre y soporte del movimiento del agua; se pueden presentar tres tipos de sólidos no sedimentables como suspendidos, coloidales y disueltos; si estas son partículas pequeñas (menos de 0,01 mm) son aquellas que no sedimentan rápido<sup>89</sup>.

---

<sup>84</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Determinación de grasas y aceites en aguas por el método soxhlet. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Grasas+y+Aceites+en+agua+por+m%C3%A9todo+Soxhlet..pdf/15096580-8833-415f-80dd-ceaa7888123d>

<sup>85</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. pH en aguas por electrometría. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/pH+en+agua+por+Electrometr%C3%ADa.pdf/ec53b64e-91eb-44c1-befe-41fcfccdff1>

<sup>86</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Turbiedad por Nefelometría en el quipo Turbiquant 3000 T. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Turbiedad+por+Nefelometr%C3%ADa..pdf/fc92342e-8bba-4098-9310-56461c6a6dbc>.

<sup>87</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Conductividad Eléctrica por el Método Electrométrico en Aguas. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Conductividad+El%C3%A9ctrica.pdf/f25e2275-39b2-4381-8a35-97c23d7e8af4>.

<sup>88</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Sólidos Suspendidos Totales En Agua Secados A 103 – 105 °C. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Suspendidos+Totales+en+aguas.pdf/f02b4c7f-5b8b-4b0a-803a-1958aac1179c>.

<sup>89</sup> *Ibíd.*, p. 2.

## 1.6 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Los tratamientos de aguas residuales pueden clasificarse según los contaminantes que tengan presentes como primario, secundario, terciario; también según la técnica a emplear de la siguiente manera física, química, biológica<sup>90</sup>.

**1.6.1 Pre-tratamiento.** Se fundamenta en la eliminación de materia en suspensión la cual suele realizarse mediante operaciones mecánicas; esta materia en suspensión puede ser de diversa índole como partículas de varios centímetros y densas (normalmente inorgánica), o incluso coloides con partículas de nanómetros (normalmente naturaleza orgánica). Dentro de las operaciones unitarias más empleadas se encuentran, desbaste, cribado, homogenización y neutralización<sup>91</sup>.

**1.6.2 Tratamiento primario.** Es aquel en el que mediante separación física<sup>92</sup> se eliminan sustancias del agua como sólidos suspendidos, grasas, arenas y espumas, mediante métodos como la sedimentación, flotación, tamización, neutralización, entre otros<sup>93</sup>.

**1.6.3 Tratamiento secundario.** Consiste en aquellos tratamientos biológicos aerobios como anaerobios<sup>94</sup>, se basa en reducir las cantidades de sustancias como materia orgánica, para de esta manera reducir la concentración de demanda bioquímica de oxígeno (DBO)<sup>95</sup>, mediante procesos como lodos activados, filtro de goteo, filtros biológicos, lagunaje con aireación, entre otros<sup>96</sup>.

---

<sup>90</sup> FRANCO, Op. cit., p. 22.

<sup>91</sup> MARTÍNEZ, Adriana. Propuesta para el mejoramiento del tratamiento de aguas residuales en ABS CROMOSOL LTDA. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2010. p 25-26.

<sup>92</sup> RAMÍREZ, Lina, Op. cit., p 41.

<sup>93</sup> MANAHAN, Stanley. Introducción a la Química Ambiental. [En línea] México: Reverté, 2006. [Citado el 11 de septiembre de 2018]. ISBN 968670860X. Disponible en: [https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpHTST0006/viewerType:toc//root\\_slug:handbook-thermal-spray/url\\_slug:handbook-thermal-spray](https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpHTST0006/viewerType:toc//root_slug:handbook-thermal-spray/url_slug:handbook-thermal-spray). p. 209.

<sup>94</sup> RAMÍREZ, Lina, Op. cit., p 43.

<sup>95</sup> FRAUME, Néstor; TORRES, Alberto y RAMÍREZ, Marcela. Abecedario Ecológico: La Más Completa Guía De Términos Ambientales. [En línea]. Bogotá: Editorial San Pablo, 2006. [Citado el 15 de septiembre de 2018]. ISBN 958823333X. Disponible en: [https://books.google.com.co/books?id=rrGMx\\_DpbfAC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=rrGMx_DpbfAC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false).

<sup>96</sup> RAMALHO, Rubens; BELTRAN, Domingo y DE LORA, Federico. Tratamiento De Aguas Residuales. p. 9. [En línea] España: Reverté, 1990. [Citado el 15 de septiembre de 2018]. ISBN 8429179755. Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=30etGjzPXyWC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>.

**1.6.4 Tratamiento terciario.** También conocido como tratamiento avanzado<sup>97</sup>, este es el encargado de eliminar contaminantes que en los anteriores tratamientos no lograron removerse, como compuestos orgánicos e inorgánicos y sólidos suspendidos<sup>98</sup>, minerales disueltos y microorganismos<sup>99</sup>; para ello se llevan a cabo procesos como osmosis inversa, intercambio iónico, adsorción, sedimentación, precipitación química, filtración, entre otros<sup>100</sup>.

**1.6.5 Tratamiento físico.** Son aquellos tratamientos en los cuales no se genera un nuevo producto, solamente retiene contaminantes, como adsorción, filtración, sedimentación, aireación, entre otros<sup>101</sup>.

**1.6.6 Tratamiento químico.** Son aquellos tratamientos en los que sí se generan sustancias nuevas o diferentes, como oxido-reducción, coagulación, desinfección, entre otros<sup>102</sup>.

**1.6.7 Tratamiento biológico.** Son procesos en los que se hace uso de organismos vivos con el fin de obtener un cambio químico, como digestión anaerobia y aerobia, entre otros<sup>103</sup>.

## 1.7 TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

**1.7.1 Precipitación Química.** La precipitación se basa en el principio de solubilidad de iones y compuestos presentes en el agua, por ejemplo, para los metales, esta es función de la presión, temperatura, tiempo de agitación y pH; por tanto, a bajas presiones y altas temperaturas la solubilidad será mayor, además de tener en cuenta que el tiempo de agitación debe ser suficiente para garantizar que se formen los compuestos insolubles, asimismo de seleccionar un pH que favorezca la precipitación de estos<sup>104</sup>. Es por esto que este proceso es utilizado en vertimientos de industrias galvánicas para separar metales suspendidos en el agua<sup>105</sup>.

Consiste en ajustar el pH del efluente con el fin de que los iones metálicos disueltos se conviertan en la fase sólida insoluble a través de una reacción con el agente

---

<sup>97</sup>RAMÍREZ, Lina, Op. cit., p 44.

<sup>98</sup>MANAHAN, Op. cit., p. 214.

<sup>99</sup>MARTÍNEZ, Op. cit., p 30.

<sup>100</sup>RAMALHO, Op. cit., p. 9.

<sup>101</sup>ARELLANO, Javier. Introducción a la Ingeniería Ambiental. p. 32 [En línea]. Mexico: Alfaomega, 2002. [Citado el 15 de septiembre de 2018]. ISBN 9789701507834. Disponible en: <https://es.slideshare.net/vladyvostok/introduccion-a-la-ingenier>.

<sup>102</sup>Ibíd., p 33.

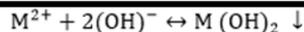
<sup>103</sup>Ibíd., p 33.

<sup>104</sup>CORREDOR, Op. cit., p 24.

<sup>105</sup>Ibíd., p 24.

precipitante donde  $M^{2+}$  y  $OH^-$ , representa los iones metálicos disueltos y el precipitante respectivamente<sup>106</sup>, de manera cómo se observa en la Reacción 1

### Reacción 1. Precipitación Química.



**Fuente:** WANG, L.K, et al. Chemical precipitation. En: Physicochemical Treatment Processes. p. 141-198. [En línea]. New Jersey: Human Press, 2004 (3). [Citado el 19 de diciembre de 2018]. ISBN 9781592598205. DOI: <https://doi.org/10.1385/1-59259-820-x:141>

Los productos químicos reaccionan con los iones de metales pesados presentes en el agua para formar precipitados insolubles. Los precipitados de formación se pueden separar del agua por sedimentación o filtración. Estos procesos incluyen precipitación con hidróxido y precipitación con sulfuro<sup>107</sup>. Los precipitantes inorgánicos comunes utilizados son la cal ( $Ca(OH)_2$ ), la sosa cáustica ( $NaOH$ ), la ceniza de sosa ( $Na_2CO_3$ ), el bicarbonato de sodio ( $Na(HCO_3)_2$ ), el sulfuro de sodio ( $Na_2S$ ) e hidrosulfuro de sodio ( $NaHS$ )<sup>108</sup>.

La precipitación más usada es con hidróxido ya que implica simplicidad, bajo costo y facilidad para controlar el pH<sup>109</sup>, aunque es utilizado ampliamente, presenta limitaciones como la generación de volúmenes de lodos de densidad relativamente baja que presentan problemas de deshidratación y eliminación<sup>110</sup>. La precipitación de sulfuro es eficaz para el tratamiento de iones metálicos pesados, además las solubilidades de los precipitados de sulfuros metálicos son más bajas que los precipitados de hidróxido, por otro lado, estos primeros no son anfóteros por lo tanto se logra un alto grado de eliminación de metal en un amplio rango de pH; los lodos generados a partir de esta presentan mejores características de espesamiento y deshidratación<sup>111</sup>.

Cuando se tiene cromo hexavalente presente en el agua a tratar se debe reducir debido a que este es soluble a diferentes rangos de pH, por tal razón, primero se trata el cromo hexavalente con soluciones de sulfito, como el bisulfito de sodio en

<sup>106</sup> WANG, L.K, et al. Chemical precipitation. En: Physicochemical Treatment Processes. p. 141-198. [En línea]. New Jersey: Human Press, 2004 (3). [Citado el 19 de diciembre de 2018]. ISBN 9781592598205. DOI: <https://doi.org/10.1385/1-59259-820-x:141>

<sup>107</sup> FU, Fenglian, Op. cit., p 408

<sup>108</sup> CHEN, Quanyuan, et al. Comparison of heavy metal removals from aqueous solutions by chemical precipitation and characteristics of precipitates. Journal of Water Process Engineering. [en línea]. 2018, December.26. p. 289. [Consultado 20 diciembre 2018]. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.11.003.

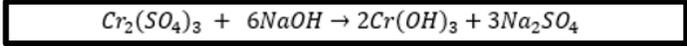
<sup>109</sup> HUISMAN, J.L; SCHOUTEN, G y SCHULTZ, C. Biologically produced sulphide for purification of process streams, effluent treatment and recovery of metals in the metal and mining industry. Hydrometallurgy. [en línea]. 2006, September. 83 (1-4). p.106. [Consultado 20 diciembre 2018]. ISSN 0304386X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.017>

<sup>110</sup> KONGSRICHAROERN, N y POLPRASERT, C. Electrochemical precipitation of chromium ( $Cr^{6+}$ ) from an electroplating wastewater. Water Science and Technology. [en línea]. 1995. 31 (9), p.109-117. [Consultado 20 diciembre 2018]. ISSN 02731223. DOI: [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00412-G](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00412-G).

<sup>111</sup> FU, Fenglian, Op. cit., p 408

medio ácido, entre pH de 2 a 3<sup>112</sup>. Después de esto el cromo trivalente en un pH aproximado de 8 a 9 precipita según la Reacción 2.

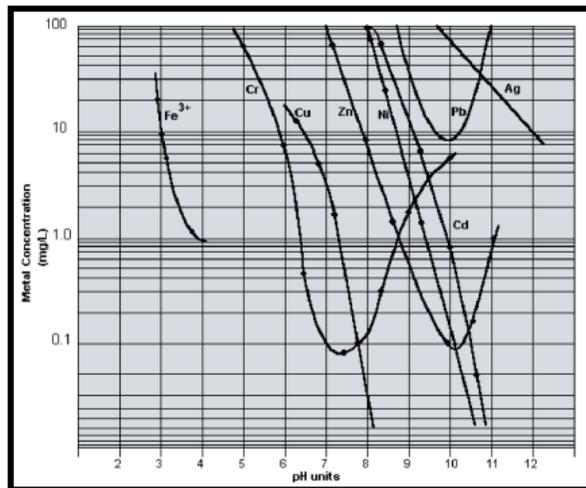
### Reacción 2. Precipitación cromo trivalente.



**Fuente:** CORREDOR, Héctor y DIAZ, Elkin. Alternativa para la disminución de metales pesados en los efluentes de proceso de la Industria Galvánica Galvanotecnica. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2011. p. 24.

Genera lodo residual de sales metálicas que son difícilmente separables, estas se generan debido a la precipitación de los metales en hidróxidos, los cuales precipitan a rangos diferentes de pH, teniendo en cuenta la solubilidad de los mismos<sup>113</sup>, tal como se observa en la Figura 1.

**Figura 1.** Solubilidad de metales en función del pH.



**Fuente:** Revisión Bibliográfica. [Anónimo]. p. 24. En: UNIVERSIDAD DE LAS AMERICAS PUEBLA. [sitio web]. UDLAP. [Consulta 15 diciembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/doc\\_umentos/leia/padilla\\_s\\_mf/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/doc_umentos/leia/padilla_s_mf/capitulo2.pdf)

<sup>112</sup>CORREDOR, Op. cit., p 24.

<sup>113</sup> Ibid., p 24.

Como se puede observar en la Figura 1 la solubilidad de los metales es dependiente del pH y de la concentración que cada metal presente, presentando los siguientes rangos de pH: para hierro (III) de 3 a 4; cromo es soluble en soluciones acidas entre 5-7 y básicas entre 8-10 y presenta la solubilidad mínima en 7,5; cobre 6-8; zinc condiciones alcalinas desde 7 a 11 presentando la solubilidad mínima en 10; níquel de 8 a 10,5; cadmio entre 8-11, plomo entre 9 y 11 con solubilidad mínima de 10 y plata entre 10 y 12. Es importante resaltar que no es conveniente llevar el pH a los puntos más altos ya que la solubilidad aumenta causando que sea difícil su precipitación.

**1.7.2 Coagulación.** La coagulación se obtiene al agregar un reactivo químico (coagulante) en el agua, el cual debido a reacciones químicas genera productos insolubles al estar en contacto con las impurezas del agua, permitiendo así la precipitación de los mismos<sup>114</sup>.

Es la pérdida de estabilidad de sistemas dispersos que conducen a la separación de fases por medio de la sedimentación<sup>115</sup>. Consiste en la desestabilización de los coloides al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados al agregar coagulantes; algunos de los coagulantes usados son aluminio, sulfato ferroso, cloruro férrico y cloruro de polialuminio (PAC)<sup>116</sup>.

Los coagulantes permiten la aglomeración de partículas reduciendo las cargas de la superficie de partículas electrostáticas en la región de pH ácido de manera prominente donde existen las especies de metales hidrolizados<sup>117</sup>. La efectividad de este método depende de varios factores como el agente de coagulación usado, la cantidad de este, el pH de la solución, la concentración y la naturaleza del compuesto orgánico presente en el agua<sup>118</sup>.

**1.7.3 Floculación.** La floculación implica la formación de puentes químicos entre las impurezas presentes, de manera que se forma una malla de coágulos, esta sería tridimensional y porosa; por tanto, el floc se forma con la agrupación de varias partículas coaguladas, de modo que sea suficientemente pesado y grande para sedimentar<sup>119</sup>.

---

<sup>114</sup> CORREDOR, Op. cit., p 23.

<sup>115</sup> SILLANPÄÄ, Mika y SHESTAKOVA, Marina. Chapter 2- Electrochemical Water Treatment Methods. En: Electrochemical Water Treatment Methods: Fundamentals, Methods and Full Scale Applications. p. 74. [En línea]. Finland: Butterworth-Heinemann. [Citado el 20 de diciembre de 2018]. ISBN 9780128114629. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811462-9.00002-5>

<sup>116</sup> FU, Fenglian, Op. cit., p 413

<sup>117</sup> SANTO, C.E, et al. Optimization of coagulation–floculation and flotation parameters for the treatment of a petroleum refinery effluent from a Portuguese plant. The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal. [en línea]. 2012, February. 183 (15). p. 117-123. [Consultado 20 diciembre 2018]. ISSN 13858947. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.12.041>

<sup>118</sup> DOMINGUEZ, J.R, et al. Aluminium sulfate as coagulant for highly polluted cork processing wastewaters: removal of organic matter. Journal of Hazardous Materials. [en línea]. 2007, September. 148 (1-2). p. 15-21. [Consultado 20 diciembre 2018]. ISSN 03043894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.003>

<sup>119</sup> CORREDOR, Op. cit., p 23.

La acción de los polímeros permite formar puentes entre los flóculos y aglomerar las partículas para posteriormente eliminar o separarlas por filtración o flotación. Algunos floculantes son: el PAC, el sulfato poliferrico (PFS) y la poliacrilamida (PAM); sin embargo, estos no son eficientes para eliminar los metales pesados de aguas residuales<sup>120</sup>.

El floculante permite la adsorción de partículas coloidales desestabilizadas que se extienden a la solución para unir otras partículas<sup>121</sup>. La efectividad de este proceso depende de las condiciones físico-químicas, debido a que los flóculos formados a un pH y una dosis más baja son más densos y menos porosos que los formados a un pH y una dosis más alta<sup>122</sup>.

**1.7.4 Oxidación- reducción.** Este proceso consiste en la adición de una sustancia que actúa como agente oxidante o reductor, se emplean para eliminar un compuesto del agua residual por cambio de fase. Uno de los procesos más empleados en el tratamiento de aguas residuales con metales pesados es la reducción de cromo hexavalente a cromo trivalente. Se hace uso de agentes reductores como el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y sus sales, bisulfito sódico (NaHSO<sub>3</sub>)<sup>123</sup>.

Para oxidar el cianuro a cianato se usa peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) en presencia de un metal de transición como catalizador<sup>124</sup>, se emplea principalmente para niveles bajos y moderados de cianuro; el peróxido de hidrógeno reacciona con el cianuro y forma cianato y agua<sup>125</sup>.

---

<sup>120</sup> FU, Fenglian, Op. cit., p 413

<sup>121</sup> HOGG, R. Collision efficiency factors for polymer flocculation. Journal of Colloid and Interface Science. [en línea]. 1984, November. 102 (1). p. 232-236. [Consultado 20 diciembre 2018]. ISSN 00219797. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(84\)90215-7](https://doi.org/10.1016/0021-9797(84)90215-7).

<sup>122</sup> GUIGUI, C, et al. Impact of coagulation conditions on the in-line coagulation/UF process for drinking water production. Desalination. [en línea]. 2002, September. 147 (1-3). p. 95-100. [Consultado 20 diciembre 2018]. ISSN 00119164. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00582-9](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00582-9)

<sup>123</sup> IZQUIERDO, Marta. Eliminación de metales pesados en aguas mediante bioadsorción. Evaluación de materiales y modelación del proceso. [en línea]. Trabajo de grado Doctorado. España: Universitat De València. Departamento de Ingeniería Química, 2010. p.28. [Consultado 20 diciembre 2018]. Disponible en: <http://roderic.uv.es/bitstream/handle/10550/23403/izquierdo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

<sup>124</sup> KUYUCAK, Op. cit., p 21.

<sup>125</sup> BOTZ, M; MUDDER, T y AKCIL, A. Chapter 35. Cyanide Treatment: Physical, Chemical, and Biological Processes. En: Gold Ore Processing. 2ª edición. 2016. p. 626. [En línea]. Amsterdam: Elsevier Science. [Citado el 19 de diciembre de 2018]. ISBN 9780444636584. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780444636584/gold-ore-processing>

**1.7.5 Cloración alcalina.** Es un método basado en la oxidación química, es común el uso de cloraciones alcalinas para oxidar cianuro libre y cianuros metálicos en condiciones adecuadas de operación. El cloro se puede usar en su forma elemental, hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) o hipoclorito de calcio ( $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ) como oxidante. La reacción de destrucción del cianuro es de dos pasos, el primer paso en el que el cianuro se oxida en cloruro de cianógeno ( $\text{CNCl}$ ) y el segundo paso en el que el cloruro de cianógeno se hidroliza para producir cianato<sup>126</sup>.

El  $\text{Cl}_2$  utilizado en el proceso puede estar en una solución 12,5% de hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) o como una solución de hipoclorito de calcio ( $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ )<sup>127</sup>, se usa principalmente para tratar niveles de cianuros bajos y altos<sup>128</sup>. Los rendimientos de las reacciones de oxidación de cianuros y cianatos en aguas residual con presencia de estos contaminantes presentan remociones del 99%<sup>129</sup>.

**1.7.6 Intercambio iónico.** Es un método empleado para la recuperación de metales, debido a que es capaz de atrapar iones metálicos en efluentes y de esta misma manera impedir su descarga<sup>130</sup>. En este proceso se produce un intercambio reversible de iones entre las fases sólida y líquida, donde la resina elimina los iones de una solución electrolítica y libera otros iones de carga similar sin ningún cambio estructural de la resina<sup>131</sup>.

Las resinas son sustancias capaces de cambiar iones encontrados en su estructura con otros iones de una solución, en relación estequiométrica<sup>132</sup>; estas pueden ser sintéticas o naturales, tiene la capacidad para intercambiar sus cationes con los metales en las aguas residuales. Las resinas sintéticas se prefieren generalmente debido a su efectividad para eliminar los metales pesados de la solución<sup>133</sup>.

Los intercambiadores de cationes más comunes son resinas ácidas con ácido sulfónico y ácido carboxílico. A medida que la solución que contiene metales pesados atraviesa la columna de cationes, los iones metálicos se intercambian por los iones de hidrógeno en la resina<sup>134</sup>. El intercambio iónico depende de variables

---

<sup>126</sup> TUNAY, Olcay, et al. Chapter 4: Metal finishing industry. En: Chemical Oxidation Applications for Industrial Wastewaters. IWA Publishing. 2010. p 122. [En línea]. London: IWA Publishing. [Citado el 27 de diciembre de 2018]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCOAIW001/chemical-oxidation-applications/chemical-oxidation-applications>.

<sup>127</sup> BOTZ, Michael. Overview of cyanide treatment methods. Elbow Creek Engineering, Inc. 2003, p. 5. En: Elbow Creek Engineering, Inc. [sitio web]. Estados Unidos: BOTZ. [Consultado 20 diciembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.botz.com/MEMCyanideTreatment.pdf>

<sup>128</sup> BOTZ, Chapter 35. Cyanide Treatment: Physical, Chemical, and Biological Processes, Op. cit., p 624.

<sup>129</sup> JIMÉNEZ PRIETO, Y y PERÉZ, Esperanza. Evaluación de la cloración alcalina con hipoclorito de sodio comercial en el tratamiento de cianuros alcalinos altamente peligrosos. Revista Cubana de Química. [en línea]. 2005. 17 (3). p. 86. [Consultado 18 julio 2019]. ISSN 02585995. URL: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543687028>.

<sup>130</sup> VELASQUEZ, Op. cit., p 28.

<sup>131</sup> VIGNESWARAN, S, et al. Physico-chemical treatment processes for water reuse. Physicochemical Treatment Processes. [en línea]. 2004. 3. p. 635-676. [Consultado 19 diciembre 2018]. ISSN 9781592598205. DOI: <https://doi.org/10.1385/1-59259-820-x:635>

<sup>132</sup> VELASQUEZ, Op. cit., p 28.

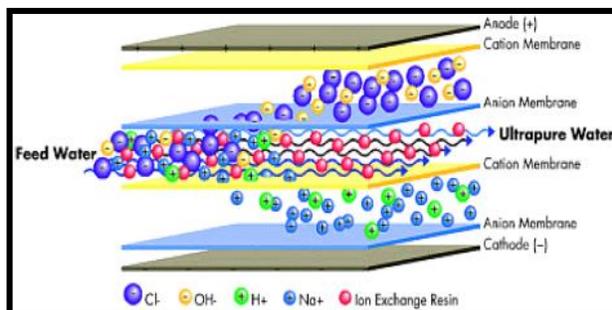
<sup>133</sup> ALYÜZ, B y VELL, S. Kinetics and equilibrium studies for the removal of nickel and zinc from aqueous solutions by ion exchange resins. Journal of Hazardous Materials. [en línea]. 2009, August. 167(1-3). p.482-488. [Consultado 20 diciembre 2018]. ISSN 03043894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.006>

<sup>134</sup>FU, Fenglian, Op. cit., p 409

como el pH, la temperatura, la concentración inicial de metal, la carga iónica y el tiempo de contacto<sup>135</sup>.

Como se observa en la Figura 2; el metal es retenido y el sustituyente se separa por levigación, la cual es método empleado para separar mediante una corriente de agua o aire, dos sólidos.<sup>136</sup>

**Figura 2.** Resina de Intercambio Iónico.



**Fuente:** LENNTECH. [sitio web] Electrodeionización (EDI). [Consulta 4 enero 2019]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/edi.htm>

Las resinas son entonces materiales que tienen elevada capacidad de intercambio, resistentes a agentes reductores y oxidantes, siendo térmicamente estables e insolubles en ácidos concentrados, bases y sales; son por lo general estructuras tridimensionales con elevado peso molecular, constituido de poliéster reticulados con divinilbenceno<sup>137</sup>. Por otro lado, los intercambiadores iónicos, suelen ser selectivos con algunos iones, según sea su carga, el peso molecular y la concentración de la solución; un ejemplo de este caso es que el intercambiador iónico posee mayor afinidad por un ion que tenga valencia  $\pm 2$  en vez de uno que tenga  $\pm 1$ ; mientras que, si dos iones tienen la misma carga, entonces el intercambiador elegirá al ion de mayor peso molecular<sup>138</sup>. Como se observa en la Figura 3.

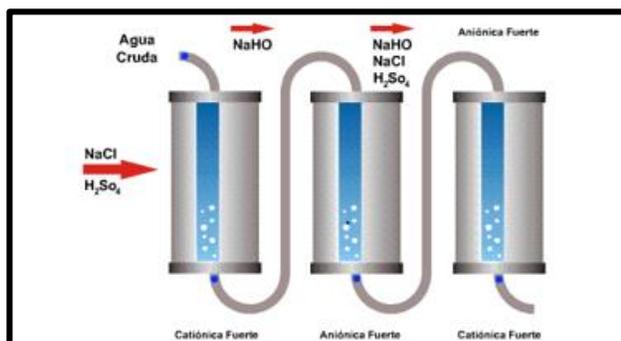
<sup>135</sup> GODE, F y PEHLIVAN, E. Removal of chromium (III) from aqueous solutions using Lewatit S 100: the effect of pH, time, metal concentration and temperature. *Journal of Hazardous Materials*. [en línea]. 2006, August. 136(2). p. 330-337. [Consultado 6 enero 2019]. ISSN 03043894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.12.021>.

<sup>136</sup> VELASQUEZ, Op. cit., p 28.

<sup>137</sup> DOWN CHEMICAL COMPANY, Ion Exchange. *Resins Fundamentals of Ion Exchange*. 2000. p 1-9. [sitio web]. Estados Unidos: DOWN CHEMICAL COMPANY. [Consulta 8 enero 2019]. Archivo pdf. Disponible en: [http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh\\_0032/0901b803800326ca.pdf](http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_0032/0901b803800326ca.pdf)

<sup>138</sup> *Ibid.*, p 1-9

**Figura 3.** Intercambio Iónico.



**Fuente:** BOSS TECH. [sitio web]. Lima, Perú: Tratamiento de agua por intercambio iónico. [Consulta 5 enero 2019]. Disponible en: <https://bosstech.pe/blog/tratamiento-de-agua-por-intercambio-ionico/>

Para los intercambiadores iónicos, se tiene en cuenta un ciclo completo que comprende cuatro etapas, que son las siguientes:

- **Servicio:** En esta etapa es en la que se pasa desde la parte superior hasta la parte inferior del intercambiador iónico, con el fin de que el agua a tratar pase por el lecho de carbón activado y las columnas del intercambio catiónico y aniónico, para que estos logren retener la mayor cantidad de partículas. Sin embargo, la resina tiene una capacidad máxima de adsorción, se debe suspender el recorrido del agua residual y comenzar a hacer el primer retrolavado. Cabe resaltar, que el tiempo de agotamiento de la resina depende de la presión de operación, variaciones que se presenten de pH, conductividad, concentración y volumen a tratar<sup>139</sup>.
- **Retrolavado:** En esta etapa se debe hacer un lavado al equipo con agua limpia en contracorriente alrededor de 10 a 15 minutos, esto con el fin de remover las partículas pequeñas y grandes depositadas en la resina y reorganizar el lecho por tamaños<sup>140</sup>.
- **Regeneración:** Se debe regenerar la resina con una solución rica en iones de intercambio, esta se hace pasar en contracorriente; de tal manera será regenerada cuando los iones de la solución se pongan en el lugar de los iones acumulados en la resina; se debe tener en cuenta que hay diferentes tipos de regenerante, este dependiendo de la resina: por ende para resinas cambiadoras

<sup>139</sup> CORREDOR, Op. cit., p 33.

<sup>140</sup> *Ibíd.*, p 34

de cationes, se debe usar soluciones acidas, para resinas cambiadoras de aniones, se debe usar soluciones básicas y salinas para ambas resinas<sup>141</sup>.

- Lavado: Se debe hacer pasar agua en sentido de agua de servicio, para que de esta manera se desplace la solución regenerante y lograr mantener la columna libre de burbujas de aire<sup>142</sup>.

En el cuadro 3 se observa la aplicación de algunas resinas y sus nombres técnicos:

**Cuadro 3.** Aplicación de algunas resinas y su nombre técnico.

<b>Problema</b>	<b>Resina</b>	<b>Regenerante</b>
Alcalinidad	ABF II	NaCl o KCl
Arsénico +5	ABF I	NaCl o KCl
Cianuro	ABF I	NaCl o KCl
Cobre	CAF	NaCl o KCl
Hierro	CAF	NaCl o KCl
Nitrato	ABF II	NaCl o KCl
Selenio	ABF I	NaCl o KCl
Radio	CAF	NaCl o KCl
Sulfatos	ABF II	NaCl o KCl
Uranio	ABF II	NaCl o KCl
Fluoruro	ABF II	NaCl o KCl

**Fuente:** AGUA LATINOAMÉRICA. [sitio web] The Capacity of Ion Exchange Resin. [Consulta 7 enero 2019]. Disponible en: <http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/5-6-02avila.pdf>

Donde:

CAF= Intercambiador Catiónico de Ácido Fuerte

ABF I= Anión de Base Fuerte tipo I

ABF II= Anión de Base Fuerte tipo II

Existen resinas de diferentes estructuras, como las siguientes:

- Resinas tipo gel, estas son convencionales, obtenidas a partir de polimerización; se consideran poco estables a altas temperaturas y presentan buena resistencia a impurezas orgánicas. Dentro de estas se encuentran las resinas gelatinosas

<sup>141</sup> Ibid., p 34

<sup>142</sup> Ibid., p 34

las cuales son las más comunes por ser económicas, alta eficiencia y capacidad<sup>143</sup>.

- Resinas macro porosas son aquellas que posee mayor tamaño de poro; cuentan con mayor estabilidad e incluso pueden ser usadas para tratamientos en donde la resina tipo gel sufriría daños con mayor facilidad; ejemplo, cuando se tienen compuestos orgánicos; es importante destacar que la capacidad de intercambio se reduce con el tamaño del poro<sup>144</sup>.
- Resinas quelantes presentan alta selectividad para metales pesados, generalmente se usan para cobre y níquel a pH mayor de 4<sup>145</sup>.

**1.7.7 Filtración de membrana.** Consisten en barreras físicas semipermeables que son capaces de separar dos fases, restringiendo de esta manera el movimiento de partículas a través de ella; es así como se logra separar partículas contaminantes del agua a tratar proporcionando un efluente acuoso depurado<sup>146</sup>.

Las tecnologías de membrana con diferente tipo de estas son eficientes para la eliminación de metales pesados gracias a su fácil operación. Los procesos de membrana utilizados para la eliminación de metales de las aguas residuales son ultrafiltración, osmosis inversa y electrodiálisis<sup>147</sup>. Esta tecnología presenta problemas de altos costos, complejidad del proceso y ensuciamiento de membranas<sup>148</sup>.

A partir de la Figura 4 se puede observar el rango de tamaño de partículas contaminantes que se pueden retener teniendo en cuenta el tamaño del poro<sup>149</sup>:

---

<sup>143</sup> *Ibíd.*, p 32.

<sup>144</sup> *Ibíd.*, p 32.

<sup>145</sup> *Ibíd.*, p 32.

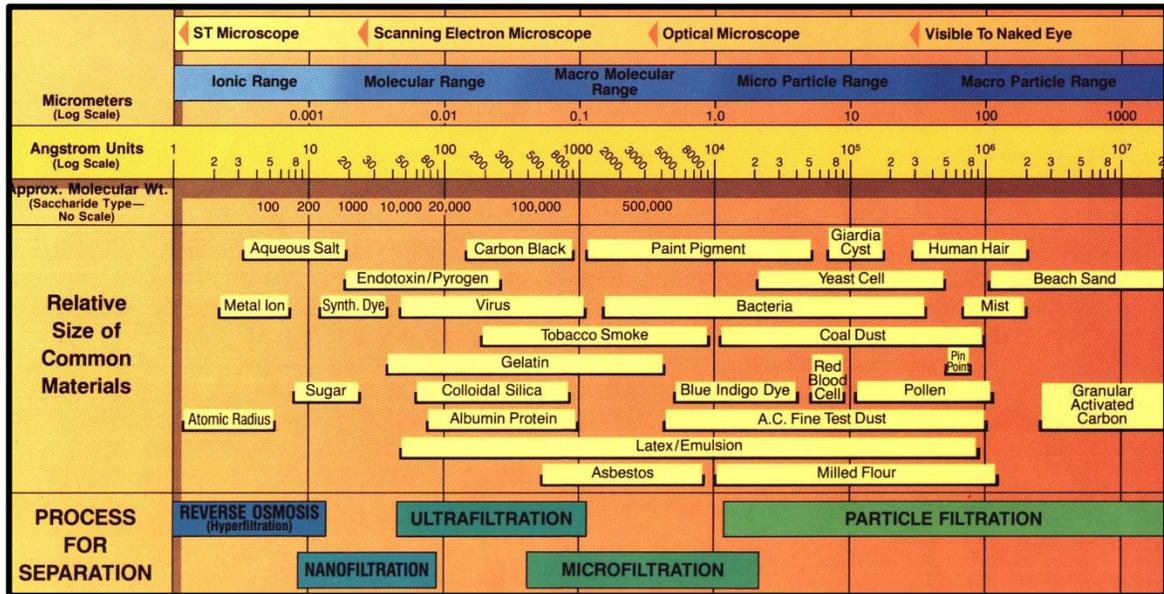
<sup>146</sup> MARTÍNEZ, Op. cit., p 33.

<sup>147</sup> FU, Fenglian, Op. cit., p 411

<sup>148</sup> *Ibíd.*, p 415

<sup>149</sup> AYALA. Op. cit., p.132.

Figura 4. Espectro de separación por membranas.



Fuente: MG FILTRATION TECHNOLOGY. [sitio web]. Filtration technology. [Consulta 4 enero 2019]. Disponible en <http://mgfiltration.com/index.php/es/>.

**1.7.7.1 Ultrafiltración y microfiltración.** Se basa en una separación física, en el cual el tamaño del poro de la membrana determinara el tamaño de los solutos eliminados, de tal manera entonces las partículas que tengan un tamaño menor a las dimensiones de los poros de las membranas serán retenidas<sup>150</sup>. La diferencia principal entre la ultrafiltración y la microfiltración, radica en el tamaño del poro de las membranas para la separación física de las partículas, por ende, la microfiltración tiene tamaño de poro de más de 0,1 μ y el de la ultrafiltración es de 0,04 a 0,1 μ<sup>151</sup>.

El proceso de ultrafiltración funciona a bajas presiones transmembrana para eliminar el material disuelto y coloidal, gracias a que los tamaños de poro de las membranas son más grandes que los iones metálicos disueltos en forma de iones hidratados o complejos de bajo peso molecular, estos iones pasan con facilidad a través de las membranas<sup>152</sup>. Utiliza una membrana permeable que permite separar metales pesados, macromoléculas y sólidos en suspensión de una solución inorgánica teniendo en cuenta tamaños de poro (5-20 nm) y peso molecular de los compuestos (1.000- 100.000 Da)<sup>153</sup>

<sup>150</sup> AYALA. Op. cit., p.128.

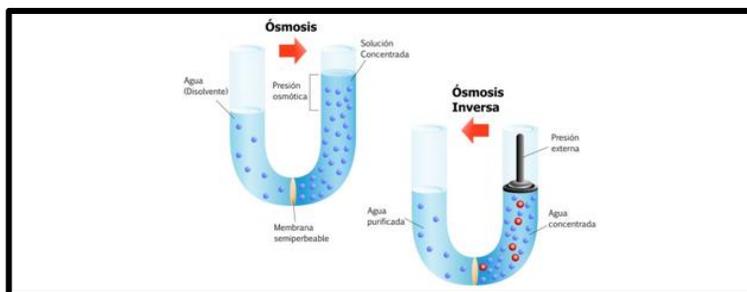
<sup>151</sup> Ibid., p 128.

<sup>152</sup> FU, Fenglian, Op. cit., p 411

<sup>153</sup> VIGNESWARAN, Op. cit., p. 635-676.

**1.7.7.2 Osmosis Inversa.** También es llamada la hiperfiltración<sup>154</sup>. Consiste en un proceso que utiliza una membrana para separar sólidos del agua. “Una presión suficientemente alta contrarresta la presión osmótica y la repulsión iónica de una solución concentrando los sólidos y separando el agua”<sup>155</sup>; de esta manera se obtienen dos corrientes, una mezcla concentrada (desecho) y una diluida (filtrado)<sup>156</sup>, tal como se observa en la Figura 5.

**Figura 5.** Osmosis Inversa.



**Fuente:** CARBOTECNIA [sitio web]. México. Osmosis Inversa. [Consulta 4 enero 2019]. Disponible en <https://www.carbotecnica.info/encyclopedia/que-es-la-osmosis-inversa/>.

Es una técnica de membrana que utiliza una membrana semipermeable, que permite purificar el fluido que pase a través de ésta, ya que rechaza los contaminantes presentes. No se aplica ampliamente en eliminación de metales pesados<sup>157</sup>. Es un proceso impulsado por presión, en el cual el agua pasa a través de esta mientras el metal pesado queda retenido<sup>158</sup>.

El proceso de separación se da gracias a la diferencia de solubilidad y difusividad en la membrana de los componentes presentes en una solución acuosa<sup>159</sup>. Es aconsejable valores de operación de diferencia de presión transmembrana y concentración de la solución de 7 a 70 bar y 200 a 30000 ppm, respectivamente<sup>160</sup>.

Consiste en un tubo o varios arreglos de tubos ubicados en serie o paralelo, este tubo de presión contiene la membrana; también se utiliza una bomba que suministra de forma continua el agua a tratar por los tubos a presión, además de entregar la

<sup>154</sup> AYALA, Op. cit., p 125.

<sup>155</sup> CORREDOR, Op. cit., p 36.

<sup>156</sup> Ibid., p 36.

<sup>157</sup> SHAHALAM, A.M; AL-HARTHY, A y AL-ZAWHRY, A. Feed water pretreatment in RO systems in the Middle East. Desalination. [en línea]. 2002, November.150 (3). p. 235-245. [Consultado 5 enero 2019]. ISSN 00119164. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00979-7](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00979-7)

<sup>158</sup> KURNIAWAN, Tonni A, et al. Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. Chemical Engineering Journal. [en línea]. 2006. 118(1-2), p. 88. [Consultado 5 enero 2019]. ISSN 13858947. DOI: 10.1016/j.cej.2006.01.015

<sup>159</sup> MARTÍNEZ, Op. cit., p 34.

<sup>160</sup> Ibid., p 34.

presión necesaria para que se lleve a cabo el proceso; y asimismo una válvula reguladora que es la encargada de controlar la presión<sup>161</sup>.

**1.7.7.3 Electrodiálisis.** Consiste en un proceso de separación electroquímica en donde las membranas cargadas y un diferencial de potencial eléctrico son empleados para separar especies iónicas entre otros componentes no cargados de una solución acuosa<sup>162</sup>. Permite la separación de iones a partir de membranas que están cargadas de una solución, usa campo eléctrico como fuerza motriz. Existen dos tipos de membranas: de intercambio catiónico y de intercambio iónico<sup>163</sup>.

El electrodiálizador está formado por un ánodo y un cátodo separados por dos membranas que lo dividen en tres compartimientos cuando se aplica la diferencia potencial a los electrodos. Las reacciones de los electrodos generan oxígeno, ácido en el ánodo y álcali en el cátodo<sup>164</sup>.

La eficiencia de este método depende de factores como la densidad de corriente aplicada, el tipo y material de las membranas; las membranas deben poseer baja resistencia eléctrica, alta selectividad y resistencia mecánica, además la distancia óptima de esta aproximadamente es entre 1-2 mm<sup>165</sup>.

En la Figura 6 se puede observar la membrana de electrodiálisis que está formada por laminar delgadas de materiales plásticos cuenta con una membrana de intercambio catiónico CM (láminas de color verde), una membrana de intercambio de aniones AM (láminas de color amarillo), una cámara de dilución (D), cámaras de electrodo (e1 y e2) y una cámara de concentrado (K) que permiten que los cationes se mueven hacia el cátodo y los aniones hacia el ánodo<sup>166</sup>.

---

<sup>161</sup> VELASQUEZ, Op. cit., p 28.

<sup>162</sup> RAMÍREZ, Lina, Op. cit., p 45.

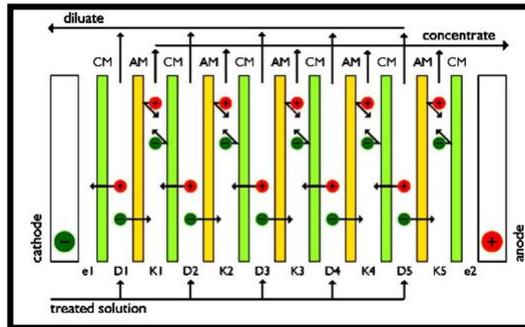
<sup>163</sup> FU, Fenglian, Op. cit., p 413.

<sup>164</sup> SILLANPÄÄ, Op. cit., p 109.

<sup>165</sup> *Ibíd.*, p 119.

<sup>166</sup> BARAKAT, Op. cit., p 28.

**Figura 6.** Membrana de electrodiálisis.



**Fuente:** BARAKAT, M.A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*. [en línea]. 2011, October. 4 (4). p. 361-367. [Consultado 14 diciembre 2018]. ISSN 18785352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.07.019>

**1.7.8 Electrocoagulación.** Se trata de un proceso electroquímico que permite separar simultáneamente metales pesados, compuestos orgánicos emulsionados, sólidos en suspensión, entre otros contaminantes que pueden estar presentes en el agua a tratar<sup>167</sup>.

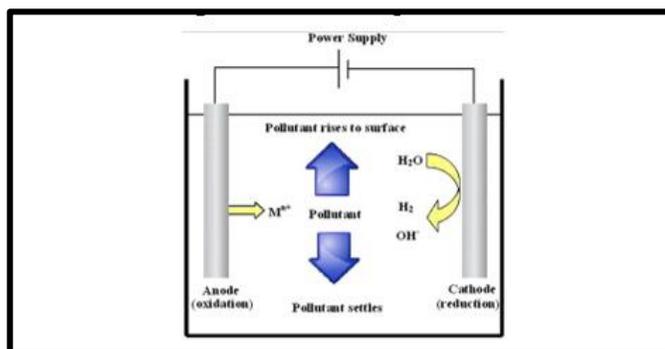
La electrocoagulación se basa en el proceso fisicoquímico de coagulación mediante la corriente directa; mientras se realiza la electrólisis en las aguas residuales con ánodos de hierro y aluminio; los cationes disueltos de hierro y aluminio se hidrolizan actuando como coagulantes, y causando que inicie la adhesión y fusión de las partículas<sup>168</sup> (Figura 7). La generación de cationes metálicos se lleva a cabo en el ánodo, gracias a la oxidación electroquímica del hierro o aluminio, mientras que en cátodo tiene lugar la producción de H<sub>2</sub><sup>169</sup>.

<sup>167</sup> CORREDOR, Op. cit., p 28.

<sup>168</sup> SILLANPÄÄ, Op. cit., p 74.

<sup>169</sup> ARROYO, M.G, et al. Effect of pH and chloride concentration on the removal of hexavalent chromium in a batch electrocoagulation reactor. *Journal of Hazardous Materials*. [en línea]. 2009, September. 169 (1-3). p 1127-1128. [Consultado 7 enero 2019]. ISSN 03043894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.04.089>

**Figura 7.** Electrocoagulación.



**Fuente:** AKBAL, Feryal y CAMCI, Selva. Copper, chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation. *Desalination*. [en línea]. 2011, March. 269 (1-3). p. 214. [Consultado 7 enero 2019]. ISSN 00119164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.001>

La electrocoagulación con electrodos de aluminio se usa generalmente para el tratamiento de aguas con contenido de aceite y contaminantes orgánicos. Por otro lado, los electrodos de hierro se utilizan para la eliminación de Cr (IV) y otros metales no ferrosos como Zn, Cu, Ni, Cd, Cr (III), entre otros, de aguas residuales que no excedan los 50 m<sup>3</sup>/h, concentración de Cr (IV) hasta 100 mg/L; y la concentración total de metales no ferrosos de hasta 100 mg/L<sup>170</sup>. En este proceso el agente floculante se genera por electro-oxidación de un ánodo de sacrificio. En este proceso, el tratamiento se lleva a cabo sin agregar ningún producto químico coagulante o floculante, por lo que se reduce la cantidad de lodo generado<sup>171</sup>. Además, está controlado por varios parámetros como la concentración, composición del contaminante, pH inicial, conductividad, material del electrodo, densidad de corriente y tiempo de coagulación<sup>172</sup>. Generalmente se usan rangos de densidad de corriente de 1-50 mA/cm<sup>2</sup><sup>173</sup>.

La reacción de la disolución del metal anódico que conduce a la formación de iones hidratados, se muestra a continuación (Reacción 3):

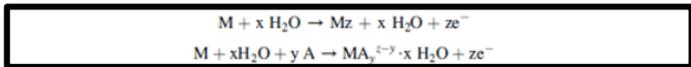
<sup>170</sup> SILLANPÄÄ, Op. cit., p 74.

<sup>171</sup> CENKIN, VE y BELEVSTEV. Electrochemical treatment of industrial wastewater. *Effluent and water treatment journal*. [en línea]. 1985. 25 (7), p. 243-249.

<sup>172</sup> HEIDMAN, Op. cit., p 936

<sup>173</sup> KABDASLI, I, et al. Electrocoagulation applications for industrial wastewaters: a critical review. *Environmental Technology Reviews*. [en línea]. 2012, November. 1 (1), p. 2-45. [Consultado 5 enero 2019]. ISSN 21622523. DOI: <https://doi.org/10.1080/21622515.2012.715390>

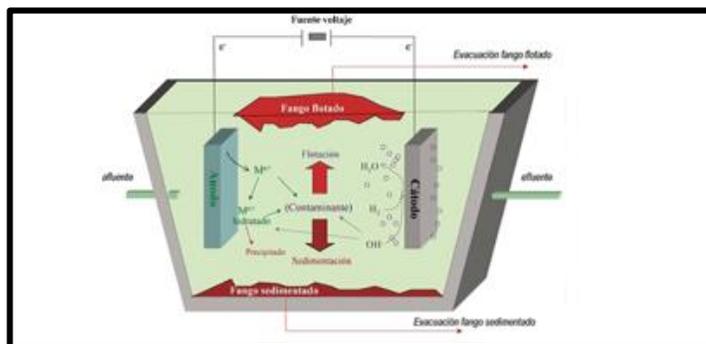
### Reacción 3. Proceso electrocoagulación.



**Fuente:** SILLANPÄÄ, Mika y SHESTAKOVA, Marina. Chapter 2- Electrochemical Water Treatment Methods. En: Electrochemical Water Treatment Methods: Fundamentals, Methods and Full Scale Applications. p. 83. [En línea]. Finland: Butterworth-Heinemann. [Citado el 20 de diciembre de 2018]. ISBN 9780128114629. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811462-9.00002-5>

Este proceso consiste en pasar el agua residual a través de los electrodos de un equipo diseñado especialmente para este fin, el cual está conectado a una fuente de corriente continua, tal como se observa en la Figura 8. Es importante recalcar que el agua residual debe contener suficientes sales neutras para que se puedan dar múltiples reacciones electroquímicas, o también se pueden agregar las sales para cumplir este fin<sup>174</sup>

**Figura 8.** Celda de Electrocoagulación.

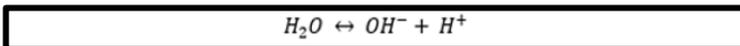


**Fuente:** DINDEP. [sitio web]. Colombia. Electrocoagulación Y Electro-Oxidación. [Consulta 4 enero 2019]. Disponible en: <https://www.dindep.com.co/nuestrosproductos/>

Las reacciones que pueden ser llevadas en una celda de electrocoagulación (Reacción 4 y Reacción 5), a temperatura ambiente, el agua se encuentra parcialmente ionizada como se observa a continuación en la reacción de equilibrio:

<sup>174</sup> CORREDOR, Op. cit., p 28.

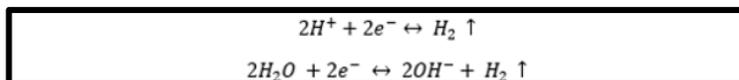
#### Reacción 4. Desionización de agua.



**Fuente:** CORREDOR, Héctor y DIAZ, Elkin. Alternativa para la disminución de metales pesados en los efluentes de proceso de la Industria Galvánica Galvanotecnica. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2011. p 29

Mientras que cuando se somete agua a la acción de corriente eléctrica continua, en el cátodo se convierte el ión hidrógeno en hidrógeno elemental, el cual se desprende formando burbujas. De igual modo, se genera el aumento de la concentración de iones hidroxilo  $OH^-$  que permite alcalinizar la solución<sup>175</sup>.

#### Reacción 5. Reacción en el cátodo.



**Fuente:** CORREDOR, Héctor y DIAZ, Elkin. Alternativa para la disminución de metales pesados en los efluentes de proceso de la Industria Galvánica Galvanotecnica. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2011. p 29

## 1.8 MARCO LEGAL

Según la resolución No. 0631 del 17 de marzo del 2015, establecida por el Ministerio de Ambiente Y Desarrollo Sostenible. En la cual se tiene en cuenta el CAPÍTULO VI. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y SUS VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES EN LOS VERTIMIENTOS PUNTUALES DE AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS (ARND) A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES<sup>176</sup>.

Artículo 13: “parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales No Domésticas (ARND) a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con fabricación y manufactura de bienes”<sup>177</sup>. Dentro de la cual se especifican los parámetros

<sup>175</sup> *Ibíd.*, p 29

<sup>176</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución No. 0631 del 17 de marzo del 2015. En: MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. [Sitio web]. Minambiente. [Consulta 19 de septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: [https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R\\_MADS\\_0631\\_2015.pdf](https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf) Calidad%20vertimientos.pdf

<sup>177</sup> *Ibíd.*,

necesarios de vertimientos de agua residuales no domésticas, teniendo en cuenta el tratamiento y revestimiento de metales; estos se exponen a continuación en la Cuadro 4.

**Cuadro 4.** Parámetros de vertimiento para tratamiento y revestimiento de metales.

<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>TRATAMIENTO Y REVESTIMIENTOS DE METALES</b>
<b>Generales</b>		
pH	Unidades de pH	6 a 9
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O <sub>2</sub>	250
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L O <sub>2</sub>	100
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	50
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/L	2
Grasas y aceites	mg/L	10
Fenoles	mg/L	0,2
Sustancias Activas al azul de metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y reporte
<b>Hidrocarburos</b>		
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L	Análisis y reporte
BTEX( Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	mg/L	Análisis y reporte
Compuestos orgánicos halogenados adsorbibles (AOX)	mg/L	
<b>Compuestos de Fosforo</b>		
Fosforo total (P)	mg/L	Análisis y reporte
<b>Compuestos de Nitrógeno</b>		
Nitrógeno Total	mg/L	
<b>Iones</b>		
Cianuro total (CN <sup>-</sup> )	mg/L	0,1
Fluoruro (F <sup>-</sup> )	mg/L	
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	
Sulfuros (S <sup>2-</sup> )	mg/L	

**Cuadro 4. (Continuación)**

PARÁMETRO	UNIDADES	TRATAMIENTO Y REVESTIMIENTOS DE METALES
Metales y metaloides		
Aluminio (Al)	mg/L	3
Antimonio (Sb)	mg/L	
Arsénico (As)	mg/L	0,1
Bario (Ba)	mg/L	1
Cadmio (Cd)	mg/L	0,05
Zinc (Zn)	mg/L	3
Cobre (Cu)	mg/L	1
Cromo (Cr)	mg/L	0,5
Estaño (Sn)	mg/L	2
Hierro (Fe)	mg/L	3
Mercurio (Hg)	mg/L	0,01
Níquel (Ni)	mg/L	0,5
Plata (Ag)	mg/L	0,2
Plomo (Pb)	mg/L	0,2
Otros parámetros para análisis y reporte		
Acidez total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte
Alcalinidad total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte
Dureza Cálcica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte
Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y reporte
Color real (medidas de absorbancia a: 436nm, 525nm, 620nm)	m <sup>-1</sup>	Análisis y reporte

**Fuente** MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución No. 0631 del 17 de marzo del 2015. En: MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. [Sitio web]. Minambiente. [Consulta 19 de septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: [https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R\\_MADS\\_0631\\_2015.pdf](https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf)Calidad%20vertimientos.pdf

DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES INDUSTRIALES COMERCIALES O DE SERVICIO. SECTOR: ACTIVIDADES DE FABRICACION Y MANUFACTURA DE BIENES<sup>178</sup>. Actividad: Tratamiento y revestimiento de metales. En las cuales se incluyen: “Las actividades de enchapado, pulimento, anodizado, coloración, cromado, zincado, galvanizado (electroplateado), bicromatizado, sulfatado, pavonado, entre otros, son procesos en los que se deposita otro metal sobre una superficie metálica y mediante la aplicación de corriente eléctrica se le confieren propiedades específicas de acabado”<sup>179</sup>.

<sup>178</sup> Ibid.,

<sup>179</sup> Ibid.,

## 2. GENERALIDADES PROCESO ACTUAL

En el presente capítulo se exponen las generalidades del proceso que se lleva a cabo actualmente en el taller de electroquímica de la FAC, teniendo en cuenta su descripción y el diagnóstico del mismo.

La Fuerza Aérea Colombiana (FAC) cuenta con un Comando Aéreo De Mantenimiento (CAMAN), ubicado en La Base Aérea My Justino Mariño Cuesto en Madrid Cundinamarca, este comando posee un taller de electroquímica (Figura 9) donde se llevan a cabo procesos de reparación y mantenimiento de piezas aeronáuticas de las Fuerzas Militares, con el fin de hacer limpieza y revisión del deterioro de las mismas, para posteriormente determinar el tipo de recubrimiento que requieren<sup>180</sup>.

**Figura 9.**Taller de Electroquímica-CAMAN.



**Fuente:** elaboración propia

El Taller de Electroquímica del Comando Aéreo de Mantenimiento fue fundado en la década de los 60's con el fin de proporcionar procesos de mantenimiento preventivo y restaurador de las aeronaves, que para esta época se contaban con aviones de hélice de la Fuerza Aérea Colombiana, inicialmente para realizar los procesos de recubrimiento de plomo, indio y estaño, contaban con cubas electrolíticas de madera recubiertas con PVC, debido al material de las mismas sufrían contaminación por la superficie exterior<sup>181</sup>. Posteriormente en la siguiente década, se discontinuaron los recubrimientos anteriormente mencionados y por lo

<sup>180</sup> FUERZA AÉREA COLOMBIANA. [sitio web]. Bogotá: FAC, Comando Aéreo de Mantenimiento Base Aérea – CAMAN. [Consulta 21 agosto 2018]. Disponible en: [www.caman.mil.co](http://www.caman.mil.co).

<sup>181</sup> OSORIO, ESPINEL, Martha. VELASCO SUÁREZ, Sandra. Diseño de la planta de tratamiento para las aguas residuales generadas por el taller de electroquímica de la fuerza aérea colombiana - FAC Madrid, Cundinamarca. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2009. p. 27.

tanto se implementaron recubrimientos de cadmio, cromo, plata, pavonado, cobre y níquel, usados para procedimientos de mayor complejidad para la protección contra la corrosión de turbinas, trenes de aterrizaje de los JET los cuales eran más rápidos y livianos que los aviones de hélice<sup>182</sup>.

Durante la década de los 80's se descontinuaron las cubas de madera, con el fin de cambiarlas por cubas electrolíticas hechas a partir de láminas de acero, para de esta forma evitar la contaminación de las soluciones electrolíticas, además, se implementaron reóstatos que permitía regular la intensidad de la corriente, controlando la cantidad de energía que fluye hacia la misma. Por otro lado, el Brush Plating comenzó a utilizarse como recubrimiento de piezas delicadas de helicópteros<sup>183</sup>. A finales del año 2013, se empezó a llevar a cabo Anodizado de tipo I, II y III como recubrimiento para componentes de aviación con aleaciones.

Actualmente se usan recubrimientos como brush plating, cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni), pavonado, anodizado y plata (Ag) para que las piezas adquieran mayor resistencia a la corrosión, abrasión, rayos ultravioletas, dureza superficial y coeficiente de fricción que se requiere para el buen funcionamiento operacional del avión. Para realizar estos recubrimientos se usan sustancias químicas tales como ácido oxálico ( $H_2C_2O_4$ ), cloruro de níquel ( $NiCl_2$ ), sulfato de níquel ( $NiSO_4$ ), ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), óxido de cadmio (CdO), cianuro de plata (AgCN), ácido crómico ( $H_2CrO_4$ ), dicromato de sodio ( $Na_2Cr_2O_7$ ), ácido nítrico ( $HNO_3$ ), ácido clorhídrico (HCl), hidróxido de potasio (KOH), hidróxido de sodio (NaOH), carbonato de sodio ( $Na_2CO_3$ ), cianuro de cobre (CuCN), entre otras; generando aguas residuales con presencia de metales pesados, compuestos cianurados y otros contaminantes.

## 2.1 PROCESO TALLER DE ELECTROQUÍMICA

El Comando Aéreo de Mantenimiento de la Fuerza Aérea, en específico el taller de Electroquímica (Figura 10), cuenta actualmente con ocho recubrimientos electrolíticos para piezas aeronáuticas (Cuadro 5), con el fin de que cada uno de estos cumpla determinada función en dichas piezas; estos recubrimientos se pueden clasificar dependiendo de la composición de la solución electrolítica por inmersión si son ácidas o alcalinas, por contacto y si solo ocurre una oxidación, de la siguiente manera: ácidas en las cuales se tiene en cuenta el uso de ácidos para soluciones electrolíticas como recubrimiento de níquel, cromo y anodizado; alcalinas en donde se emplean cianuros como solución electrolítica de plata, cobre y cadmio; por contacto como brush plating; y por oxidación como pavonado.

---

<sup>182</sup> *Ibíd.*, p 27.

<sup>183</sup> *Ibíd.*, p 28.

**Figura 10.** Taller de Electroquímica de la FAC.



**Fuente:** elaboración propia

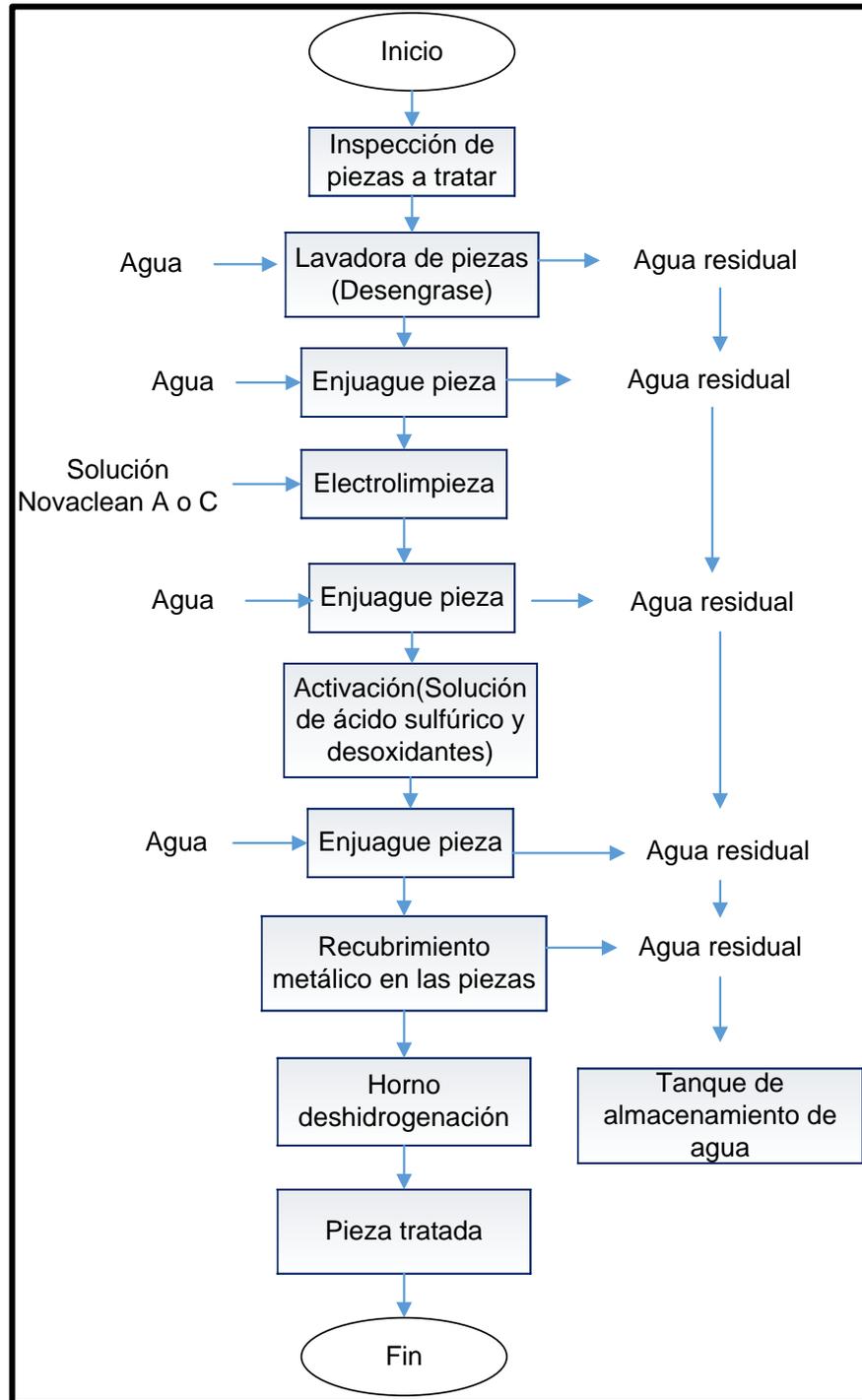
**Cuadro 5.** Recubrimientos realizados por el taller de electroquímica de la FAC.

<b>Tipo de recubrimiento</b>	<b>Tipo de mantenimiento</b>	<b>Descripción</b>
Inmersión-básico	Plata	Tornillería expuesta a altas temperaturas, equipos eléctricos.
	Cadmio	Trenes de aterrizaje, tornillería en general
	Cobre	Generadores, baterías, equipo eléctrico
Inmersión-ácido	Cromo duro	Trenes de aterrizaje, turbinas, motores opuestos
	Níquel	Trenes de aterrizaje, turbinas
	Anodizado	Componentes de aviación con aleación de aluminio y/o cobre, piezas de motores
Oxidación-básico	Pavonado	Transmisiones helicópteros, cajas reducción turbinas, engranajes y piñones en general.
Contacto básico	Brush plating	Transmisiones, HUB, Hanger.

**Fuente:** elaboración propia

A continuación, se observa el diagrama de bloques que representa el proceso realizado en el taller de electroquímica en la Figura 11.

Figura 11. Diagrama de bloques proceso taller de electroquímica.



Fuente: elaboración propia

Para llevar a cabo cada uno de los recubrimientos se realiza un proceso previo de tratamiento, para la adecuación de las piezas, el cual consiste en:

**2.1.1 Inspección de piezas a tratar.** Inicialmente, se realiza la inspección de la pieza en la cual se tiene en cuenta el tipo de recubrimiento a realizar y se determina si la misma posee irregularidades o imperfecciones que deben ser corregidas, de igual modo se revisa si esta es de ultra alta dureza para definir si el recubrimiento se realiza por contacto o por inmersión, además se establece si la pieza requiere de ajuste es decir aumentar espesor o necesita recubrirse para evitar la corrosión y desgaste (Figura 12).

**Figura 12.** Banco de Inspección de piezas.



**Fuente:** elaboración propia

**2.1.2 Lavador de piezas.** En esta se ingresa la pieza inspeccionada, con el objetivo de realizar un desengrase a la misma, de manera cíclica, retirando de esta forma, contaminantes y partículas adheridas a la misma, como se observa en la Figura 13. Esta etapa del proceso aporta en el agua residual concentraciones de sólidos suspendidos y sedimentables, aceites y grasas que por proceso de oxidación consumen oxígeno disuelto aumentado que los parámetros de DQO y DBO<sub>5</sub> no cumplan con la normatividad.

**Figura 13.** Lavador de piezas.



**Fuente:** elaboración propia

**2.1.3 Enjuague de piezas.** Se realiza un enjuague con agua para terminar de retirar impurezas, que puedan dañar la solución electrolítica, como se observa en la Figura 14. Esta etapa del proceso aporta en el agua residual concentraciones de sólidos suspendidos y sedimentables, aceites y grasas que por proceso de oxidación consumen oxígeno disuelto aumentado que los parámetros de DQO y DBO<sub>5</sub> no cumplan con la normatividad.

**Figura 14.** Enjuague de piezas.



**Fuente:** elaboración propia

**2.1.4 Electrolimpieza.** Consiste en realizar una inmersión de la pieza dentro de una solución anódica o catódica (Figura 15), Novaclean A o Novaclean C, respectivamente, las cuales cumplen la función de desengrasante electrolítico. El Novaclean A está compuesto principalmente de hidróxido de sodio (NaOH) y carbonato de sodio (NaCO<sub>3</sub>); mientras que el Novaclean C se compone de carbonato de sodio (NaCO<sub>3</sub>), aditivos e hidróxido de sodio (NaOH). Esta etapa genera que el agua residual aumente su pH.

**Figura 15.** Cuba electrolítica de Electrolimpieza.



**Fuente:** elaboración propia

**2.1.5 Enjuague.** Se realiza enjuague con agua para retirar las sustancias químicas utilizadas con anterioridad, que pueden afectar la calidad de los recubrimientos. Esta etapa genera que el agua residual aumente su pH debido a los reactivos usados en el proceso anterior.

**2.1.6 Activación.** Este paso se tiene en cuenta si la pieza está dispuesta para realizar recubrimiento por inmersión, consiste en una solución de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y desoxidantes, como se puede observar en la Figura 16. Esta etapa genera disminución en el pH y dado a la composición del desoxidante proporciona tensioactivos que generan espuma en el agua generada.

**Figura 16.** Activación.



**Fuente:** elaboración propia

**2.1.7 Enjuague.** Se realiza enjuague con agua para retirar las sustancias químicas utilizadas con anterioridad, que pueden afectar la calidad de los recubrimientos. Esta etapa genera disminución en el pH y dado a la composición del desoxidante proporciona tensioactivos debido a los reactivos empleados en la etapa anterior.

**2.1.8 Recubrimiento Metálico.** Dependiendo de la necesidad de la pieza se realiza un recubrimiento por inmersión, por contacto u oxidación, que pueden ser:

**2.1.8.1 Recubrimiento de Cobre.** Se realiza entre 80 y 90°C, con soluciones compuestas de cianuro de cobre ( $CuCN$ ) y ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) principalmente, empleada para dar espesor o ajuste, el tiempo de inmersión depende de las milésimas de pulgada que se requiera (Figura 17). Genera que el agua contenga sales metálicas de cobre solubles en agua y cianuro.

**Figura 17.** Cuba electrolítica recubrimiento de cromo.



**Fuente:** elaboración propia

**2.1.8.2 Recubrimiento de Cadmio.** Se realiza a temperatura ambiente, con una solución compuesta por óxido de cadmio ( $\text{CdO}$ ), cianuro de sodio ( $\text{NaCN}$ ), hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ), entre otros. Se utiliza para proteger las piezas de la corrosión. Siendo este el recubrimiento que más se emplea en este taller (Figura 18). Causa que el agua cuente con cianuro y sales de cadmio solubles.

**Figura 18.** Cuba electrolítica recubrimiento de cadmio.



**Fuente:** elaboración propia

**2.1.8.3 Recubrimiento de Plata.** Está compuesta por una solución de cianuro de plata ( $\text{AgCN}$ ), sirve para dar ajuste a la pieza, pero inicialmente es necesario realizar recubrimiento de cobre o preplata (Figura 19). Genera que el agua contenga sales metálicas de plata solubles en agua y cianuro.

**Figura 19.** Cuba electrolítica recubrimiento de plata.



**Fuente:** elaboración propia

**2.1.8.4 Recubrimiento de Cromo.** Este se realiza a temperaturas de 45 a 60°C, y está compuesto principalmente por ácido crómico ( $H_2CrO_4$ ). Es utilizado para dar resistencia al desgaste y corrosión (Figura 20). Genera que el agua contenga altas concentraciones de cromo trivalente y hexavalente.

**Figura 20.** Cuba electrolítica recubrimiento de cromo.



**Fuente:** elaboración propia

**2.1.8.5 Recubrimiento de Níquel.** Esta solución se trabaja a temperaturas de 45°C a 75°C, compuesta por ácido bórico ( $H_3BO_3$ ), sulfato de níquel ( $NiSO_4$ ), cloruro de níquel ( $NiCl_2$ ), entre otros. Sobre este se debe aplicar recubrimiento de cromo, para de esta forma obtener color plateado, protegiendo de la corrosión (Figura 21). Causa que se presenten sales de níquel y aditivos orgánicos en el agua generada.

**Figura 21.** Cuba electrolítica recubrimiento de níquel.



**Fuente:** elaboración propia

**2.1.8.6 Anodizado.** Se realizan tres tipos de anodizado:

- Anodizado Tipo I: (Anodizado Crómico), la solución está formada principalmente por ácido crómico ( $H_2CrO_4$ ) o trióxido crómico ( $CrO_3$ ), a una temperatura de 35 a 50°C, permite proteger componentes de aviación con aleaciones de 5% de aluminio con silicio y aluminio con cobre.
- Anodizado Tipo II: (Anodizado Sulfúrico), permite proteger componentes de aviación con aleaciones de 5% de aluminio con cobre, se emplea en piezas de motores que requieren pasar por coloreado, se lleva a cabo a una temperatura de 100°C (Figura 22).

**Figura 22.** Cuba electrolítica recubrimiento de Anodizado tipo II.



**Fuente:** elaboración propia

- Anodizado Tipo III: (Anodizado Duro), este está compuesto por soluciones de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y ácido oxálico ( $H_2C_2O_4$ ), requiere una temperatura de -5 a 0°C, dando capas de ajuste a la pieza.

El anodizado causa que el agua presenta pH bajos debido a los ácidos que usa en su procedimiento.

**2.1.8.7 Pavonado.** Este no es considerado un recubrimiento, ya que consiste en una oxidación de acero con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) y nitrato de sodio (NaNO<sub>3</sub>), a una temperatura mayor a 250°C, se usa para protección de piezas (Figura 23). Causa que se presente oxidación en la materia orgánica y variación en pH dado que se usan hidróxidos y sales.

**Figura 23.** Cuba electrolítica de pavonado.



**Fuente:** elaboración propia

**2.1.8.8 Brush Plating.** Es un recubrimiento realizado por contacto directo para piezas de ultra alta dureza como se observa en la Figura 24, debido a que estas no pueden ser llevadas al horno de deshidrogenación luego de aplicar un recubrimiento por inmersión para liberar el hidrógeno y dar dureza a la pieza. Se hace uso de la solución Cadmium LHE®. Causa que el agua contenga cadmio debido a la solución empleada en el proceso.

**Figura 24.** Banco de Brush Plating.



**Fuente:** elaboración propia

**2.1.9 Horno deshidrogenación.** Este es el último paso a realizar a la pieza, se lleva a cabo a una temperatura aproximada de 250 a 300 °C, con el fin de eliminar el hidrógeno atómico, que adquirió la pieza durante la aplicación de recubrimientos electrolíticos, con el objetivo de que el gas hidrógeno penetre la pieza, causando porosidad, pérdida de ductilidad o fisuras, al instalarla nuevamente (Figura 25).

**Figura 25.** Horno deshidrogenación.



**Fuente:** elaboración propia

Finalmente, el agua residual generada en cada una de las etapas desde el pretratamiento hasta la realización del respectivo recubrimiento, es vertida en las canaletas (Figura 26), las cuales se encuentran conectadas con el tanque de almacenamiento, en este se inicia el proceso de tratamiento; debido a que el agua residual producida por los recubrimientos alcalinos y ácidos es vertida en la misma, es necesario realizar un tratamiento en el cual se tenga la disposición de eliminar los dos tipos de contaminantes.

**Figura 26.** Canaleta de evacuación de agua.



**Fuente:** elaboración propia

## 2.2 DESCRIPCIÓN PLANTA DE TRATAMIENTO ACTUAL

La Fuerza Aérea en la Base de Madrid, cuenta con una planta de tratamiento de agua residual (Figura 27), en la cual se realizan procesos de oxidación alcalina y ácida, para la eliminación de cianuro y cromo del agua proveniente del taller de electroquímica.

**Figura 27.** Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) –FAC.



**Fuente:** elaboración propia

Este proceso, tiene un modo de operación batch, causando dificultades de manejo para el operario a cargo, dado que este proceso tiene una duración de 12 días, con capacidad de tratar tan solo un volumen de 5.000 L de agua, el cual corresponde al 29% del agua producida por el taller, implicando que el 71% sea vertida sin tratar directamente al sistema de alcantarillado, esto es causado debido a los altos tiempo de retención en cada uno de los equipos como se muestra en la Cuadro 6 y teniendo en cuenta los equipos mostrados en la Figura 29.

**Cuadro 6.** Tiempo de retención proceso actual.

Proceso	Equipo	Tiempo (h)
Transferencia de tanque de almacenamiento a tanque de sedimentación 1	De TK1 a TK2	5
Precipitación de metales	TK2	18
Disposición de lodos tanque 1	TK8 TK9 TK10	4
Transferencia de tanque de sedimentación 1 a 2	De TK2 a TK3	2
Oxidación de cianuro	TK3	24
Reducción de cromo	TK3	18
Disposición de lodos tanque 2	TK8 TK9 TK10	4

**Cuadro 6. (Continuación)**

<b>Proceso</b>	<b>Equipo</b>	<b>Tiempo (h)</b>
Transferencia de tanque de sedimentación 2 a 1	De TK3 a TK2	2
Ajuste a pH de norma	TK2	8
Filtración	F1 F2	3
Vertimiento de agua a sistema de alcantarillado	Corriente 20	2
<b>TOTAL</b>		90

**Fuente:** elaboración propia

Dado que por día se cuenta solo con 8 horas laborales y teniendo en cuenta los tiempos de retención del Cuadro 6 se determina que se requieren de 12 días para el tratamiento de 5.000 L, es decir que el agua generada durante estos 12 días corresponde a 12.000 L de agua considerando que por día se genera 1.000 L y debido a que no se cuenta con un tanque de almacenamiento con esta capacidad ésta es vertida al alcantarillado, por tanto el agua requerida por el tratamiento más el agua vertida al alcantarillado corresponde a un total de 17.000 L

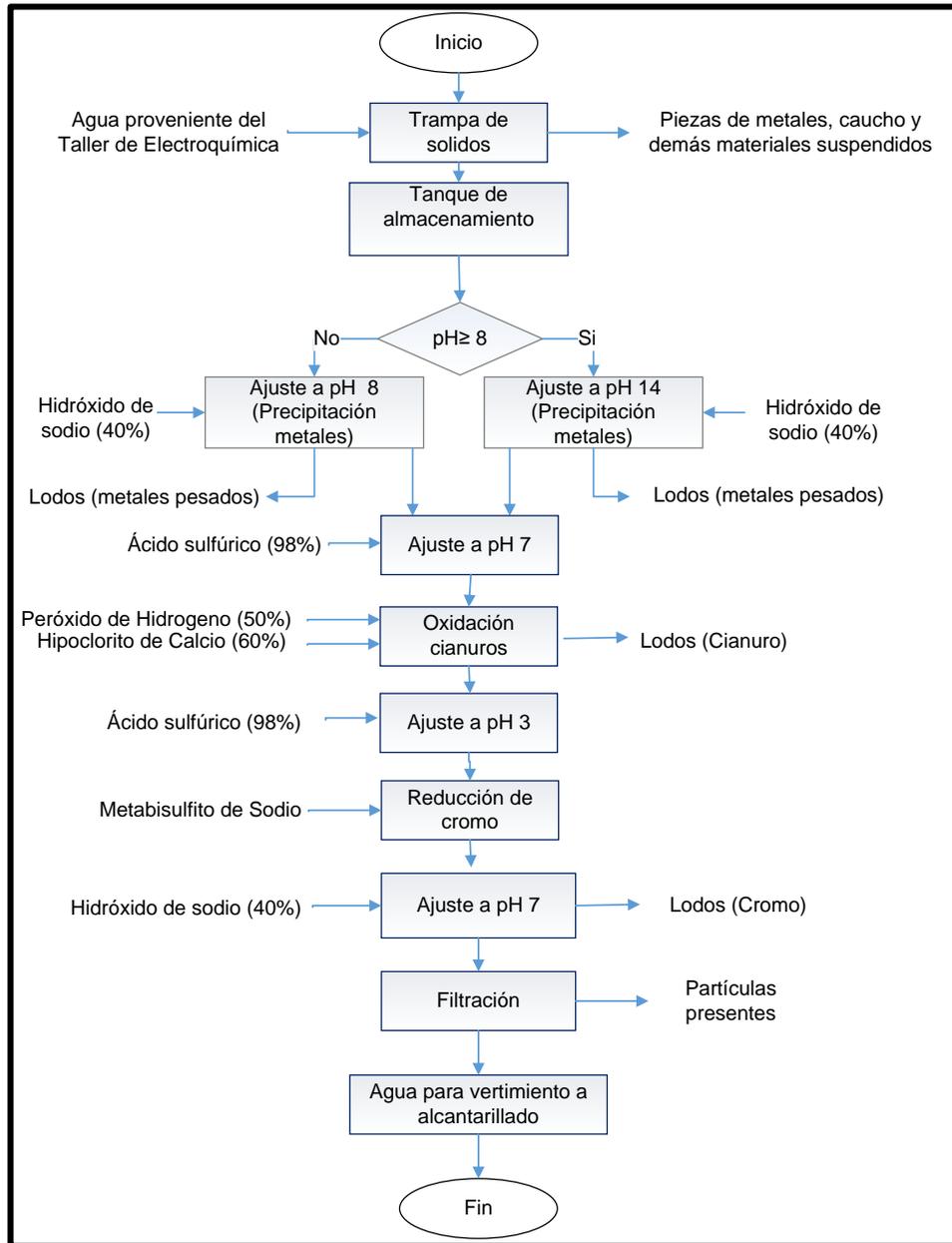
$$\% \text{ agua tratada} = \frac{\text{Agua tratada}}{\text{Agua generada}} * 100$$

$$\% \text{ agua tratada} = \frac{5.000L}{17.000 L} * 100 = 29 \%$$

$$\% \text{ agua vertida} = \frac{12.000L}{17.000 L} * 100 = 71 \%$$

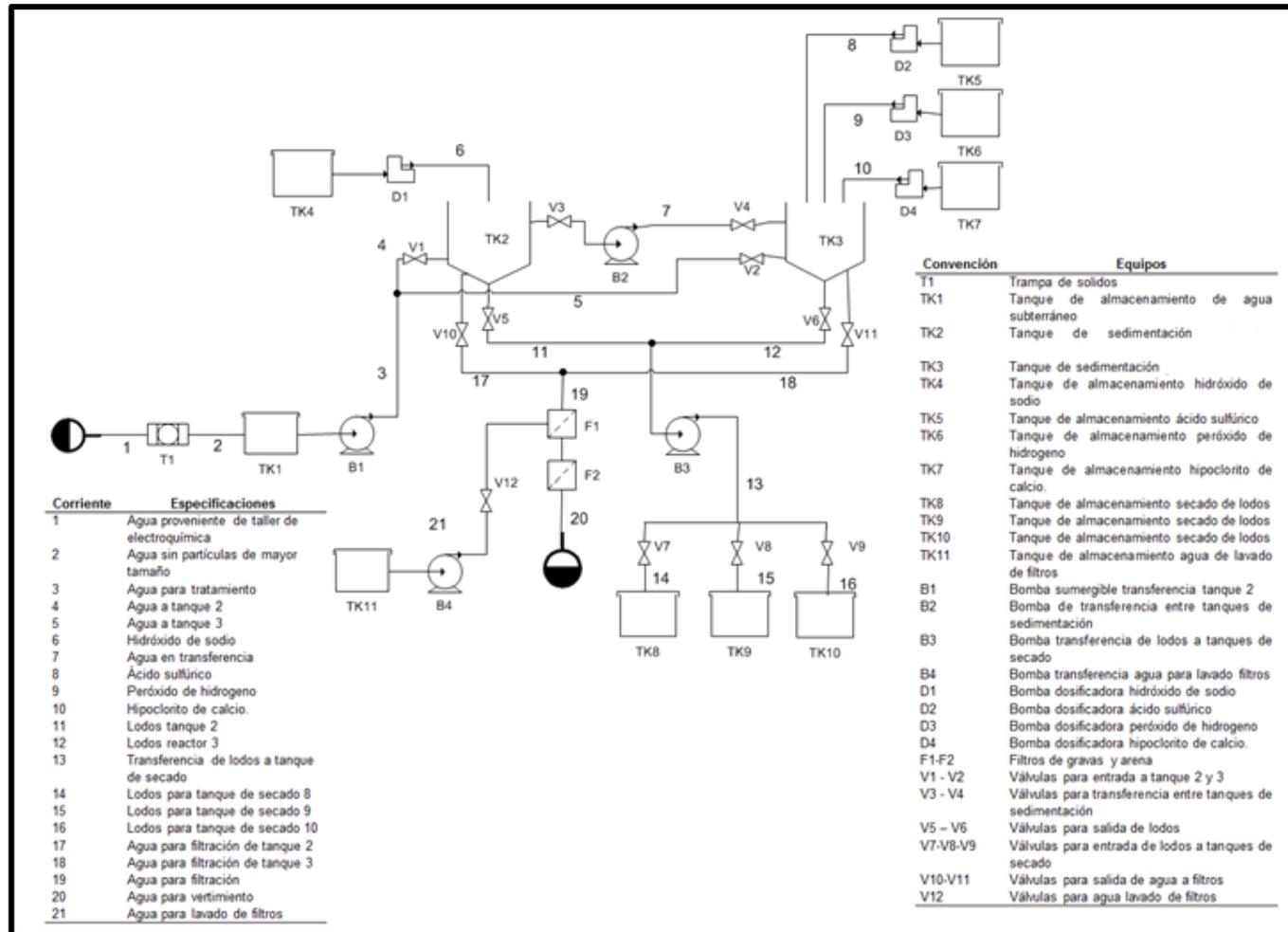
La planta de tratamiento cuenta con dos tanques de sedimentación en donde se lleva a cabo la precipitación de metales, reducción de cromo y oxidación de metales; con tres bombas centrifugas de 0,5 HP; cuatro bombas dosificadoras, cada una para hidróxido de sodio, peróxido de hidrógeno, ácido sulfúrico, hipoclorito de calcio respectivamente; un tanque de almacenamiento subterráneo; tres lechos de secado de lodos; una bomba sumergible de 1 HP; tanque lavado de filtros y dos filtros de grava y arena. El tratamiento llevado a cabo se muestra en la Figura 28, así como su distribución en la Figura 29

**Figura 28.** Diagrama de Tratamiento actual de la PTAR.



**Fuente:** elaboración propia

Figura 29. Diagrama de Proceso PTAR.



Fuente: elaboración propia

Inicialmente el agua proveniente del taller de electroquímica (corriente 1) ingresa a un tanque de almacenamiento subterráneo (TK1) de 1.000 L (Figura 30); en este se encuentra una rejilla que ayuda a retener los sólidos que lleva el agua residual como lo pueden ser piezas de metal, caucho, entre otros (T1). Adicionalmente, se cuenta con una bomba sumergible de 1 HP (B1) con tubería de 1 ½ in, la cual permite la transferencia del agua al tanque de sedimentación 1 (TK2).

**Figura 30.** Tanque de almacenamiento.



**Fuente:** elaboración propia

Posteriormente se lleva a cabo la precipitación de metales, de la siguiente forma: en el tanque de sedimentación 1 (TK2) (Figura 31); al completar un volumen de 5.000 L, se revisa el pH, para determinar la dosificación de la solución de hidróxido de sodio (40%) mediante la bomba dosificadora (D1) para ajustar el pH a 8 o 14 dependiendo del pH inicial del agua, es decir, que si el agua presenta un pH mayor o igual a 8 se lleva a pH de 14, mientras que si presenta valores menores a 8 se deja en este mismo pH, con el fin de realizar precipitación de metales; se realiza sedimentación y posteriormente los lodos producidos serán removidos para los lechos de secado (TK8, TK9, TK10) con ayuda de una bomba centrífuga de 0,5 HP (B3)

**Figura 31.** Tanque de sedimentación TK2.



**Fuente:** elaboración propia

Seguidamente, se realiza una transferencia del tanque de sedimentación 1 (TK2) al 2 (TK3), pasando mediante una bomba centrífuga de 0,5 HP (B2) (Figura 32).

**Figura 32.** Bomba Centrífuga.



**Fuente:** elaboración propia

En el tanque de sedimentación 2 (TK3) (Figura 33); se verifica el pH y se realiza ajuste de éste empleando ácido sulfúrico mediante la bomba dosificadora (D2) debido a que debe estar en pH de 7 para oxidar cianuro mediante la adición de hipoclorito de calcio (60%) y peróxido de hidrógeno (50%) los cuales se dosifican mediante D4 y D3 respectivamente; se efectúa una homogenización mediante la transferencia del tanque de sedimentación TK2 al TK3 y de esta manera se dejan sedimentar los contaminantes que seguidamente serán removidos para los lechos de secado de lodos (TK8, TK9, TK10) con ayuda de una bomba centrífuga de 0,5 HP (B3).

Posteriormente se ajusta el pH entre 3 y 4 con ácido sulfúrico 98% (D2) para reducir cromo mediante la dosificación de metabisulfito de sodio empleando la bomba dosificadora del peróxido (D3); se efectúa una homogenización mediante la transferencia del tanque de sedimentación TK2 al TK3 y de esta manera reducir cromo hexavalente a cromo trivalente.

**Figura 33.** Tanque de sedimentación TK3.



**Fuente:** elaboración propia

A continuación, se procede con una transferencia del tanque de sedimentación TK3 al TK2, con el fin de aumentar el pH a 7 mediante la adición de hidróxido de sodio 40% (D1). Finalmente, el agua a tratar pasa por dos filtros de grava y arena (F1, F2) (Figura 34), para terminar de retener partículas presentes y de esta manera se obtiene agua con menor cantidad de contaminantes; con la ayuda de test se revisa la concentración de cromo y cianuro, y de esta forma se vierte el efluente al alcantarillado (Corriente 20).

**Figura 34.** Filtros de Grava.



**Fuente:** elaboración propia

Para la descarga de lodos, se cuenta con tres tanques que permiten el secado de estos (TK8, TK9, TK10) (Figura 35), en donde se tiene lodos alcalinos y ácidos, los cuales son tratados por la empresa Ambiente & Soluciones S.A.S, la cual, se encarga de recogerlos y disponerlos como residuos peligrosos almacenándolos en bolsas rojas.

**Figura 35.** Lecho de secado de lodos.



**Fuente:** elaboración propia

Por otro lado, la planta posee un panel de control de dosificación semiautomático, en el cual se cuenta con sensores de pH para la correcta adición de hidróxido de sodio y ácido sulfúrico según requerimientos en el proceso y de conductividad para verificar la reducción de cromo hexavalente a trivalente luego de que el operario a cargo agregue metabisulfito de sodio al tanque de sedimentación TK3. Se debe ingresar la concentración inicial de cianuro del agua a tratar por lote al PLC, para determinar la cantidad a dosificar de peróxido de hidrógeno e hipoclorito de calcio. También permite realizar lavado y retrolavado a filtros empleando el agua almacenada en TK11.

### **2.3 DIAGNÓSTICO DE PROCESO EN PLANTA DE TRATAMIENTO ACTUAL**

### 2.3.1 Histórico de la caracterización del agua a la entrada de la PTAR.

Teniendo en cuenta los análisis de caracterización de agua en la entrada de la PTAR, realizados con anterioridad en la FAC, los cuales se realizan anualmente, por la empresa Asinal S.A.S, correspondientes a las fechas: 5 de septiembre de 2017 y 18 de julio de 2018 mediante un muestro puntual; se revisan los parámetros de calidad de agua y así mismo se comparan con los requeridos por la Resolución 0631 de 2015 art 16, “por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”<sup>184</sup>. Los resultados anteriormente mencionados, se encuentran adjuntos en el Anexo A.

**Tabla 1.** Caracterización agua de entrada PTAR.

<b>Agua de Tratamiento de Entrada</b>			
<b>Fecha</b>	<b>5/10/2017</b>	<b>18/07/2018</b>	<b>Resolución 0631 de 2015</b>
<b>Parámetros</b>			
Temperatura (°C)	4,2	17	
Cianuros (ppm)	1,22	25,37	0,1
Bario (ppm)	0,2	0,86	1
Cadmio (ppm)	4,01	88,1	0,05
Cromo (ppm)	5,29	134,22	0,5
Mercurio (ppm)	0,002	<0,001	0,01
Níquel (ppm)	9,02	236,53	0,5
Plata (ppm)	< 0,05	<0,05	0,2
Plomo (ppm)	4,45	16,32	0,2
Selenio (ppm)	< 0,002	<0,002	0,5
DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)	1203	189	100
DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	625	291	250
Fenoles (ppm)	< 0,10	0,51	0,2
Grasas y Aceites (ppm)	100	93	10
pH	4,24	6,49	6 a 9
Sólidos Sedimentables (SSED) (ppm)	1,9	110	2
Sólidos Suspendidos Totales (SST) (ppm)	1253	5028	50

\*Parámetros que incumplen la norma 0631 del 2015

**Fuente:** elaboración propia

La Tabla 1 muestra que los contaminantes que se encuentran presentes e incumplen con la norma anteriormente mencionada, corresponden a cianuros, cromo, níquel, cadmio, plomo, plata, mercurio, fenoles, DQO, DBO<sub>5</sub>, sólidos

<sup>184</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Op, cit.

sedimentables, sólidos suspendidos totales, pH, grasas y aceites; los cuales varían en su concentración debido al aumento de demanda de piezas aeronáuticas y el tipo de recubrimiento empleado para cada una de estas. Debido a lo anterior, estos parámetros se tendrán en cuenta para la caracterización en el desarrollo experimental de la alternativa propuesta.

**2.3.2 Caracterización del agua a la salida de la PTAR.** Teniendo en cuenta los parámetros observados en la Tabla 1 que no cumplen con la resolución 0631 de 2015, se realiza comparación de estos con la caracterización de agua realizada el 18/07/2018 a la salida de la PTAR (Anexo B), y a su vez por los parámetros exigidos por la resolución anteriormente mencionada, con el fin de determinar los inconvenientes que presenta el proceso que se está llevando a cabo actualmente, estos se observan en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Comparación de caracterizaciones a la entrada y salida de la PTAR (actual) de parámetros que no cumplen con la resolución 0631 de 2015.

<b>Parámetros</b>	<b>Entrada a tratamiento actual</b>	<b>Salida tratamiento actual</b>	<b>% de remoción</b>	<b>Resolución 0631 de 2015</b>
Cianuro total (ppm)	25,37	0,46	98,19	0,1
Cadmio (ppm)	88,1	1,64	98,14	0,05
Cromo total (ppm)	134,22	2,5	98,14	0,5
Níquel (ppm)	236,53	6,21	97,37	0,5
Plomo (ppm)	16,32	0,15	99,08	0,2
DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)	189	19	89,95	100
DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	291	30	89,69	250
Fenoles (ppm)	0,51	0,24	52,94	0,2
Grasas y Aceites (ppm)	93	10	89,25	10
Sólidos Suspendidos Totales (SST) (ppm)	5028	2,5	99,95	50

\*Parámetros que incumplen la norma 0631 del 2015

**Fuente:** elaboración propia

Según los porcentajes de remoción mostrados en la Tabla 2, se puede observar que, aunque presentan altos rendimientos, la mayoría de estos no logran cumplir con los parámetros establecidos por la resolución 0631, además requieren tiempos extensos para alcanzar estos resultados.

**2.3.3 Evaluación de la PTAR y el proceso actual de tratamiento.** Sabiendo que la cantidad de agua generada en el taller de electroquímica no siempre presenta las mismas condiciones de concentración de contaminantes y volumen generado, dado que la cantidad de piezas aeronáuticas a reparar y sus tratamientos varían según la temporada, se debe tener en cuenta que la cantidad máxima de agua generada por día en el taller corresponde a 1.000L. Considerando que la planta de tratamiento puede tratar máximo 5.000 L en un tiempo de duración de 12 días, conlleva que el resto sea vertido directamente al sistema de alcantarillado sin tratar, siendo este el 70% del agua producida en el taller de electroquímica; debido al tiempo de duración del proceso de tratamiento actual la planta se encuentra subdimensionada, por ende se requiere tener en cuenta los tiempos de reacción adecuados para cada una de las etapas, además es necesario realizar la ampliación del tanque de almacenamiento de agua, ya que solo permite almacenar el agua producida por un día.

Realizando un análisis y revisión de los mantenimientos de equipos y accesorios de la PTAR (Anexo C) realizados en los últimos dos años, se determinó:

- Los tanques donde se lleva a cabo la oxidación ácida y alcalina no cuentan con sistema de agitación, lo que impide que se homogenice el agua con las sustancias químicas y por tanto no se lleva a cabo correctamente la reacción.
- No se realizan lavados de los tanques donde se lleva a cabo el tratamiento periódicamente, lo cual causa interferencia en el proceso debido a los contaminantes que se retienen en las paredes de estos.
- No se realiza lavado de los filtros al terminar tratamiento de cada lote realizado teniendo en cuenta lo estipulado por Acuatecnica LTDA, empresa proveedora de los filtros, causando que baje su rendimiento de retención de sólidos debido a que los contaminantes se acumulan en la grava y arena de estos. El lavado inicia con la programación del PLC (opción de lavado de filtros), en donde éste especifica cuáles válvulas se requieren abrir para esta labor, realizando un lavado y retrolavado cada uno de 15 minutos, el agua resultante de estos es depositada en el tanque de almacenamiento.
- No se realiza revisión, cambio, ni ajuste del sistema de programación de la planta de tratamiento (PLC), ni de los componentes eléctricos de este, a pesar de que es requerido teniendo en cuenta las necesidades estipuladas en el mantenimiento (Anexo C).
- No se realiza mantenimiento de sensor de pH y conductividad, solo se tienen en cuenta el cambio de sensores de nivel de los tanques (Anexo C).

- Las bombas centrifugas y dosificadoras se encuentran en correcto estado debido a que se realizan mantenimientos anualmente, los cuales incluyen cambio de componentes desgastados, cambio de sellos y diafragmas (Anexo C).
- No se cuenta con tanque y bomba dosificadora para el metabisulfito de sodio, por lo cual el operario encargado prepara la solución en el tanque de almacenamiento de peróxido de hidrógeno y utiliza la bomba dosificadora del mismo.
- Las válvulas se encuentran funcionando correctamente ya que se realiza la revisión de estas en los mantenimientos anuales realizados (Anexo C).

Por otro lado, se determina que las etapas del proceso no se llevan a cabo en el orden correcto; considerando a los autores Sohair Abou- Elela, Hanan Ibrahim<sup>185</sup>; G. Tapla, J. Bourgois, F. Carrillo<sup>186</sup> y Joshua Amarnath, S. Rajan, S. Suresh<sup>187</sup> el proceso de tratamiento clásico de aguas residuales provenientes de recubrimientos metálicos consiste en las siguientes etapas: oxidación de cianuro, reducción de cromo, precipitación de metales y finalmente filtración. Además teniendo en cuenta lo expuesto por los autores Rojas, Jairo y Poon, C.P; la eliminación del cianuro se debe realizar antes de la precipitación de cadmio en baños de revestimiento y en aguas de enjuague que contienen cianuro ya que estos inhiben la precipitación de cadmio <sup>188</sup> <sup>189</sup>.

Teniendo en cuenta revisión bibliográfica, se detallan las condiciones de cada una de las etapas y el orden adecuado para el tratamiento de aguas residuales galvánicas.

- **Oxidación de cianuro:** En la revisión bibliográfica se determinan los pH y tiempo de reacción adecuados para el proceso de oxidación de cianuros con peróxido de hidrógeno e hipoclorito de calcio, los cuales se pueden observar en el Cuadro 7. Las reacciones que se llevan a cabo se muestran en la Reacción 6 y Reacción 7.

<sup>185</sup>ABOU- ELELA, Sohair; IBRAHIM, Hanan y ABOU- TALEB, Enas. Heavy metal removal and cyanide destruction in the metal plating industry: an integrated approach. *The Environmentalist*. 2008, October. 28 (3), p 223-229. [Consultado 15 enero de 2019]. ISSN 15732991. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10669-007-9132-6>

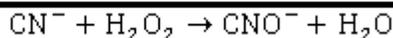
<sup>186</sup>TAPLA, G; BOURGOLS, J y CARRILLO, F. A knowledge base system for the oxidation cyanide process of industrial wastewater treatment. 2007. 7A (1). p.1-9. En: 5<sup>th</sup> International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology. [sitio web]. México: LACCEI. [Consulta 15 enero de 2019]. Archivo pdf. Disponible en: [http://www.laccei.org/LACCEI2007-Mexico/Papers%20PDF/ESE172\\_TapiaTrejo.pdf](http://www.laccei.org/LACCEI2007-Mexico/Papers%20PDF/ESE172_TapiaTrejo.pdf).

<sup>187</sup> AMARNATH, Joshua; RAJAN, S y KUMAR, S. Removal of cyanide and heavy metals from gold plating industrial wastewater. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*. 2014, October. 7(4), p. 281-283. [Consultado 16 enero de 2019]. ISSN 09742115.

<sup>188</sup>POON, C.P. Removal of cadmium from wastewaters. *Experientia*. [en línea]. 1984, February. 40 (2). p. 128. [Consultado 15 enero de 2019]. DOI: 10.1007/BF01963575.

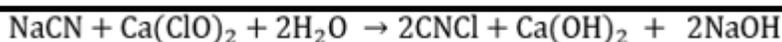
<sup>189</sup> ROMERO ROJAS, Jairo. Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño. 3<sup>a</sup> ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2008.144 p. ISBN 9588060133.

### Reacción 6. Oxidación de cianuro con peróxido de hidrógeno.



**Fuente:** GAVIRIA, Ana y MEZA, Luis. Análisis de alternativas para la degradación del cianuro en efluentes líquidos y sólidos del municipio de Segovia, Antioquia y en la planta de beneficio de la empresa mineros Nacionales, municipio de Marmato, Caldas. Dyna. [en línea]. 2006, January. 73 (149). p. 35. [Consultado 17 enero de 2019]. ISSN 00127353.

### Reacción 7. Oxidación de cianuro con hipoclorito de calcio.



**Fuente:** QUISPE, Elizabeth. Comparación técnica y económica en el uso del hipoclorito de sodio e hipoclorito de calcio en el tratamiento de efluentes cianurados. [en línea]. Informe de suficiencia para título profesional de ingeniería Química. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Química y Textil. 2010. p. 27. [Citado el 25 de enero del 2019]. Disponible en: [http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/9740/1/quispe\\_se.pdf](http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/9740/1/quispe_se.pdf)

### Cuadro 7. Condiciones adecuadas para oxidación de cianuro con peróxido de hidrógeno e hipoclorito de calcio.

	<b>pH adecuado de oxidación</b>	<b>Tiempo de reacción</b>	<b>Mejoras e inconvenientes</b>
<b>Oxidación con peróxido de hidrógeno + hipoclorito de calcio</b>	9-11 (9 mayor velocidad de degradación) <sup>190 191</sup> 9-11 <sup>192 193</sup> 8-11 <sup>194</sup>	60 minutos <sup>195</sup>	Se presenta mayor oxidación de cianuro al dosificar 75% de los reactivos al inicio y el otro 25% 20 minutos después <sup>196</sup> .

**Fuente:** elaboración propia

<sup>190</sup>TEIXEIRA, Luiz Alberto, et al. Oxidation of cyanide in water by singlet oxygen generated by the reaction between hydrogen peroxide and hypochlorite. Minerals Engineering. [en línea]. 2013, September. 50-51. p 57. [Consultado 16 enero de 2019]. ISSN 08926875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.06.007>.

<sup>191</sup>DIAZ, Walter Juan. Propuesta de implementación y evaluación de tratamiento por oxígeno singlet para remover cianuro y subproductos de un proceso de cloración alcalina. [en línea]. Proyecto de grado ingeniero metalurgista. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, 2014. p.122. [Citado el 20 de enero del 2019]. Disponible en [http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/10452/1/diaz\\_pw.pdf](http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/10452/1/diaz_pw.pdf)

<sup>192</sup> ARANGUI, Gonzalo y REYES, Iván. Cyanide Degradation from Mining Effluent Using Two Reagents: Sodium Metabisulphite and the Metabisulphite Mixture with Hydrogen Peroxide. TECCENCIA. [en línea]. 2018, August. 13 (25), p.2. [Consultado 16 enero de 2019]. ISSN 24223670. DOI: <http://dx.doi.org/10.18180/teccencia.2018.25.1>.

<sup>193</sup> CHURAMPI, Meryelem. Tratamento de efluentes contendo cianeto por oxigênio singlete gerado através da reação de peróxido de hidrogênio e hipoclorito de sódio. [en línea]. Río de Janeiro: Pontificia Universidad Católica. Proyecto de grado Ingeniería de materiales y de procesos químicos y metalúrgicos. Departamento de Ingeniería de materiales, 2012. p. 94. [Citado el 26 de enero del 2019]. Disponible en: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=21883@1>.

<sup>194</sup> SJAHRUL, Muntasir; ZAKIR, Muhammad y RAYA, Indah. Elimination Cyanide with Hydrogen Peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) and Calcium Hypochlorite (Ca(OCl)<sub>2</sub>) on Gold Mine Waste from North Luwu, South Sulawesi. American Journal of Environmental Protection. [en línea]. 2016, July. 5 (4). p 99. [Consultado 16 enero de 2019]. ISSN 23285699. DOI: 10.11648/j.ajep.20160504.14.

<sup>195</sup> *Ibid.*, p 97.

<sup>196</sup> DIAZ, Op. cit., p 128.

Según Gaviria Ana y Meza Luis, para la combinación de hipoclorito de sodio con peróxido de hidrógeno se deben adicionar 2,5 kg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/kg CN<sup>-</sup> con 5 kg NaOCl/kg CN<sup>-</sup> se obtiene degradación de cianuro hasta los límites permisibles<sup>197</sup>. Por otro lado, considerando lo que afirma Awan Muhammad “El oxidante de hipoclorito de calcio es potencialmente más eficiente que el hipoclorito de sodio”<sup>198</sup>.

- **Reducción de cromo:** En la revisión bibliográfica se determinan los pH y tiempo de reacción adecuados para el proceso de reducción de cromo los cuales se pueden observar en el Cuadro 8. En la Reacción 8 se observa la reducción de cromo hexavalente a cromo trivalente.

**Cuadro 8.** Condiciones adecuadas para reducción de cromo hexavalente a cromo trivalente.

	<b>pH adecuado de reducción</b>	<b>Tiempo de reacción</b>
<b>Reducción de cromo hexavalente a cromo trivalente</b>	<3 <sup>199 200</sup> 2 <sup>201</sup> 2 - 3 <sup>202 203</sup> 2 - 2,5 <sup>204</sup>	30 <sup>205 206</sup> - 45 minutos <sup>207</sup>

**Fuente:** elaboración propia

<sup>197</sup> GAVIRIA, Ana y MEZA, Luis. Análisis de alternativas para la degradación del cianuro en efluentes líquidos y sólidos del municipio de Segovia, Antioquia y en la planta de beneficio de la empresa mineros Nacionales, municipio de Marmato, Caldas. Dyna. [en línea]. 2006, January. 73 (149). p. 31. [Consultado 17 enero de 2019]. ISSN 00127353.

<sup>198</sup> AWAN, M. A. Reduction of Chemical Oxygen Demand from Tannery wastewater by oxidation. Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry. [en línea]. 2004. 3 (1), p. 625-628.

<sup>199</sup> ROMERO ROJAS, Op. cit., p 151.

<sup>200</sup> AYRES, David; DAVIS, Allen y GIETKA, Paul. Removing Heavy metals from wastewater. Universidad de Maryland. [en línea]. 1994. p.19. En: Bluevantage. [sitio web]. Bluevantage. [Consulta 15 enero de 2019]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.bluevantage.net/userdata/userfiles/file/Heavy%20Metals%20Removal.pdf>.

<sup>201</sup> KARALE, R.S; WADKAR, D.V y NANGARE, P.B. Removal and recovery of hexavalent chromium from industrial waste water by precipitation with due consideration to cost optimization. Journal of Environmental Research and Development. [en línea]. 2007. p. 215. [Consulta 17 enero de 2019]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.jerad.org/ppapers/download.php?vl=2&is=2&st=209>

<sup>202</sup> RAMAKRISHNAIAH, C.R y PRATHIMA, B. Hexavalent Chromium Removal by Chemical Precipitation Method: A Comparative Study. International Journal of Engineering Research and Applications. [en línea]. 2011, January. 1 (1), p 42. ISSN 2493131.

<sup>203</sup> GARCIA, Jorge Ulises. Tratamiento de aguas residuales en la industria galvánica. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. [en línea]. Trabajo de grado ingeniero químico, 1997. p.76-77. [Citado el 24 de enero del 2019]. Disponible en: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/2242>.

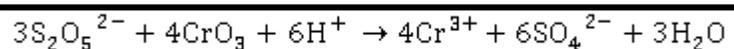
<sup>204</sup> CHANG, Li-Yang. Alternative chromium reduction and heavy metal precipitation methods for industrial wastewater. Environmental Progress. [en línea]. 2003, October. 22(3), p. 177. [Consultado 17 enero de 2019]. DOI: <https://doi.org/10.1002/ep.670220315>

<sup>205</sup> KARALE, Op. cit., p 215.

<sup>206</sup> PHILIPP, C.T. Wastewater treatment. Metal Finishing. [en línea]. 1995, January. 93 (1). p 738. [Consultado 17 enero de 2019]. ISSN 00260576 DOI: [https://doi.org/10.1016/0026-0576\(95\)93417-Z](https://doi.org/10.1016/0026-0576(95)93417-Z).

<sup>207</sup> AYRES, Op. cit., p 20.

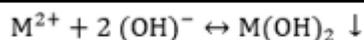
**Reacción 8.** Reducción de cromo hexavalente a cromo trivalente con metabisulfito de sodio.



**Fuente:** CHANG, Li-Yang. Alternative chromium reduction and heavy metal precipitation methods for industrial wastewater. *Environmental Progress*. [en línea]. 2003, October. 22(3), p. 175. [Consultado 17 enero de 2019]. DOI: <https://doi.org/10.1002/ep.670220315>.

- **Precipitación de metales:** En la revisión bibliográfica se determinan los pH y tiempo de reacción adecuados para el proceso de precipitación de metales, los cuales se pueden observar en el Cuadro 9. En la Reacción 9, se observa como los iones metálicos disueltos y el precipitante reacciona.

**Reacción 9.** Precipitación Química.



**Fuente:** WANG, L.K, et al. Chemical precipitation. En: *Physicochemical Treatment Processes*. p. 141-198. [En línea]. New Jersey: Human Press, 2004 (3). [Citado el 19 de diciembre de 2018]. ISBN 9781592598205. DOI: <https://doi.org/10.1385/1-59259-820-x:141>

**Cuadro 9.** Condiciones adecuadas para la precipitación de metales.

Metales	pH adecuado de precipitación	Tiempo de reacción	Mejoras e inconvenientes
Plata	9-12 <sup>208 209</sup>		
Mercurio	7-11 <sup>210</sup>		

<sup>208</sup> AMER, Op. cit.

<sup>209</sup> AYRES, Op. cit., p 8.

<sup>210</sup> U.S. Environmental Protection Agency, Office of Superfund Remediation and Technology Innovation. Treatment technologies for mercury in soil, waste, and water. 2007. p 7-3. En: U.S. Environmental Protection Agency. [sitio web]. EPA. [Consulta 25 enero de 2019]. Archivo pdf. Disponible en: <https://clu-in.org/download/remed/542r07003.pdf>.

**Cuadro 9. (continuación)**

<b>Metales</b>	<b>pH adecuado de precipitación</b>	<b>Tiempo de reacción</b>	<b>Mejoras e inconvenientes</b>
<b>Cromo</b>	8,5-9,5 <sup>211</sup> 8 a 9 <sup>212 213</sup> 8,5-10 <sup>214</sup>	25 min <sup>215</sup> 45 min <sup>216</sup> 60 min <sup>217</sup>	Se puede mejorar la precipitación de este agregando H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <sup>218</sup>
<b>Cadmio</b>	9-12 <sup>219 220</sup> 10 <sup>221</sup> 8 -10 <sup>222</sup> 9,4 <sup>223</sup> 9-11 <sup>224</sup>	1 hora <sup>225</sup>	La precipitación de cadmio se inhibe en presencia de cianuro <sup>226</sup> .

<sup>211</sup> ROMERO ROJAS, Op. cit., p 151

<sup>212</sup> RAMAKRISHNAIAH, C.R y PRATHIMA, B. Hexavalent chromium removal from industrial wastewater by chemical precipitation method. International Journal of Engineering Research and Applications [en línea]. 2012, April. 2 (2), p 600. ISSN 22489622.

<sup>213</sup> CHANG, Op. cit., p 177.

<sup>214</sup> RODRIGUEZ, Juan Pablo. Precipitación química convencional: remoción simultánea de cromo total y plomo de un agua residual proveniente de una industria de galvanizado, en Bogotá, Colombia. 2011, 30 (2). p 148. En: Universidad Tecnológica del Chocó. [sitio web]. Revistas.utch. [Consulta 18 enero de 2019]. Archivo pdf. Disponible en: <https://revistas.utch.edu.co/ojs5/index.php/revinvestigacion/article/viewFile/303/292>.

<sup>215</sup> RAMAKRISHNAIAH, Hexavalent chromium removal from industrial wastewater by chemical precipitation method. Op. cit., p 600.

<sup>216</sup> KARALE, Op. cit., p 214.

<sup>217</sup> RAMAKRISHNAIAH, Hexavalent Chromium Removal by Chemical Precipitation Method: A Comparative Study. Op. cit., p 44.

<sup>218</sup> INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA. Chemical Precipitation Processes for the Treatment of Aqueous Radioactive Waste. p 13. [En línea]. VIC Library Cataloguing, 1992. [Citado el 18 de enero de 2019]. ISBN 9201019920. Disponible en: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/23/064/23064538.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/23/064/23064538.pdf).

<sup>219</sup> ROMERO ROJAS, Op. cit., p 144.

<sup>220</sup> AYRES, Op. cit., p 11.

<sup>221</sup> SAKI, Parastoo; MAFIGHOLAMI, Roya y TAKDASTAN, Afshin. Removal of cadmium from industrial wastewater by steel slag. Jundishapur Journal of Health Sciences. [en línea]. 2013.5 (1). p .31. . En: Scientific Information Database. [sitio web]. SID. [Consulta 18 enero de 2019]. Archivo pdf. Disponible en: <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=331424>.

<sup>222</sup> POON, Op. cit., p 128.

<sup>223</sup> MEUNIER, Nathalie, et al. Comparison between electrocoagulation and chemical precipitation for metals removal from acidic soil leachate. Journal of Hazardous Materials. [en línea]. 2006, September. 137 (1), p. 585. [Consultado 19 enero de 2019]. ISSN 03043894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.050>.

<sup>224</sup> AQUACHEM INC. [sitio web]. AMER, Sultan.I. Tratamiento de Acabados Metálicos de Aguas Residuales. [Consulta 25 enero 2019]. Disponible en: <http://www.aquachem-inc.com/w-metalfinishing.htm>.

<sup>225</sup> CAVIEDES, D. MUÑOZ, R. PERDOMO, A. RODRIGUEZ, D. y SANDOVA, I. Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Una Revisión. Revista Ingeniería y Región. [en línea]. 2015, September. 13 (1) p 80. [Consultado 19 enero de 2019]. DOI:10.25054/22161325.710.

<sup>226</sup> POON, Op. cit., p 128.

**Cuadro 9. (continuación)**

<b>Metales</b>	<b>pH adecuado de precipitación</b>	<b>Tiempo de reacción</b>	<b>Mejoras e inconvenientes</b>
<b>Níquel</b>	>9,5 <sup>227</sup> 7,5 – 10,5 <sup>228</sup> 9-11 <sup>229</sup> 9-11 <sup>230</sup> 12 <sup>231</sup> 7,5 -12 <sup>232</sup>	1 hora <sup>233</sup>	Se puede mejorar la precipitación de este agregando H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <sup>234</sup>
<b>Plomo</b>	9-10 <sup>235</sup> 7-11 <sup>236</sup> 9-11 <sup>237</sup> 9-9,5 <sup>238</sup> 8-10,5 <sup>239</sup>	1 hora <sup>240</sup>	

**Fuente:** elaboración propia

Tal como se observa, teniendo en cuenta la revisión bibliográfica anteriormente expuesta, con respecto al proceso actualmente realizado, se determina en cada una de las etapas:

- Etapa 1 (precipitación de metales): no se tiene en cuenta el pH adecuado para la precipitación de los mismos, ya que la velocidad de reacción aumenta porque las solubilidades de los diversos hidróxidos metálicos se minimizan en el rango de pH entre 8.0 y 11.0<sup>241</sup>.
- Etapa 2 (oxidación de cianuro): no se cuenta con la dosificación correcta de peróxido de hidrógeno e hipoclorito de calcio, puesto que no se está

<sup>227</sup> ROMERO ROJAS, Op. cit., p 153.

<sup>228</sup> KURNIAWAN, Op. cit., p. 84.

<sup>229</sup>MCANALLY, Stephen; BENEFIELD, Larry y REEDM, Russell. Nickel Removal from a Synthetic Nickel-Plating Wastewater Using Sulfide and Carbonate for Precipitation and Coprecipitation. Separation Science and Technology. [en línea]. 1984, February. 19 (2). p. 191- 217. [Consultado 16 enero de 2019]. DOI: 10.1080/01496398408060655.

<sup>230</sup> AMER, Op. cit.

<sup>231</sup> CAVIEDES, Op. cit., p 80.

<sup>232</sup> AYRES, Op. cit., p 9.

<sup>233</sup> CAVIEDES, Op. cit., p 80.

<sup>234</sup> RODRIGUEZ, Op. cit., p. 148.

<sup>235</sup> ROMERO ROJAS, Op. cit., p 153

<sup>236</sup> CHEN, Q.Y, et al. Precipitation of heavy metals from wastewater using simulated flue gas: sequent additions of fly ash, lime and carbon dioxide. Water Research. [en línea]. 2009, June. 43 (10), p .2605-2614. [Consultado 25 enero de 2019]. ISSN 00431354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.007>.

<sup>237</sup>KARIMI, Habid. Effect of pH and Initial pb(II) Concentration on The Lead Removal Efficiency from Industrial Wastewater Using Ca(OH)<sub>2</sub>. International Journal of Water and Wastewater Treatment. [en línea]. 2017, January. 3 (2), p. 2. [Consultado 25 enero de 2019]. ISSN 23815299 DOI: 10.16966/2381-5299.139

<sup>238</sup> RODRIGUEZ, Op. cit., p 148.

<sup>239</sup> AYRES, Op. cit., p 10.

<sup>240</sup> CAVIEDES, Op. cit., p 80.

<sup>241</sup> FU, Op. cit., p. 408.

determinando la concentración inicial de cianuro de cada lote de agua a tratar, por tanto, el panel de control no indica la cantidad de reactivos adecuada. Igualmente, no se está teniendo en cuenta el pH apropiado para que la reacción ocurra, ya que generalmente este se realiza entre 9-11 <sup>242</sup>

- Etapa 3 (reducción de cromo): a pesar de que en esta etapa actualmente se tiene en cuenta un pH de 3 a 4 para agregar metabisulfito, según Ramakrishnaiah, C el pH adecuado es de 2 a 3<sup>243</sup>, además no se realiza la correcta dosificación, ya que no se evidencia cambio de color que indique la reducción de cromo hexavalente a cromo trivalente.
- Etapa 4 (precipitación de cromo): no se emplea un pH apropiado para llevar a cabo la precipitación de cromo trivalente anteriormente reducido, debido a que actualmente se realiza a pH de 7, mientras que este debe llevarse a cabo entre 8 a 9<sup>244</sup>.

De acuerdo a la revisión bibliográfica y los problemas encontrados, se realiza un desarrollo pre-experimental, teniendo en cuenta el orden del proceso actual que se compone de las siguientes 3 etapas: 1) precipitación de metales, 2) oxidación de cianuro con peróxido de hidrógeno e hipoclorito de calcio y 3) reducción y precipitación de cromo; con la adecuación y modificaciones en el pH y tiempo de reacción observados en el Cuadro 7, Cuadro 8 y Cuadro 9; con el fin de evaluar en que cantidad reducen los contaminantes en cada una de las etapas del proceso que se está llevando actualmente, con las condiciones adecuadas .

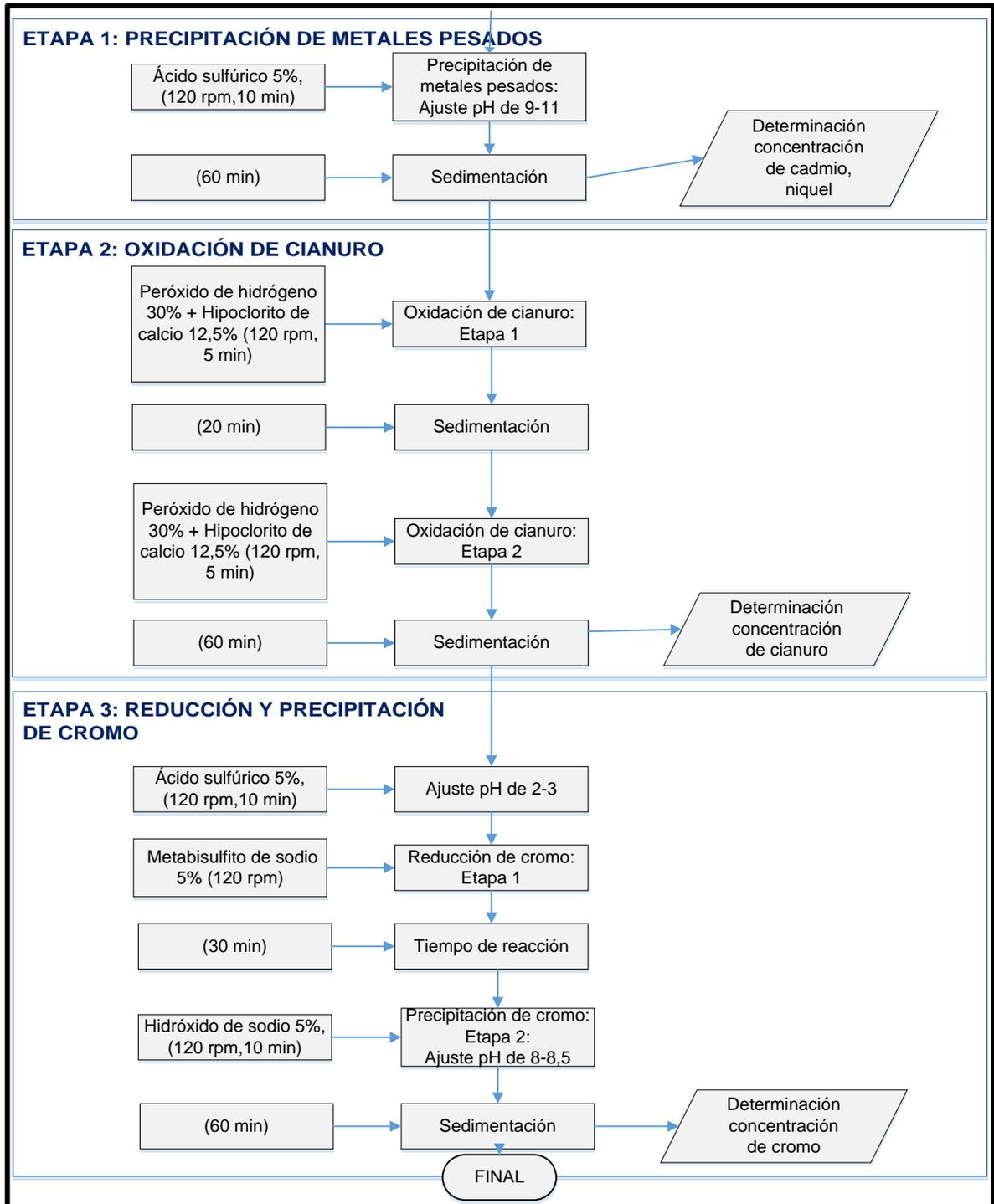
---

<sup>242</sup> TEIXEIRA, Op. cit., p 57.

<sup>243</sup> RAMAKRISHNAIAH, Hexavalent chromium removal from industrial wastewater by chemical precipitation method. Op. cit., p 600.

<sup>244</sup> *Ibíd.*, p 600

Figura 36. Desarrollo pre-experimental tratamiento actual.



Fuente elaboración propia

Se evalúa en cada una de las etapas del proceso realizado actualmente en la PTAR (Figura 36), los parámetros más relevantes, para la etapa de precipitación química se evalúa dentro de los metales pesados cadmio y níquel, dado que estos son los que incumple con los parámetros requeridos por la resolución 0631 del 2015, realizados en el Laboratorio Quimicontrol LTDA (Anexo D). Además, se evalúa en la etapa de oxidación de cianuros la concentración de este mediante el test kit Nanocolor® Cyanid 08 (Anexo E). Finalmente, en la etapa de reducción de cromo se evalúa la concentración final de cromo hexavalente con el fin de observar si logra reducirse en la etapa, mediante el test kit Visocolor® ECO (Anexo F), los resultados obtenidos de estos se encuentran disponibles en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Parámetros evaluados por etapa.

Etapa	Parámetro		% Porcentaje de remoción	Resolución 0631 de 2015
1: Precipitación de metales	Cadmio (ppm)	1,78	50,14	0,05
	Níquel (ppm)	3,34	10,17	0,5
3: Oxidación de cianuro	Cianuro (ppm)	0,12	98,54	0,1
2: Reducción y precipitación de cromo	Cromo (ppm)	0,52	96,29	0,5

\*Parámetros que incumplen la norma 0631 del 2015

**Fuente:** elaboración propia

Basándose en los resultados obtenidos (Tabla 3), se observa que ninguno de los parámetros evaluados cumple con la resolución 0631 de 2015, además sus porcentajes de remoción de cadmio y níquel no son representativos, después de realizar el tratamiento con condiciones adecuadas, teniendo en cuenta el orden que actualmente se lleva a cabo, mostrando de esta forma que se requiere tener en cuenta la secuencia ya mencionada según la revisión bibliográfica para evidenciar mejores resultados en la disminución de estos parámetros. .

### 3. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO PARA LA DISMINUCIÓN DE METALES PESADOS Y CIANURO

El capítulo previo permite identificar mediante los análisis realizados anteriormente por la FAC, que el proceso realizado actualmente para el agua proveniente del taller de electroquímica no permite que los parámetros cumplan con la resolución 0631 de 2015 dado que es objetivo principal de este proyecto plantear una alternativa; en el presente capítulo se analizan posibles alternativas de manera teórica para tratamiento de agua con metales pesados y cianuro, consideradas tanto por los proyectantes como por la FAC para la posterior selección por medio de una matriz con el método de sumas ponderadas.

#### 3.1 PLANTEAMIENTO DE LAS ALTERNATIVAS

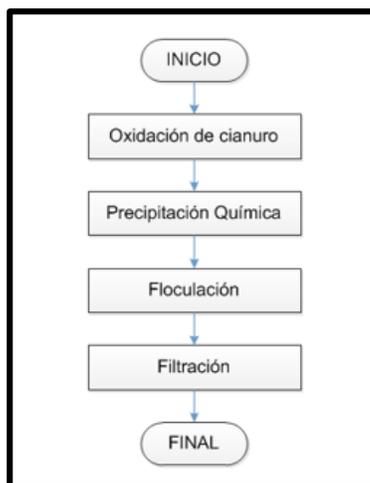
Esta se basó teniendo en cuenta revisión bibliográfica con el fin de proponer alternativas de tratamiento de aguas residuales galvánicas, que reduzcan contaminantes como cianuros y metales pesados.

**3.1.1 Alternativa A: Mejoramiento del proceso actual.** Esta se basa en el tratamiento de oxidación de cianuro y precipitación química, pero se deben tener en cuenta mejoras y modificaciones, ya que el mismo no se está realizando de manera adecuada, por tal razón se tienen en cuenta los siguientes puntos.

- Modificación de pH para oxidación de cianuros, reducción de cromo y precipitación de metales.
- Determinación de dosificación adecuada para los reactivos químicos utilizados en el proceso.
- Adecuación del orden de las etapas.
- Adición de etapa de floculación, con el objetivo de aumentar la velocidad de sedimentación, debido a que actualmente la FAC está aumentando la demanda en reparación de piezas aeronáuticas de fuerzas militares a nivel Sur América.

Por tal motivo, el proceso se compone de las siguientes etapas (Figura 37): oxidación de cianuro, precipitación química, floculación, filtración.

**Figura 37.** Diagrama de bloques Alternativa A.



**Fuente:** elaboración propia

A continuación, en el Cuadro 10 se exponen ventajas y desventajas del proceso encontradas mediante una revisión bibliográfica teniendo las condiciones y orden del tratamiento adecuado.

**Cuadro 10.** Ventajas y desventajas Alternativa A.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo de capital de inversión<sup>245</sup></li> <li>• Operación simple<sup>246</sup>, facilidad para controlar el pH<sup>247</sup></li> <li>• Se puede realizar por lotes o en proceso continuo<sup>248</sup></li> <li>• Porcentaje de disminución de Cromo (Cr<sup>+3</sup>) y Níquel (Ni<sup>+2</sup>) superior al 95%<sup>249</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Generación de lodos en especial alcalinos<sup>250</sup>.</li> <li>• Es necesario usar un tratamiento preliminar que convierta el (Cr<sup>+6</sup>) a (Cr<sup>+3</sup>)<sup>251</sup></li> <li>• El costo de este tratamiento puede ser elevado por los reactivos usados<sup>252</sup></li> </ul>

**Fuente:** elaboración propia

<sup>245</sup> KURNIAWAN, Op. cit., p. 83-98.

<sup>246</sup> *Ibíd.*, p. 83-98.

<sup>247</sup> HUISMAN, Op. cit., p. 106.

<sup>248</sup> CORREDOR, Op. cit., p. 27.

<sup>249</sup> SOTO REGALADO, Eduardo, et al. Remoción de metales pesados en aguas residuales mediante agentes químicos. 2004. p. 3-6 En: UANL Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Químicas. [sitio web]. México: UANL. [Consulta 25 enero de 2019]. Archivo pdf. Disponible en: [www.ingenierias.uanl.mx/23/pdfs/23\\_p46a51\\_soto.pdf](http://www.ingenierias.uanl.mx/23/pdfs/23_p46a51_soto.pdf).

<sup>250</sup> KURNIAWAN, Op. cit., p. 83-98.

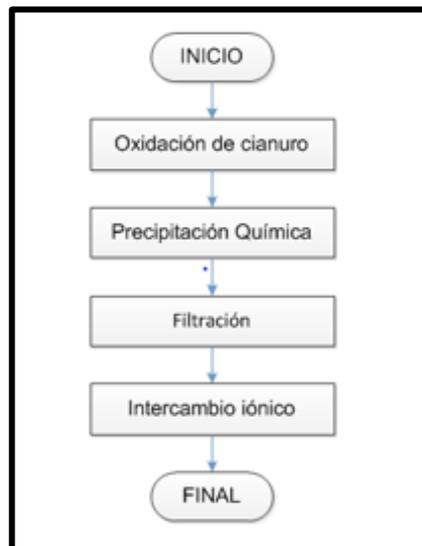
<sup>251</sup> CORREDOR, Op. cit., p. 27.

<sup>252</sup> NOGUEROL ARIAS, Joan; VALIENTE MALMAGRO, Manuel y MURAVIEV, Dimitri. Tecnologías Limpias Para La Reducción De Contaminantes y La Recuperación De Solutos De Fuentes Hidrominerales Mediante Resinas De Intercambio Iónico. [en línea]. Tesis doctoral. Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona, 2008. p. 59-60. [Citado el 26 de enero del 2019]. ISBN 9788469132951. Disponible en: <https://ddd.uab.cat/record/36674/?ln=en>.

**3.1.2 Alternativa B: Intercambio Iónico.** Esta alternativa presenta una mayor reducción de metales pesados y contempla la oportunidad de reusar el agua en el proceso productivo, pero implica un proceso de oxidación de cianuro y precipitación química antes de realizar intercambio iónico, debido a que concentraciones mayores a 10 ppm pueden afectar la membrana del intercambiador<sup>253</sup>. Se debe tener en cuenta que como el agua residual contiene metales pesados y cianuro en gran concentración, se hace necesario el uso de una resina que permita la reducción de los mismos, es por esto que se requiere una resina selectiva para estos contaminantes, ya que las resinas catiónicas y aniónicas empleadas usualmente no presenta altos rendimientos para reducción de metales y cianuro.

Por tal motivo, el proceso se compone de las siguientes etapas (Figura 38): oxidación de cianuro, precipitación química, filtración, intercambio iónico.

**Figura 38.** Diagrama de bloques Alternativa B.



**Fuente:** elaboración propia

A continuación, en el Cuadro 11 se exponen ventajas y desventajas del proceso.

<sup>253</sup> STEFAN, Neumann. Ion Exchange Resins in the Electroplating Industry. Metal Finishing. [en línea]. 2012, March. 110 (2), p. 25. [Consultado 25 enero de 2019]. DOI: 10.1016/S0026-0576(13)70111-9

**Cuadro 11.** Ventajas y desventajas Alternativa B.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buena remoción de una amplia gama de metales pesados<sup>254</sup>.</li> <li>• Las resinas son estables químicamente, teniendo una larga duración y de fácil regeneración<sup>255</sup></li> <li>• Remueve iones como CN<sup>-</sup> y también iones metálicos como Cu<sup>++</sup> y Ni<sup>++</sup><sup>256</sup></li> <li>• En industria galvánica esta tecnología es usada para adecuar el agua de tratamiento a condiciones óptimas de agua potable<sup>257</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede eliminar concentraciones bajas de metales pesados presentes en aguas residuales<sup>258</sup></li> <li>• Posee alto costo operativo y de mantenimiento debido al alto precio de los regenerantes y de las resinas <sup>259</sup></li> <li>• Si se aumenta la cantidad de iones disueltos en el agua, será necesario aumentar el número de paradas del sistema para la regeneración del mismo<sup>260</sup></li> <li>• Tiene una vida útil de 5 a 10 años<sup>261</sup></li> </ul>

**Fuente:** elaboración propia

**3.1.3 Alternativa C: Electrocoagulación.** Este proceso muestra buenos resultados para la remoción de metales pesados de aguas galvánicas, sin embargo, implica altos costos de inversión, debido a que requiere de celdas de electrocoagulación y sales para que la reacción ocurra de manera apropiada, además de suministro de corriente eléctrica controlada (Cuadro 12).

Por tal motivo, el proceso se compone de las siguientes etapas (Figura 39): modificación de pH a 7<sup>262</sup>, electrocoagulación, sedimentación, filtración.

<sup>254</sup> AHMARUZZAMAN, M. Role of Fly Ash in the Removal of Organic Pollutants from Wastewater. Energy Fuels. [en línea]. 2009, February. 23 (3), p. 1499. [Consultado 25 enero de 2019]. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef8002697>.

<sup>255</sup> AYALA, Op. cit., p 124.

<sup>256</sup> *Ibíd.*, p 136.

<sup>257</sup> *Ibíd.*, p 136.

<sup>258</sup> NOGUEROL, Op. cit., p 37.

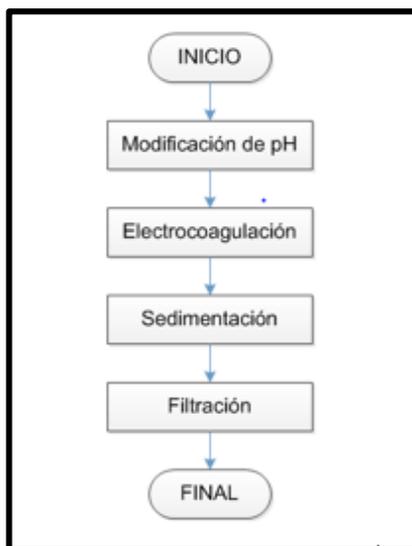
<sup>259</sup> BABICHE, Carlos. Intercambio iónico vs osmosis inversa. Industrial Data. [en línea]. 2014. 3 (1). p. 6. [Consultado 26 enero de 2019]. DOI: 10.15381/idata.v3i1.6571.

<sup>260</sup> *Ibíd.*, p 6.

<sup>261</sup> AYALA, Op. cit., p 125.

<sup>262</sup> RESTREPO, Ana; ARANGO, Álvaro y GARCÉS, Luis. La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. Producción Limpia. [en línea]. 2006, Diciembre. 1 (2). p.70. [Consultado 26 enero de 2019]. ISSN 19090455.

**Figura 39.** Diagrama de bloques Alternativa C.



**Fuente:** elaboración propia

A continuación, en el Cuadro 12 se exponen ventajas y desventajas del proceso.

**Cuadro 12.** Ventajas y desventajas Alternativa C.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proceso rápido y eficaz para ciertos iones metálicos<sup>263</sup>.</li> <li>• Puede ser un proceso continuo o por lotes<sup>264</sup></li> <li>• Es un sistema automático que no requiere de mucho espacio <sup>265</sup></li> <li>• En comparación con las aguas a tratar con químicos, las aguas de electrocoagulación tienen menos cantidad de sólidos disueltos<sup>266</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altos costos energéticos y formación de subproductos<sup>267 268</sup>.</li> <li>• Cuando no se tienen sales presentes en el agua a tratar es necesario agregar reactivos para la formación de las mismas, con el fin de tener una alta conductividad<sup>269</sup></li> <li>• Los electrodos deben ser reemplazados con regularidad a modo de evitar la oxidación<sup>270</sup></li> </ul>

<sup>263</sup> AHMARUZZAMAN, Op. cit., p. 1499.

<sup>264</sup> CORREDOR, Op. cit., p 31.

<sup>265</sup> VELASQUEZ, Op. cit., p 31.

<sup>266</sup> MOLLAH, Electrocoagulation (EC) —Science and Applications. Journal of Hazardous Materials. [en línea]. 2001, June.84 (1), p. 29-41. [Consultado 28 enero de 2019]. ISSN 03043894. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00176-5).

<sup>267</sup> AHMARUZZAMAN, Op. cit., p. 1499.

<sup>268</sup> CORREDOR, Op. cit., p 31.

<sup>269</sup> *Ibíd.*, p 31

<sup>270</sup> *Ibíd.*, p 31.

**Cuadro 12. (Continuación)**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Baja producción de lodos<sup>271</sup> que se pueden separar posteriormente por filtración, decantación o flotación<sup>272</sup>.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Es necesario realizar mantenimiento periódico de la celda y los electrodos <sup>273</sup></li><li>• Los electrodos de hierro usados para la eliminación de Cr (IV) y otros metales no ferrosos como Zn, Cu, Ni, Cd, Cr (III), entre otros, permiten concentración de Cr (IV) hasta 100 mg/L; y la concentración total de metales no ferrosos de hasta 100 mg/L<sup>274</sup>.</li><li>• Alta inversión de capital inicial<sup>275</sup>.</li></ul>

**Fuente:** elaboración propia

### **3.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS**

Para la selección de la alternativa, se establecieron criterios que permitieron evaluar las alternativas planteadas, teniendo en cuenta la importancia dada por la FAC (Anexo G) y revisión bibliográfica<sup>276</sup>. Posteriormente, se utilizó una matriz de selección para elegir la alternativa.

**3.2.1 Criterios de selección.** Para seleccionar los métodos de tratamiento de agua se deben tener en cuenta factores como inversión, costos operativos, facilidad de uso, fiabilidad y requisitos de espacio<sup>277</sup>. De tal forma que se tienen en cuenta criterios económicos, técnicos y operativos de los tratamientos de agua a los cuales se les atribuye un porcentaje de ponderación (Cuadro 13).

De igual forma, se considera una serie de factores para cada criterio establecido y se asigna una escala de 1 a 3 dependiendo de la importancia que cada alternativa tiene con respecto a cada uno de estos, siendo el número 3 el más favorable para la alternativa.

<sup>271</sup> FU, Fenglian, Op. cit., p 415.

<sup>272</sup> CORREDOR, Op. cit., p 28.

<sup>273</sup> *Ibíd.*, p 31

<sup>274</sup> SILLANPÄÄ, Op. cit., p 74

<sup>275</sup> FU, Fenglian, Op. cit., p 415.

<sup>276</sup> MARTÍNEZ, Op. cit., p 60

<sup>277</sup> STEFAN, Op. cit., p. 22.

**Cuadro 13.** Criterios de selección.

<b>Criterios</b>	<b>Valor</b>
Económico	40%
Técnico	30%
Operativo	30%
<b>Total</b>	<b>100%</b>

**Fuente:** elaboración propia

Dentro de los criterios económicos se tiene en cuenta:

- **Inversión:** este factor hace referencia a los costos iniciales requeridos en equipos y reactivos para cada una de las alternativas, por tanto, la alternativa seleccionada debe implicar bajos costos de inversión, como se observa en el Cuadro 14.

**Cuadro 14.** Inversión.

<b>Inversión</b>	
Costo alto (>\$5.000.000)	1
Costo medio (2.000.000-5.000.000)	2
Costo bajo (<2.000.000)	3

**Fuente:** elaboración propia

- **Costos de operación y mantenimiento:** este factor hace referencia a la disposición, periodicidad y costo de mantenimiento y/o repuestos, requeridos por cada alternativa, se requiere que este sea bajo para la alternativa seleccionada, como se observa en el Cuadro 15.

**Cuadro 15.** Costos de operación y mantenimiento.

<b>Costos de operación y mantenimiento</b>	
Costo alto (>\$3.000.000)	1
Costo medio (1.000.000- 3.000.000)	2
Costo bajo (<1.000.000)	3

**Fuente:** elaboración propia

- **Consumo energético:** hace referencia al consumo energético de los equipos requeridos por cada propuesta, la alternativa seleccionada debe presentar bajo consumo de energía, como se observa en el Cuadro 16.

**Cuadro 16.** Consumo energético.

<b>Consumo energético</b>	
Alto (>1000Kw/h)	1
Medio (500 kW/h - 1000kW/h)	2
Bajo (< 500kW/h)	3

**Fuente:** elaboración propia

Dentro de los criterios técnicos se tiene en cuenta:

- **Requerimiento de espacio:** este tiene en cuenta el espacio ocupado por los equipos que involucra cada alternativa, se busca que la alternativa seleccionada cuente con bajo requerimiento de espacio, como se observa en el Cuadro 17.

**Cuadro 17.** Requerimiento de espacio.

<b>Requerimiento de espacio</b>	
Alto ( $\geq 3m^2$ )	1
Medio ( $2m^2$ - $3m^2$ )	2
Bajo ( $\leq 2 m^2$ )	3

**Fuente:** elaboración propia

- **Vida útil de equipos:** este implica el tiempo de utilidad de los equipos empleados para cada alternativa, por tanto, se requiere que la alternativa seleccionada cuente con alta vida útil de sus equipos, como se observa en el Cuadro 18.

**Cuadro 18.** Vida útil de equipos.

<b>Vida útil de equipos</b>	
Bajo (<5 años)	1
Medio (5 -10 años)	2
Alto ( $\geq 10$ años)	3

**Fuente:** elaboración propia

Dentro de los criterios operativos se tiene en cuenta:

- **Rendimiento:** Hace referencia al porcentaje de remoción de los contaminantes presentes, se busca que la alternativa escogida presente alto rendimiento, como se observa en el Cuadro 19.

**Cuadro 19.** Rendimiento.

<b>Rendimiento</b>	
Bajo (<90 %)	1
Medio (90-95%)	2
Alto (>95 %)	3

**Fuente:** elaboración propia

- **Tiempo de operación:** Tiene en cuenta el tiempo empleado por el operario para llevar a cabo el tratamiento, la alternativa seleccionada debe contar con bajo tiempo de operación del operario, como se observa en el Cuadro 20.

**Cuadro 20.** Tiempo de operación.

<b>Tiempo de operación</b>	
Alto ( $\geq 4$ horas)	1
Medio (2-3 horas)	2
Bajo ( $\leq 2$ horas)	3

**Fuente:** elaboración propia

- **Peligrosidad de reactivos:** este factor hace referencia a la peligrosidad que tiene la alternativa con respecto a los reactivos que se emplean en cada una de estas, por tanto, se busca que la alternativa escogida use reactivos de baja peligrosidad, para facilitar la manipulación por parte del operario, y que tenga la menor contaminación ambiental, como se observa en el Cuadro 21.

**Cuadro 21.** Peligrosidad de reactivos.

<b>Peligrosidad de reactivos</b>	
Alto	1
Medio	2
Bajo	3

**Fuente:** elaboración propia

**3.2.2 Matriz de selección.** Se realiza una matriz de selección con los criterios (Cuadro 22, Cuadro 23 y Cuadro 24) y las alternativas planteadas con datos bibliográficos de cada una, los cuales permiten asignar la respectiva valoración con respecto a cada factor.

**Cuadro 22.** Criterios económicos.

<b>Alternativa</b>	<b>Inversión</b>	<b>Costos de operación</b>	<b>Consumo energético</b>
<b>Alternativa A</b>	Incluirá equipos de instalación y cambio de reactivos no superior a \$ 2.000.000 <sup>278</sup>	Posibilidad de gasto excesivo de reactivo <sup>279</sup> . Costos semestrales para mantenimiento de equipos no superior a \$800.000 anuales <sup>280</sup> .	Se requiere un motor agitador y bomba, 308 kW/h <sup>281</sup>
<b>Alternativa B</b>	Costo elevado entre \$4.000.000-\$5.000.000 <sup>282</sup>	Costo de mantenimiento de resinas \$1.700.00-\$2.000.000 <sup>283</sup>	Requiere de 849 KW/h <sup>284</sup>
<b>Alternativa C</b>	Inversión inicial entre \$2.500.000 - \$3.000.000 <sup>285</sup>	Las celdas tienen un costo entre \$1.200.000-\$1.600.000 anuales <sup>286</sup>	Requiere motor del agitador y alimentación de electrocoagulación con consumo de energía de 3.792 kW/h <sup>287</sup>

**Fuente:** elaboración propia

<sup>278</sup> MARTÍNEZ, Op. cit., p 89-94.

<sup>279</sup> NOGUEROL, Op. cit., p 70.

<sup>280</sup> CORREDOR, Op. cit., p 71.

<sup>281</sup> *Ibid.*, p 72.

<sup>282</sup> MARTÍNEZ, Op. cit., p 95-99

<sup>283</sup> LENNTECH. [sitio web]. Rohm and Haas ion exchange resins. [Consulta 21 enero 2019]. Disponible en: [https://www.lenntech.com/products/resins/rohm-haas/rohm-haas-ion-exchange-resins.htm?gclid=CjwKCAjw\\_\\_fnBRANEiwAuFxEt4uof7bAJWwtZeXpn7fKnhesbgiETg0\\_BcZs\\_CzOuuMJYMBDwo0GxoCdNQQAvD\\_BwE](https://www.lenntech.com/products/resins/rohm-haas/rohm-haas-ion-exchange-resins.htm?gclid=CjwKCAjw__fnBRANEiwAuFxEt4uof7bAJWwtZeXpn7fKnhesbgiETg0_BcZs_CzOuuMJYMBDwo0GxoCdNQQAvD_BwE)

<sup>284</sup> MARTÍNEZ, Op. cit., p 96.

<sup>285</sup> ABRIL, Dibar, y LOPEZ, Alexander. Ingeniería básica de una planta a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales en la empresa Quimicaplic Ltda. Mediante el método de electrocoagulación. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá: Universidad América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2009. p.103.

<sup>286</sup> *Ibid.*, p 101-106.

<sup>287</sup> MARTÍNEZ, Op. cit., p 96.

**Cuadro 23. Criterios Técnicos.**

<b>Alternativa</b>	<b>Requerimiento de espacio</b>	<b>Vida útil de equipos</b>
<b>Alternativa A</b>	Ya se cuenta con el espacio necesario para este proceso. Depende de la cantidad de tanques requeridos.	Mayor a 10 años <sup>288</sup> .
<b>Alternativa B</b>	Requerimiento de 2m <sup>2</sup> <sup>289</sup>	Las resinas tienen vida útil de 5 a 10 años <sup>290</sup> .
<b>Alternativa C</b>	Se requiere de un área de almacenamiento para celdas no mayor a 1m <sup>2</sup> <sup>291</sup>	Las celdas tienen tiempo de vida de 1 año <sup>292</sup>

**Fuente:** elaboración propia

**Cuadro 24. Criterios Operativos.**

<b>Alternativa</b>	<b>Eficiencia</b>	<b>Tiempo de operación</b>	<b>Peligrosidad de reactivos</b>
<b>Alternativa A</b>	Teniendo en cuenta operaciones previas realizadas de manera adecuada se tienen eficiencias de más del 95% de sólidos suspendidos y disueltos <sup>293</sup> .	Requiere operario de 2 horas para realizar tratamiento <sup>294</sup> .	Requiere neutralizantes básicos y ácidos, reductor de cromo (sales), y floculantes <sup>295</sup>

<sup>288</sup> SYNERTECH. [sitio web]. Tanques de almacenamiento de agua. [Consulta 21 enero 2019]. Disponible en: <https://www.nyfdecolombia.com/tanques/tanques-de-almacenamiento-de-agua>.

<sup>289</sup> CORREDOR, Op. cit., p 71.

<sup>290</sup> AYALA, Op. cit., p 125.

<sup>291</sup> CORREDOR, Op. cit., p 71.

<sup>292</sup> ABRIL, Op. cit., p 103.

<sup>293</sup> BAUTISTA, Deissy. NIETO, Duvan. Desarrollo de la propuesta para el tratamiento de las aguas residuales, de la empresa Extrusiones SCHULER Ltda. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2010.p. 106-112.

<sup>294</sup> CORREDOR, Op. cit., p 71.

<sup>295</sup> *Ibid.*, p 72.

**Cuadro 24. (Continuación)**

<b>Alternativa</b>	<b>Eficiencia</b>	<b>Tiempo de operación</b>	<b>Peligrosidad de reactivos</b>
<b>Alternativa B</b>	Remoción de metales pesados >95% <sup>296</sup> .	Se requiere de un operario, con un proceso de operación de 2 horas aproximadamente <sup>297</sup> .	Requiere de resinas de intercambio
<b>Alternativa C</b>	Remueve contaminantes de 95% - 98% <sup>298</sup>	Requiere tiempo por operador inferior a 4 horas <sup>299</sup> . Se requiere de operador capacitado para manipular electricidad dependiendo las condiciones que se tengan de agua de proceso <sup>300</sup> .	Requiere de sales necesarias para la reacción <sup>301</sup> .

**Fuente:** elaboración propia

La puntuación total de cada alternativa planteada se obtiene por medio de la Ecuación 1, la cual corresponde al método de factores ponderados.

**Ecuación 1.** Factores ponderados.

$$S_j = \sum_{i=1}^m W_i * F_{ij}$$

**Fuente:** ROSALER, Robert y Rice, James. Manual de mantenimiento industrial. México D.F.: Mc Graw- Hill, 1993. Vol. 1. p. 1-33. ISBN 968-451-617-7.

Donde,

$S_j$ : Puntuación global de cada alternativa

$W_i$ : Peso ponderado de cada factor

$F_{ij}$ : Puntuación de las alternativas j por cada uno de los factores i

<sup>296</sup> LENNTECH. Rohm and Haas ion exchange resins, A. Op. cit.

<sup>297</sup> CORREDOR, Op. cit., p 71.

<sup>298</sup> ACOSTA NIÑO, Gema Eunice, et al. La electrocoagulación como un tratamiento eficiente para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales. Revista Facultad de Ciencias Básicas. [en línea]. 2013. 9, (2), p. 312-313. [Consultado 30 enero de 2019]. ISSN 19004699.

<sup>299</sup> ABRIL, Op. cit., p 102.

<sup>300</sup> CORREDOR, Op. cit., p 72.

<sup>301</sup> *Ibíd.*, p 72.

**Tabla 4.** Matriz de factores ponderados

Criterio / Alternativas			Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
Económico 40%	13,33%	Inversión	2	2	2
	13,33%	Costos de operación	3	2	2
	13,33%	Consumo energético	3	2	1
Técnico 30%	15%	Requerimiento de espacio	2	1	3
	15%	Vida útil de equipos	3	2	1
Operativo 30%	10%	Rendimiento	2	3	3
	10%	Tiempo de operación	3	3	1
	10%	Peligrosidad de reactivos involucrados	2	3	3
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>Ponderación</b>	<b>2,52</b>	<b>2,15</b>	<b>1,97</b>

**Fuente:** elaboración propia

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la matriz presentes en la Tabla 4, por medio del método de factores ponderados, se establece que la alternativa más favorable para la implementación de la FAC, considerando los criterios económicos, operativos y técnicos mencionados anteriormente, corresponde a alternativa A, siendo ésta el mejoramiento del tratamiento actual, dado que presenta un valor de 2,52, el cual es superior a los obtenidos por las otras alternativas.

## 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se desarrolla de manera experimental, la alternativa seleccionada anteriormente, además de la toma de muestra, caracterización del agua y determinación de reactivos a emplear, su dosificación y las condiciones del proceso.

### 4.1 TOMA DE MUESTRA

Teniendo en cuenta que la producción de agua residual en el taller de electroquímica depende de la demanda de piezas aeronáuticas y de la realización del recubrimiento acorde a la necesidad de la misma, lo cual quiere decir que no todos los días se realizan los mismos recubrimientos, por tanto, se elaboró una bitácora de los procesos que se utilizan a diario en el taller, con el fin de determinar cuáles de estos se emplean con mayor frecuencia y qué contaminantes están presentes en el agua a tratar (Tabla 5).

**Tabla 5.** Bitácora recubrimientos metálicos.

FECHA	VOLUMEN GENERADO POR TIPO DE RECUBRIMIENTO (m <sup>3</sup> )										
	Anodizado			Brush plating	Cadmio	Cobre	Cromo duro	Níquel	Pavonado	Plata	Volumen total
	Tipo I	Tipo II	Tipo III								
26/01/2019		0,15		0,36			0,4				0,91
28/01/2019	0,2				0,59						0,79
29/01/2019	0,11				0,46			0,4			0,97
30/01/2019		0,08			0,22		0,51	0,19			1
31/01/2019		0,005			0,87			0,055			0,93
1/02/2019	0,02	0,1					0,56			0,27	0,95
2/02/2019	0,04			0,13	0,48		0,25		0,1		1
4/02/2019	0,09									0,12	0,21
5/02/2019				0,15			0,58				0,73
6/02/2019		0,03						0,21			0,24
7/02/2019		0,001			0,74			0,11		0,095	0,95
8/02/2019		0,07		0,04				0,23			0,34
9/02/2019	0,03							0,35			0,38
11/02/2019	0,18				0,64						0,82
12/02/2019	0,02				0,29		0,34	0,14			0,79
13/02/2019	0,02				0,45		0,32	0,18			0,97
14/02/2019		0,12			0,31		0,46	0,11			1
15/02/2019							0,38				0,38
16/02/2019							0,26	0,13			0,39
18/02/2019				0,42	0,46						0,88
19/02/2019				0,09	0,58						0,67

**Tabla 5. (Continuación).**

FECHA	VOLUMEN GENERADO POR TIPO DE RECUBRIMIENTO (m <sup>3</sup> )										
	Anodizado			Brush plating	Cadmio	Cobre	Cromo duro	Níquel	Pavonado	Plata	Volumen total
	Tipo I	Tipo II	Tipo III								
20/02/2019					0,21			0,09		0,43	0,73
21/02/2019					0,48						0,48
22/02/2019							0,39	0,15			0,54
23/02/2019					0,93						0,93
25/02/2019	0,24				0,61						0,85
26/02/2019	0,32				0,68						1

**Fuente:** elaboración propia

Teniendo en cuenta la Tabla 5, se puede observar que los procesos más empleados en el taller de electroquímica del Comando Aéreo de Mantenimiento, corresponden a los recubrimientos de cadmio, cromo y níquel, además, considerando las sustancias químicas usadas en cada uno de estos, se puede inferir que los posibles contaminantes que pueden estar presentes en mayor concentración son níquel, cadmio, cromo, cianuros, plata; por otro lado, el agua a tratar también contiene sólidos suspendidos, materia orgánica, grasas y aceites. Además, se determina que la cantidad máxima de agua generada por día, corresponde a 1m<sup>3</sup> (1.000 L).

Para el desarrollo experimental, se llevó a cabo la toma de una muestra compuesta, la cual tuvo en cuenta el agua generada por el taller de electroquímica durante un mes, comenzando el 26 de enero y finalizando el 26 febrero, se efectúa la recolección los días 2, 11, 19 y 26 de febrero, en horas de la mañana, cada uno de 10 L, mediante un muestreo manual. Estas cuatro mezclas simples se homogenizaron para obtener una sola muestra, que contenga la mayor cantidad de los parámetros del agua que se pueda generar en el taller de electroquímica. Se realiza la recolección de la muestra teniendo en cuenta que, durante los primeros meses del año, se presentan la mayor demanda de piezas a tratar por parte de las Fuerza Aérea.

## 4.2 CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL AGUA RESIDUAL

Se realizó la determinación de metales pesados (plomo, plata, níquel, mercurio, cromo total y cadmio), fenoles y cianuro total, para la caracterización inicial del agua proveniente del taller de electroquímica del Comando Aéreo de Mantenimiento, en el Laboratorio Quimicontrol LTDA, los resultados obtenidos de cada parámetro (Anexo H), en la Tabla 6, se comparan con los valores permitidos por la resolución 0631 del 2015, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, para el vertimiento de aguas residuales al sistema de alcantarillado.

**Tabla 6.** Caracterización inicial (metales pesados, cianuro, fenoles).

Parámetros	Resultado	Resolución 0631 de 2015
Cianuros (ppm)	7,53	0,1
Cadmio (ppm)	3,57	0,05
Cromo (ppm)	14	0,5
Mercurio (ppm)	<0,0007	0,01
Níquel (ppm)	3	0,5
Plata (ppm)	0,006	0,2
Plomo (ppm)	0,086	0,2
Fenoles (ppm)	< 0,049	0,2

\*Parámetros que incumplen la norma 0631 del 2015

**Fuente:** elaboración propia

Por otra parte, se realizó el análisis de los parámetros DQO, DBO<sub>5</sub>, grasas y aceites, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, pH, y turbiedad, en las instalaciones de laboratorio de calidad de aguas de la Universidad Militar Nueva Granada (Anexo I), los cuales se llevan a cabo mediante lo establecido en el IDEAM, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 7, éstos son comparados con los valores permitidos por la resolución 0631 del 2015, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, para el vertimiento de aguas residuales al sistema de alcantarillado.

**Tabla 7.** Caracterización inicial.

Parámetros	Técnica Analítica	Método de Análisis	Resultado	Resolución 0631 de 2015
Temperatura (°C)	Electrometría	SM 2550 B	19,9	
Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)	Incubación de 5 días-Modificación azida	TP0087	501,33	100
Demanda Química de Oxígeno DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	Reflujo cerrado	TP0086	587,2	250
Grasas y Aceites (ppm)	Extracción Soxhlet	TP0150	103,4	10
pH	Electrometría	TP0080	12,12	6 a 9

**Tabla 7. (Continuación).**

<b>Parámetros</b>	<b>Técnica Analítica</b>	<b>Método de Análisis</b>	<b>Resultado</b>	<b>Resolución 0631 de 2015</b>
Sólidos Sedimentables (SSED) (ppm)	Sedimentación	SM 2540 F	9	2
Sólidos Suspendidos Totales (SST) (ppm)	Gravimetría	TP0088	4053,33	50
Turbiedad (NTU)	Por Nefelometría (Método B)	TP0443	230	

\*Parámetros que incumplen la norma 0631 del 2015

**Fuente:** elaboración propia

#### **4.3 OPCIONES PROPUESTAS PARA LA OXIDACIÓN DE CIANURO DE LA ALTERNATIVA A**

Se proponen dos opciones para el desarrollo experimental del mejoramiento del tratamiento actual, variando solo la etapa de oxidación de cianuro, teniendo presente dosificación y pH adecuados, variación de oxidantes para cianuros considerando revisión bibliográfica.

Se evalúan en cada una de las etapas de las opciones propuestas, los parámetros más relevantes para la selección de la opción más favorable teniendo en cuenta tiempos, cantidad de reactivos y remoción de los contaminantes del proceso, estos últimos evaluados de la siguiente manera, para la etapa de precipitación química se evalúa dentro de los metales pesados cadmio y níquel, dado que estos son los que incumple con los parámetros requeridos por la resolución 0631 del 2015, realizados en el Laboratorio Quimicontrol LTDA, los resultados obtenidos de estos se encuentran disponibles en el (Anexo J). Además, se evalúa en la etapa de oxidación de cianuros la concentración de este mediante el test kit Nanocolor® Cyanid 08 (Anexo E). Finalmente, en la etapa de reducción de cromo se evalúa la concentración final de cromo hexavalente con el fin de observar si logra reducirse en la etapa, mediante el test kit Visocolor® ECO Chrom (VI) (Anexo F).

Para la precipitación de metales, se hace necesario el uso de un ácido y una base, para el ajuste de pH, dado que, en la PTAR, se emplea ácido sulfúrico e hidróxido de sodio, se hace uso de estos durante el desarrollo experimental. Considerando que actualmente se emplea peróxido de hidrógeno e hipoclorito de calcio para la oxidación de cianuro, se evalúa la adición de estos dos oxidantes a la vez y el uso de solo hipoclorito. Cabe resaltar, que no será evaluado el uso de solo peróxido de

hidrógeno como oxidante debido a que este generalmente no es utilizado en la industria galvanotecnia<sup>302</sup>, ya que implica altos costos operativos según lo afirmado por Kitis, Akcil, Karakaya y Yigit<sup>303</sup>; por Lawrence Wang y Nazih Shammam y Yung-Tse Hung<sup>304</sup>.

Se tiene presente según lo expuesto por Corredor Héctor y Díaz Elkin en su trabajo de grado, que cuando se tiene presencia de cromo hexavalente en aguas residuales, este se debe reducir a cromo trivalente ya que este último no es tan soluble en agua, por tanto, se debe tratar con soluciones de sales como metabisulfito de sodio, bisulfito de sodio, entre otros<sup>305</sup>. Estos deben ser adicionados considerando lo que afirma Franco Daniela hasta observar un cambio de color, el cual indica la reducción a cromo trivalente<sup>306</sup>. Durante el desarrollo experimental, se emplea metabisulfito de sodio, dado que, en la PTAR, actualmente utilizan y además según lo expuesto por Karale, Wadkar y Nangare presenta mejores rendimientos como reductor<sup>307</sup>.

**4.3.1 Opción I: Tratamiento con hipoclorito de calcio como oxidante para cianuros.** El proceso se compone de las siguientes 3 etapas: 1) oxidación de cianuro con hipoclorito de calcio, 2) reducción y precipitación de cromo, 3) precipitación de metales; basándose en lo expuesto por los autores Sohair Abou- Elela, Hanan Ibrahim<sup>308</sup>; G. Tapla, J. Bourgois, F. Carrillo<sup>309</sup> y Joshua Amarnath, S. Rajan, S. Suresh<sup>310</sup> el proceso de tratamiento clásico de aguas residuales galvánicas. Se tiene en cuenta los pH y tiempo de reacción para precipitación de metales observados en el Cuadro 8 y Cuadro 9.

Se evalúa el uso de hipoclorito de calcio como oxidante de cianuros teniendo en cuenta que presenta altos porcentajes de remoción de este contaminante con base a los autores Khodadad, Teimoury, Abdolahi y Samiee<sup>311</sup>; y Amarnath Joshua,

---

<sup>302</sup> WANG, Lawrence; SHAMMAS, Nazih y HUNG, Yung-Tse. Treatment of Metal Finishing Industry Wastes. En: Waste Treatment in the Metal Manufacturing, Forming, Coating, and Finishing Industries. p. 368. [En línea]. CRC Press, 2009. [Citado el 25 de enero de 2019]. ISBN 9781420072235. Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=7s-H4q8ddlgC&pg=PA495&lpg=PA495&dq=Waste+Treatment+in+the+Metal+Manufacturing,+Forming,+Coating,+and+Finishing+Industries&source=bl&ots=nRWNaMW6B1&sig=ACfU3U1mFHU3m4HR3JSK2MxM92zCSAFO3g&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiSguOJ1OHihWQ1lkKHRNTDKoQ6AEwDHoECAkQAQ#v=onepage&q=Waste%20Treatment%20in%20the%20Metal%20Manufacturing%2C%20Forming%2C%20Coating%2C%20and%20Finishing%20Industries&f=false>

<sup>303</sup> KITIS, M, et al. Destruction of cyanide by hydrogen peroxide in tailings slurries from low bearing sulphidic gold ores. Minerals Engineering. [en línea]. 2005, March.18 (3), p. 354. [Consultado 26 enero de 2019]. ISSN 08926875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.06.003>.

<sup>304</sup> WANG, Lawrence; SHAMMAS, Nazih y HUNG, Yung-Tse. Treatment of Wastes from Metal Finishing Industry. En: Advances in Hazardous Industrial Waste Treatment. p 165. [En línea]. CRC Press, 2009. [Citado el 26 de enero de 2019]. ISBN 9781420072310. Disponible en: [https://books.google.com.co/books?id=G1zLBQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Advances+in+Hazardous+Industrial+Waste+Treatment&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjNINKE30HiAhUnwVkkHdcFD\\_UQ6AEIKDAA#v=onepage&q=Advances%20in%20Hazardous%20Industrial%20Waste%20Treatment&f=false](https://books.google.com.co/books?id=G1zLBQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Advances+in+Hazardous+Industrial+Waste+Treatment&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjNINKE30HiAhUnwVkkHdcFD_UQ6AEIKDAA#v=onepage&q=Advances%20in%20Hazardous%20Industrial%20Waste%20Treatment&f=false).

<sup>305</sup> CORREDOR, Op. cit., p 24

<sup>306</sup> FRANCO, Op. cit., p 64

<sup>307</sup> KARALE, Op. cit., p 215.

<sup>308</sup> ABOU- ELELA, Op. cit., p 223-229.

<sup>309</sup> TAPLA, Op. cit., 1 -9.

<sup>310</sup> AMARNATH, Op. cit., p 281-283.

<sup>311</sup> KHODADAD, Op. cit., p 52-55.

Rajan y Kumar Suresh<sup>312</sup>, además es el más usado para tratamiento de aguas residuales provenientes de procesos galvánicos<sup>313</sup> (Cuadro 25).

**Cuadro 25.** Condiciones adecuadas para la remoción de cianuros mediante cloración alcalina.

	<b>pH adecuado de oxidación</b>	<b>Tiempo de reacción</b>	<b>Mejoras e inconvenientes</b>
<b>Oxidación con hipoclorito de calcio</b>	Primera Etapa: $\geq 10$ y segunda etapa: 8 - 8,5 <sup>314</sup> Primera etapa $> 10$ y segunda etapa entre 7,5– 8 <sup>315</sup> . Primera etapa 10,5-11 y segunda etapa 8 <sup>316</sup> . Primera etapa $>11$ y segunda etapa 8,5 <sup>317</sup> Primera etapa 10,5-12 (mejor a 11 velocidad más rápida) y segunda etapa $< 9,5$ <sup>318</sup> Primera etapa 9,5-10 y segunda etapa 8 <sup>319</sup> .	Etapa 1: 60 minutos; etapa 2: 60 minutos <sup>320</sup>	Metales como $\text{Cu}^{2+}$ , $\text{Fe}^{3+}$ , $\text{Mn}^{4+}$ y oxígeno disuelto requiere exceso de agente reductor <sup>321</sup>  Cuando hay níquel presente en el agua puede interferir en la conversión de cianuros a cianatos <sup>322</sup> .

**Fuente:** elaboración propia

Considerando lo que dice Botz, M; Mudder, T; Akcil, A. “El  $\text{Cl}_2$  utilizado en el proceso de cloración alcalina puede estar en una solución 12,5% de hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) o como una solución de hipoclorito de calcio ( $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ )”<sup>323</sup>. Con una dosificación de 12,5 kg  $\text{NaOCl}/\text{kg CN}^-$  para mayor remoción de cianuro según lo expuesto por Gaviria Aba y Meza Luis<sup>324</sup>.

<sup>312</sup> AMARNATH, Op. cit., p 281-283.

<sup>313</sup> WANG, Lawrence; SHAMMAS, Nazih y HUNG, Yung-Tse Waste Treatment in the Metal Manufacturing, Forming, Coating, and Finishing Industries. Op. cit., p. 368

<sup>314</sup> ROMERO ROJAS, Op. cit., p 144.

<sup>315</sup> WANG, Lawrence; SHAMMAS, Nazih y HUNG, Yung-Tse. Advances in Hazardous Industrial Waste Treatment Op. cit., p 165.

<sup>316</sup> ABOU- ELELA, Op. cit., p 226.

<sup>317</sup> PHILIPP, Op. cit., p 738

<sup>318</sup> GARCIA, Op. cit., p 76-77.

<sup>319</sup> AYRES, Op. cit., p 19.

<sup>320</sup> PHILIPP, Op. cit., p 738.

<sup>321</sup> GARCIA, Op. cit., p 76-77.

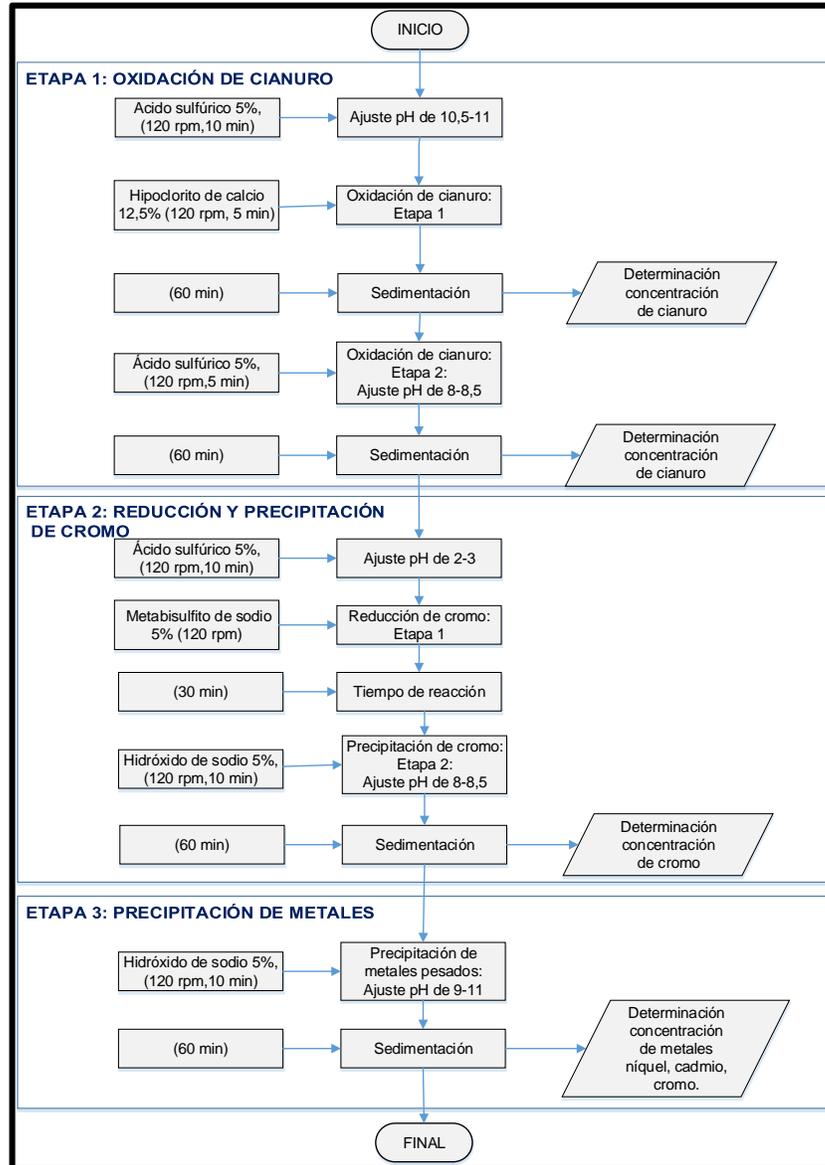
<sup>322</sup> GÓMEZ LEIVA, Patricia. Degradación de cianuros mediante Oxidación Química en efluentes industriales. España: Universidad de Oviedo. [en línea]. Proyecto de Máster en Química y desarrollo sostenible, 2012. p.17. [Citado el 25 de enero del 2019]. Disponible en: [http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/3986/6/TFM\\_PatriciaGomezLeiva.pdf](http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/3986/6/TFM_PatriciaGomezLeiva.pdf)

<sup>323</sup> BOTZ, Chapter 35 - Cyanide Treatment: Physical, Chemical, and Biological Processes, Op. cit., p 624.

<sup>324</sup> GAVIRIA, Op. cit., p 31.

En la Figura 40 se explica, el desarrollo experimental que se lleva a cabo para el tratamiento de la opción I

**Figura 40.** Desarrollo experimental opción I de tratamiento.

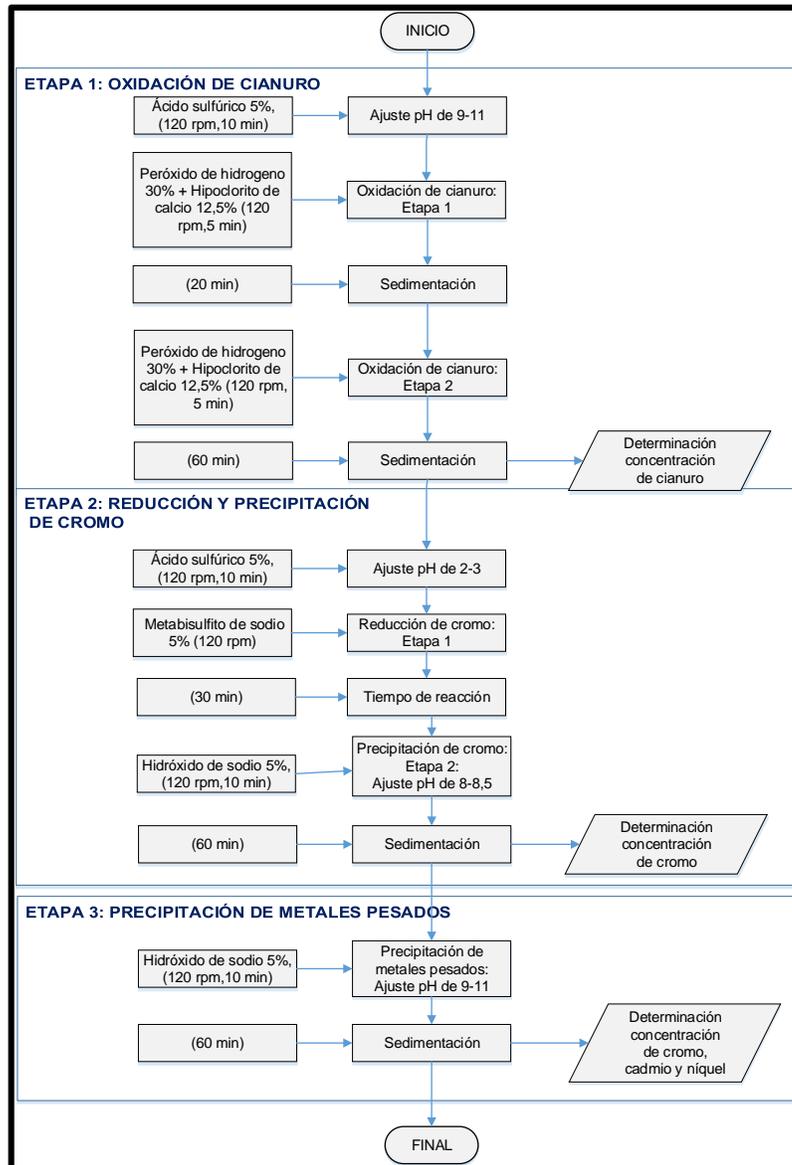


Fuente: elaboración propia

**4.3.2 Opción II: Tratamiento con peróxido de hidrógeno e hipoclorito de calcio como oxidantes para cianuros.** El proceso se compone de las siguientes 3 etapas: 1) oxidación de cianuro con hipoclorito de calcio y peróxido de hidrógeno, 2) reducción y precipitación de cromo, 3) precipitación de metales. Se tiene en cuenta los pH y tiempo de reacción observados en la Cuadro 7, Cuadro 8 y Cuadro 9.

En la Figura 41 se explica, el desarrollo experimental que se lleva a cabo para el tratamiento de la opción II

**Figura 41.** Desarrollo experimental opción II de tratamiento.



Fuente: elaboración propia

**4.3.3 Selección de la opción más adecuada.** En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos en cada una de las etapas de oxidación de cianuro y precipitación química de los parámetros más representativos, de la opción I y la opción II; de esta manera seleccionar cuál de estas es más adecuada considerando la reducción de contaminantes, la dosificación requerida y tiempo de reacción.

**Tabla 8.** Parámetros evaluados por etapa.

Etapa	Parámetro	Opción I	% de remoción	Opción II	% de remoción	Resolución 0631 de 2015
1: Oxidación de cianuro	Cianuro (ppm)	Etapa 1.1: 0,06	99,2	<0,02	99,7	0,1
		Etapa 1.2: <0,02	99,7	<0,02	99,7	
2: Reducción y precipitación de cromo	Cromo (ppm)	0,04	99,7	0,02	99,86	0,5
3: Precipitación de metales	Cadmio (ppm)	1,1	69,19	0,277	92,24	0,05
	Níquel (ppm)	0,815	72,83	0,332	88,93	0,5
	Cromo (ppm)	0,02	99,86	0,02	99,86	0,5

\*Parámetros que incumplen la norma 0631 del 2015

**Fuente:** elaboración propia

Tal como se observa en los resultados obtenidos (Tabla 8), la opción que presenta mayor reducción de contaminantes corresponde al tratamiento de peróxido de hidrógeno e hipoclorito de calcio, es decir la opción II, debido a que ésta presenta porcentajes más altos de remoción y asimismo requiere menos dosificación de los reactivos dado que según Gaviria Ana y Meza Luis, para la combinación de hipoclorito con peróxido de hidrógeno se debe adicionar 5 kg y 2,5 kg respectivamente, por cada 1kg de CN<sup>-</sup>; mientras que al usar solo hipoclorito se requiere 12,5 kg/kg CN<sup>-</sup> <sup>325</sup>. Por otro lado, el tiempo de reacción de la opción II corresponde a 1 hora, mientras que en la opción I es de 2 horas, además que ésta cuenta con una segunda etapa en la que se debe modificar el pH como se mencionó en el Cuadro 7 y Cuadro 25. Igualmente, la opción II con el uso de peróxido de hidrógeno, no solo ayuda a oxidar cianuro, sino que permite la oxidación de cromo y níquel, como se hace referencia en el Cuadro 9.

Teniendo en cuenta los porcentajes de remoción obtenidos en la Tabla 8, para la opción II, se realiza comparación con los obtenidos en la Tabla 3 donde se evaluó el tratamiento realizado actualmente, observando que con la opción II se obtienen porcentajes de remoción más altos, cumpliendo con todos los parámetros dentro de lo establecido por la resolución 0631, excepto para cadmio.

#### 4.4 PROPUESTA SELECCIONADA PARA TRATAMIENTO DE AGUA

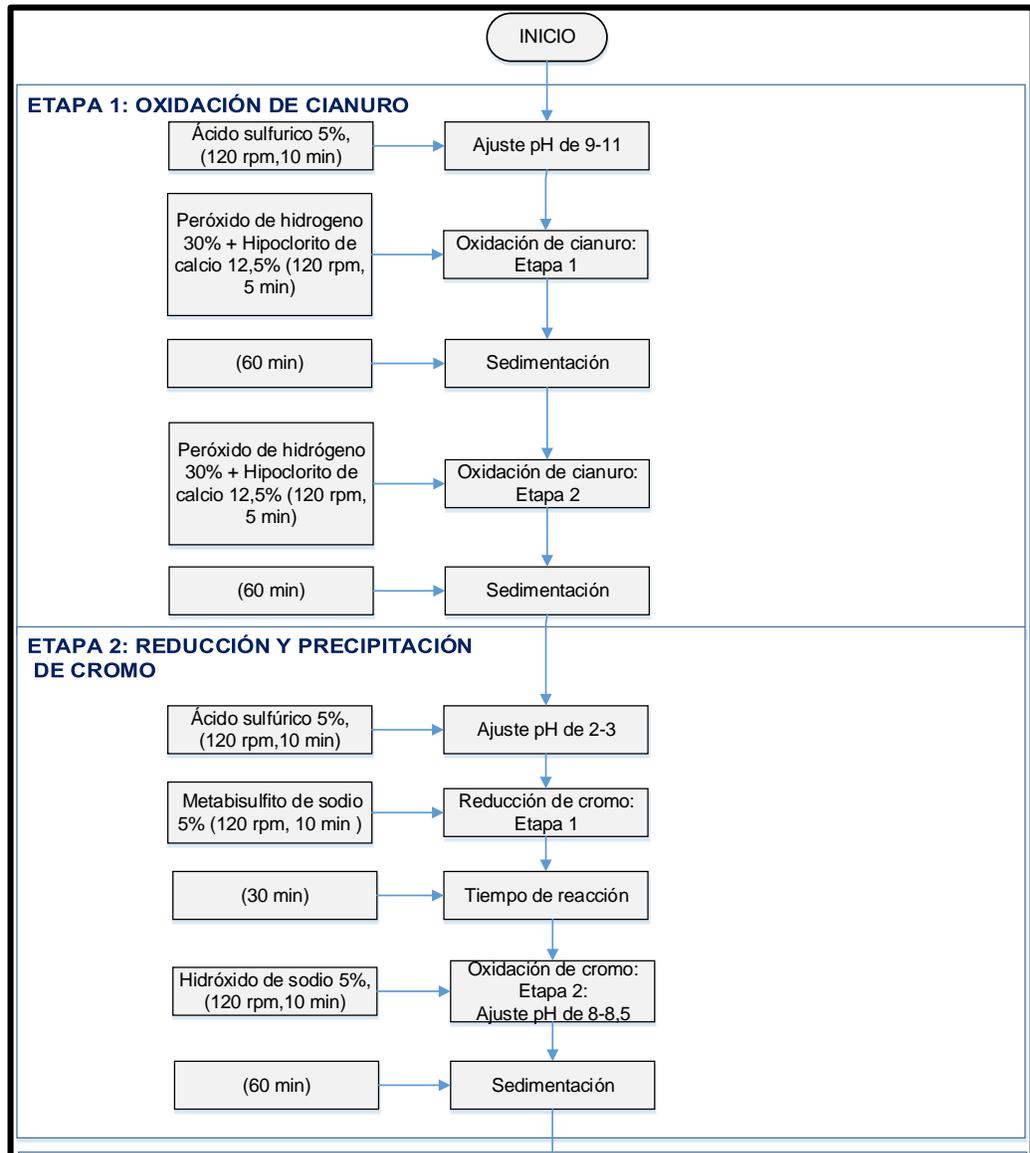
Con base a los resultados en la sección 4.3.3, se realiza el desarrollo experimental de la propuesta seleccionada para el tratamiento de agua proveniente del taller de

<sup>325</sup> *Ibíd.*, p 31.

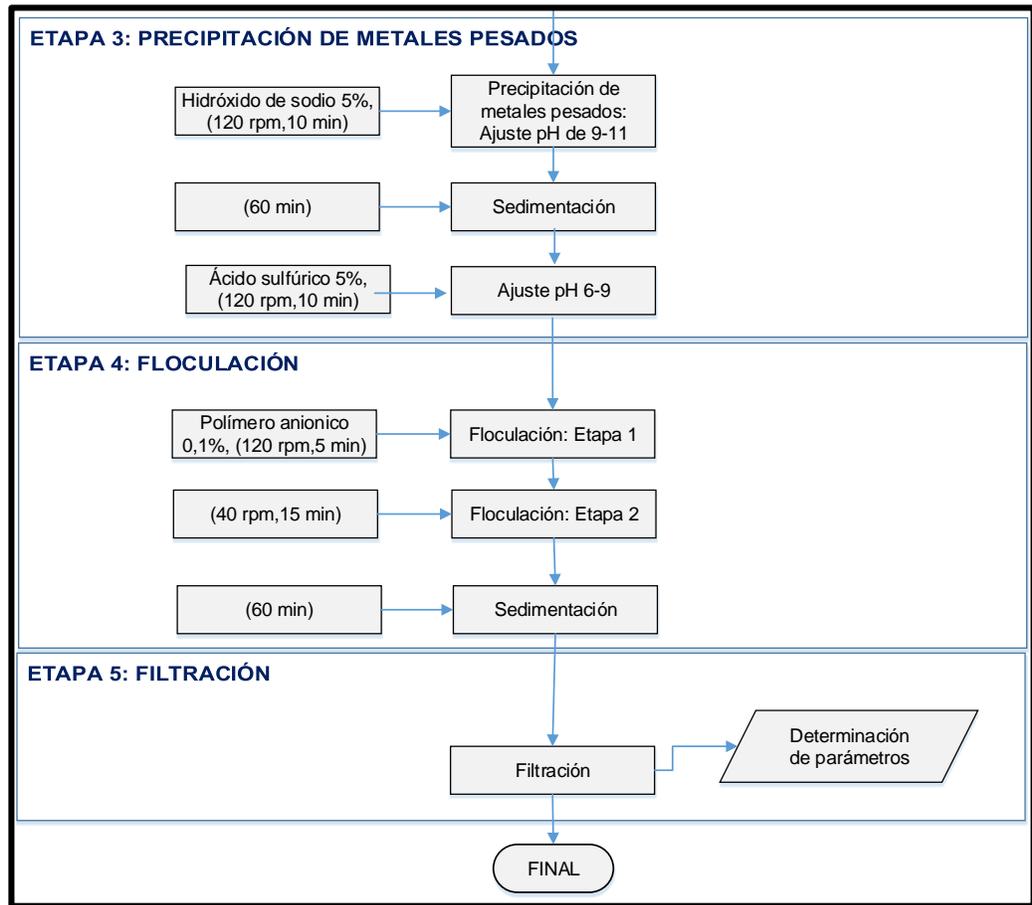
electroquímica, el cual consiste en la opción II, es decir con secuencia de las siguientes 3 etapas: oxidación de cianuro con hipoclorito de calcio y peróxido de hidrógeno, reducción y precipitación de cromo, precipitación de metales.

El desarrollo experimental correspondiente a la alternativa A opción II se observa en la Figura 42.

**Figura 42.** Diagrama de bloques Alternativa Seleccionada.



**Figura 42. (Continuación).**



**Fuente:** elaboración propia

En primer lugar, se realiza la oxidación de cianuro en medio básico, debido a que el cianuro en condiciones ácidas libera cianuro de hidrógeno gaseoso el cual es altamente venenoso y al efectuar la oxidación en condiciones alcalinas se obtiene compuestos como el cianato que es 200 veces menos venenoso que el cianuro<sup>326</sup>. Luego de que ocurra la oxidación de cianuro se lleva el pH a medio ácido para realizar la reducción de cromo hexavalente a cromo trivalente, y posteriormente se realiza un ajuste de pH a medio básico para llevar a cabo la precipitación de metales. Finalmente, se realiza floculación y filtración.

En la Figura 43 se observa la muestra de agua inicial proveniente del taller de electroquímica, teniendo en cuenta que se realizara el mismo tratamiento seleccionado en cuatro ensayos, que se realizaran tres réplicas del proceso. El agua

<sup>326</sup>ARUNDEL, John y GONZÁLEZ, Vicente San José. Tratamiento De Aguas Negras y Efluentes Industriales. [En línea]. España: Acribia S.A, 2000. [Citado el 28 de enero de 2019]. ISBN 9788420009858. Disponible en: [https://books.google.com.co/books/about/Tratamientos\\_de\\_aguas\\_negras\\_y\\_efluentes.html?id=5px5AAAAAAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.co/books/about/Tratamientos_de_aguas_negras_y_efluentes.html?id=5px5AAAAAAAJ&redir_esc=y).

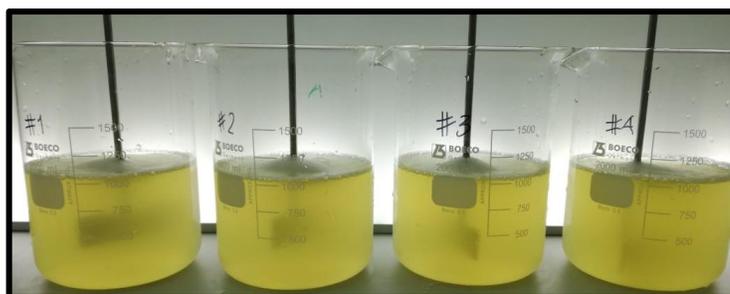
al inicio del tratamiento comienza con un pH promedio de 12,06 teniendo en cuenta los valores que presenta cada una de las jarras, como se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 9.** pH inicial jarras.

	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4
<b>pH inicial</b>	12,13	12,11	12,04	11,95

Fuente: elaboración propia

**Figura 43.** Muestra agua residual inicial.



Fuente: elaboración propia

**4.4.1 Ajuste de pH a medio básico para oxidación de cianuro.** A una muestra de 1.000 ml se le agrega paulatinamente mediante agitación continua de 120 rpm, una solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 5% v/v (Anexo K) hasta llegar a un pH óptimo para la oxidación de cianuros entre 9 y 11<sup>327</sup>. Se deja un tiempo de reacción de 10 minutos. En la Tabla 10 y la Gráfica 1 se presentan los datos registrados.

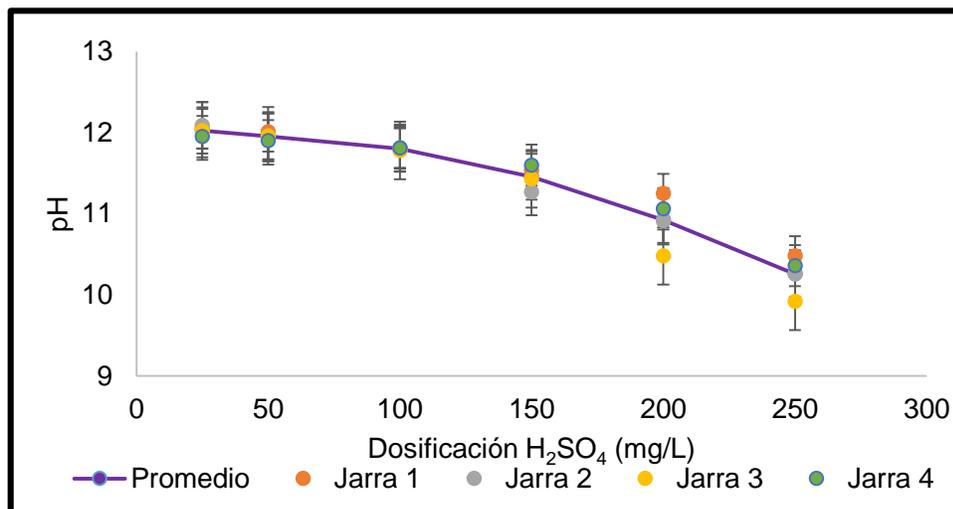
**Tabla 10.** Datos registrados para ajuste de pH 9-11(oxidación de cianuros).

Ajuste pH 9-11					
	pH				
mg/L H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Promedio
25	12,05	12,09	12,02	11,95	12,03±0,14
50	12,01	11,95	11,96	11,9	11,96±0,11
100	11,81	11,81	11,78	11,81	11,80±0,03
150	11,53	11,27	11,43	11,6	11,46±0,33
200	11,25	10,91	10,48	11,06	10,93±0,77
250	10,48	10,26	9,92	10,36	10,26±0,56

Fuente: elaboración propia

<sup>327</sup> QUISPE, Elizabeth. Comparación técnica y económica en el uso del hipoclorito de sodio e hipoclorito de calcio en el tratamiento de efluentes cianurados. [en línea]. Informe de suficiencia para título profesional de ingeniería Química. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Química y Textil.2010. p. 27. [Citado el 25 de enero del 2019]. Disponible en: [http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/9740/1/quispe\\_se.pdf](http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/9740/1/quispe_se.pdf).

**Gráfica 1.** Ajuste pH 9-11- Oxidación de cianuro.



**Fuente:** elaboración propia

Teniendo en cuenta la Tabla 10, se requiere dosificar 250 mg/L de ácido sulfúrico para alcanzar el pH entre 9 y 11.

**4.4.2 Oxidación de cianuro.** Gaviria Ana y Meza Luis sugieren, que la dosificación que presenta mayor remoción de cianuro corresponde a 2,5 kg de peróxido de hidrógeno con 5 kg de hipoclorito por kg de cianuro presente en el agua<sup>328</sup>, agregando inicialmente 75% de los reactivos y el otro 25% de los mismos, 20 minutos después<sup>329</sup>.

A una muestra de 1.000 ml se le agrega mediante agitación continua de 120 rpm, durante 5 min, peróxido de hidrógeno al 30% e hipoclorito de calcio al 12,5% (Anexo K) teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado para la dosificación de estos; finalmente se requiere un tiempo de reacción de 60 minutos.

**4.4.3 Ajuste pH a medio ácido para reducción de cromo.** Posterior a la oxidación de cianuro, a una muestra de 1.000 ml, se le adiciona una solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 5% v/v (Anexo K) con agitación de 120 rpm, durante 10 minutos hasta conseguir un pH menor a 3. En la Tabla 11 y la Gráfica 2 se muestran los datos experimentales obtenidos.

<sup>328</sup> GAVIRIA, Op. cit., p 31.

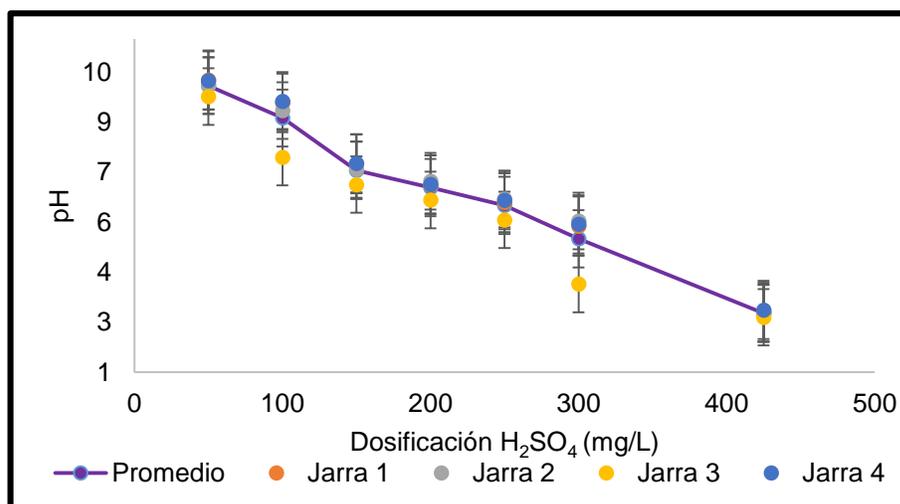
<sup>329</sup> DIAZ, Op. cit., p 128.

**Tabla 11.** Datos registrados para ajuste de pH 2-3 (reducción de cromo).

Ajuste pH 2-3						
pH						
mg/L H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Promedio	
50	9,77	9,6	9,27	9,75	9,60±0,5	
100	9,08	8,85	7,45	9,13	8,63±1,68	
150	7,25	7,08	6,63	7,27	7,06±0,64	
200	6,62	6,73	6,17	6,64	6,54±0,56	
250	6,09	6,2	5,57	6,16	6,01±0,63	
300	5,39	5,54	3,65	5,44	5,01±1,89	
425	2,8	2,77	2,65	2,87	2,77±0,22	

**Fuente:** elaboración propia

**Gráfica 2.** Ajuste pH 2-3- Reducción de cromo.



**Fuente:** elaboración propia

Teniendo en cuenta la Tabla 11, se requiere dosificar 425 mg/L de ácido sulfúrico para alcanzar el pH entre 2 y 3.

En esta etapa se obtiene un porcentaje de remoción de 94,33% de cianuro, según la resolución 0631 del 2015, valor máximo permitido es de 0,1 ppm, en el desarrollo experimental se obtuvo un resultado de concentración de cianuro final de <0,427 ppm, lo cual no permite conocer con exactitud si este parámetro cumple con la resolución, debido a que el laboratorio encargado Quimicontrol LTDA, no cuenta con la sensibilidad adecuada para el método realizado en la determinación de este parámetro, a pesar de que se realiza con el procedimiento SM 4500 CN el cual es el acreditado por el IDEAM bajo lineamientos de la norma NTC-ISO/IEC 17025.

**4.4.4 Reducción de cromo.** Según Romero Rojas, “el método más usado para remover cromo hexavalente es el de reducirlo de Cr<sup>+6</sup> a Cr<sup>+3</sup> y luego precipitarlo como hidróxido”<sup>330</sup>.

Al ocurrir la reducción de cromo la conductividad del agua baja, ya que el cromo trivalente tiene una conductividad menor a la del cromo hexavalente, por lo tanto, la conductividad del agua seguirá bajando hasta que todo el cromo hexavalente presente en el agua sea reducido<sup>331</sup>.

A una muestra de 1.000 ml se agrega metabisulfito de sodio al 5% p/p (Anexo K) con agitación de 120 rpm, durante 10 minutos y se mide la conductividad hasta determinar la dosificación adecuada, la cual corresponde al volumen de Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub> adicionado en la que se observa mayor disminución en la conductividad del agua, teniendo en cuenta la Gráfica 3 se observa que el menor valor alcanzado corresponde a 4 ml de dosificación, es decir, que esta es la cantidad que se requiere para asegurar la reducción de cromo; asimismo se puede observar un cambio de color cuando se lleva a cabo la reducción del cromo<sup>332</sup> como se observa en la Figura 44 Posteriormente se deja reaccionar durante 30 minutos. En la Tabla 12 se registran los valores obtenidos.

**Tabla 12.** Datos registrados de conductividad en la reducción de cromo.

Reducción cromo					
	Conductividad $\mu\text{S}/\text{cm}$				
mg/L Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Promedio
5	7880	7480	6980	7090	7358±900
15	7920	7490	7140	7210	7440±780
30	8320	7780	7320	7420	7710±1000
50	8460	7970	7340	7530	7825±1120
100	8700	8140	7550	7610	8000±1150
150	8480	8050	7390	7450	7843±1090
200	8230	7840	7280	7400	7688±950
250	8430	8020	7310	7550	7828±1120
275	8560	8040	7400	7560	7890±1160
300	7770	8020	7300	8000	7773±720

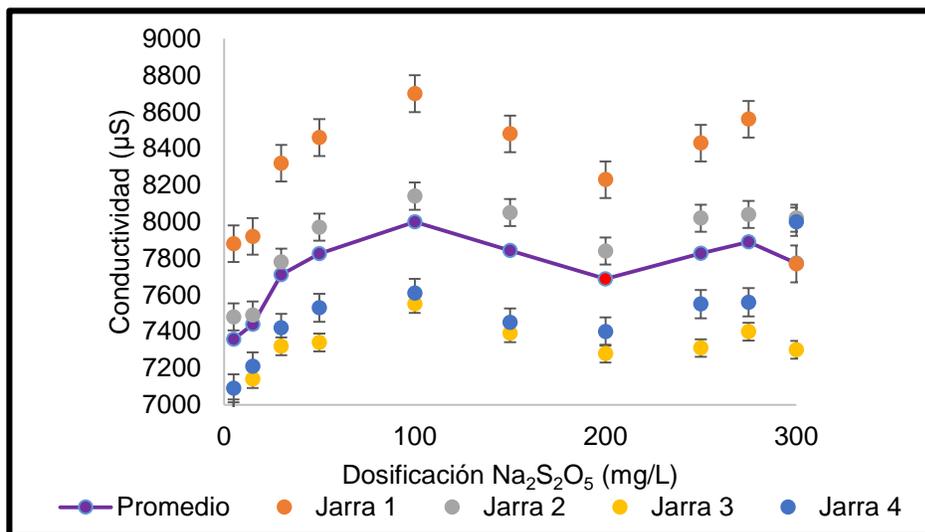
**Fuente:** elaboración propia

<sup>330</sup> ROMERO ROJAS, Op. cit., p. 151.

<sup>331</sup> RAMÍREZ, Lina, Op. cit., p 67.

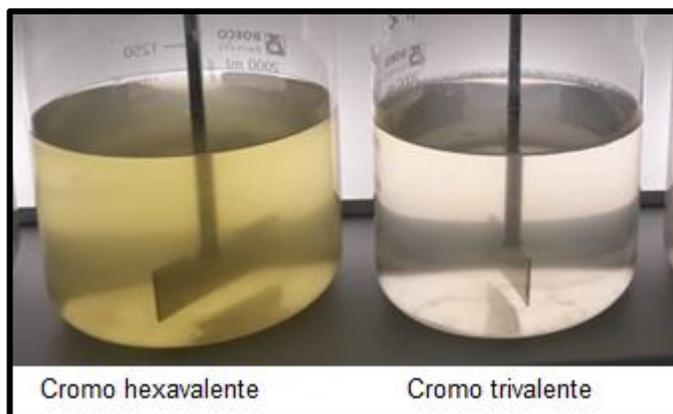
<sup>332</sup> FRANCO, Op. cit., p 64.

**Gráfica 3.** Reducción cromo hexavalente a cromo trivalente.



**Fuente:** elaboración propia

**Figura 44.** Cambio color reducción cromo hexavalente y trivalente.



**Fuente:** elaboración propia

Teniendo en cuenta la Tabla 12, se requiere dosificar 200 mg/L de metabisulfito de sodio para reducir el cromo hexavalente a cromo trivalente.

Obteniendo en esta etapa un porcentaje de remoción de 99,54% para cromo, cumpliendo con el límite establecido por la resolución 0631 del 2015 al obtener una concentración de 0,064 ppm.

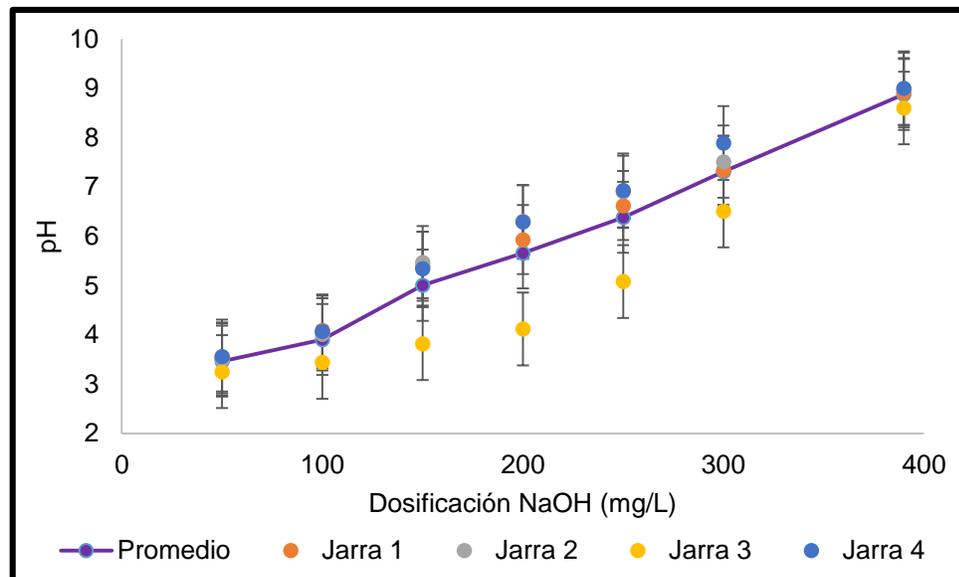
**4.4.5 Ajuste de pH a medio básico para precipitación cromo.** A una muestra de 1.000 ml se le agrega paulatinamente mediante agitación continua de 120 rpm, una solución de NaOH al 5% p/p (Anexo K) hasta llegar a un pH entre 8 y 8,5 para la precipitación de cromo, durante 10 minutos. En la Tabla 13 y en la Gráfica 4 se registran los valores obtenidos para el ajuste. Finalmente se deja un tiempo de sedimentación de 60 minutos.

**Tabla 13.** Datos registrados para ajuste pH 8-8,5 (precipitación de cromo).

Ajuste pH 8-8,5					
mg/L NaOH	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Promedio
50	3,05	3	2,75	3,06	2,97±0,31
100	3,59	3,51	2,94	3,57	3,40±0,65
150	4,89	4,97	3,32	4,84	4,51±1,65
200	5,43	5,8	3,62	5,79	5,16±2,18
250	6,12	6,4	4,58	6,43	5,88±1,85
300	6,84	7,01	6,01	7,39	6,81±1,38
390	8,41	8,49	8,1	8,5	8,38±0,4

**Fuente:** elaboración propia

**Gráfica 4.** Ajuste pH 8-8,5- Precipitación de cromo.



**Fuente:** elaboración propia

Teniendo en cuenta la Tabla 13, se requiere dosificar 390 mg/L de hidróxido de sodio para alcanzar el pH entre 8 y 8,5.

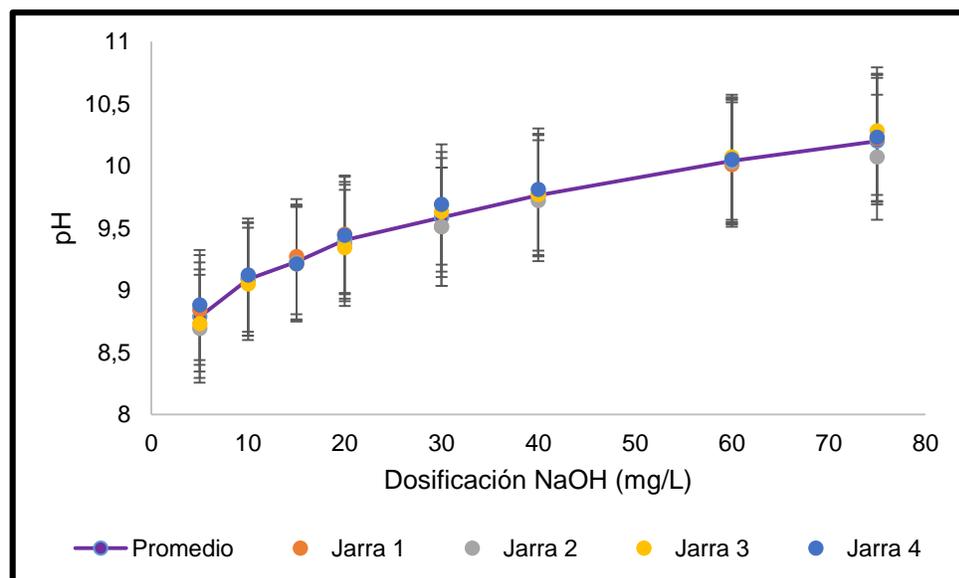
**4.4.6 Ajuste de pH a medio básico para precipitación metales.** A una muestra de 1.000 ml se le agrega paulatinamente mediante agitación continua de 120 rpm, una solución de NaOH al 5% p/p (Anexo K) hasta llegar a un pH entre 9 y 11 para la precipitación de metales pesados, durante 10 minutos. En la Tabla 14 y la Gráfica 5 se registran los valores obtenidos para el ajuste. Finalmente se deja un tiempo de sedimentación de 60 minutos como se observa en la Figura 45.

**Tabla 14.** Datos registrados para ajuste pH 9-11 (precipitación de metales).

Ajuste pH 9-11					
mg/L NaOH	pH				Promedio
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	
5	8,84	8,69	8,73	8,88	8,79±0,19
10	9,09	9,09	9,05	9,12	9,09±0,07
15	9,27	9,22	9,21	9,21	9,23±0,06
20	9,45	9,38	9,34	9,44	9,40±0,11
30	9,51	9,51	9,63	9,69	9,59±0,18
40	9,76	9,72	9,77	9,81	9,77±0,09
60	10,01	10,03	10,07	10,05	10,04±0,06
75	10,22	10,07	10,28	10,23	10,20±0,21

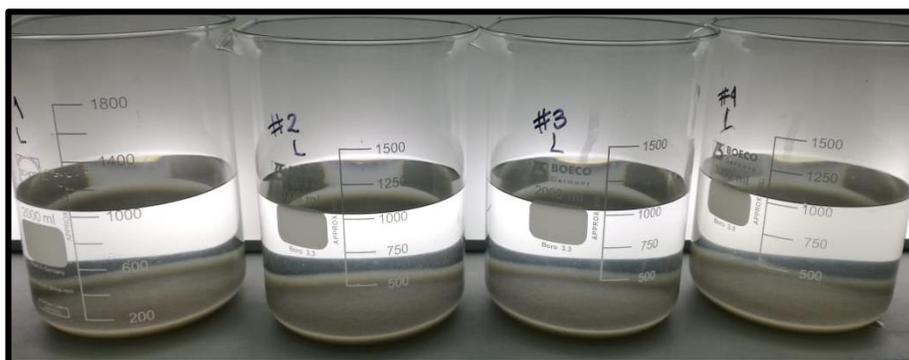
Fuente: elaboración propia

**Gráfica 5.** Ajuste pH 9-11- Precipitación de metales.



Fuente: elaboración propia

**Figura 45.** Prueba de jarras después de precipitación de metales.



**Fuente:** elaboración propia

Teniendo en cuenta la Tabla 14, se requiere dosificar 75 mg/L de hidróxido de sodio para alcanzar el pH entre 9 y 11.

Obteniendo en esta etapa porcentajes de remoción de 99,5% de cadmio y 97,9% de níquel, cumpliendo con los límites establecidos por la resolución 0631 del 2015 al obtener una concentración de 0,017 ppm y 0,063% ppm respectivamente.

**4.4.7 Ajuste de pH para cumplimiento de norma.** Considerando lo estipulado por la resolución 0631 del 2015 por la cual se establece que el pH adecuado para vertimiento corresponde a un valor de pH entre 6 y 9, por tanto, se realiza un ajuste de este parámetro.

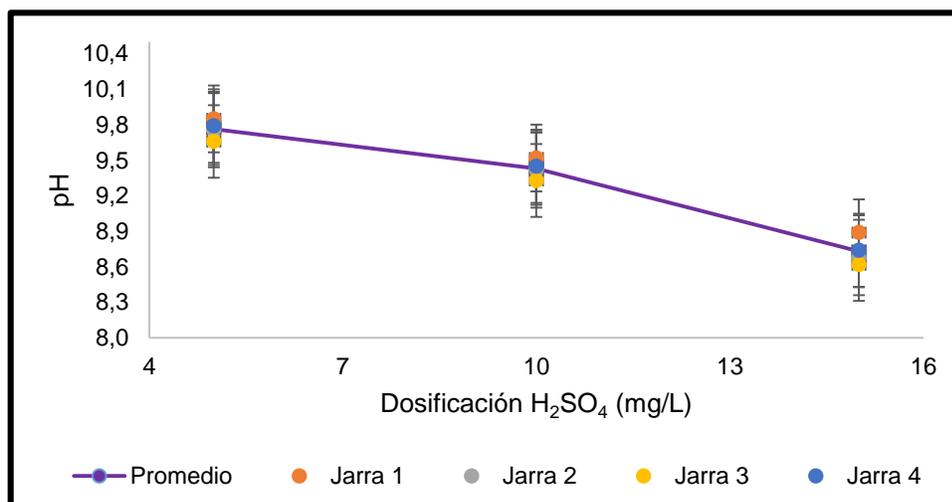
A una muestra de 1.000 ml, se le adiciona una solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 5% v/v (Anexo K) con agitación de 120 rpm, durante 10 minutos hasta conseguir un pH entre 6 y 9. En la Tabla 15 y la Gráfica 6 se muestran los datos experimentales obtenidos.

**Tabla 15.** Datos registrados para ajuste de pH 6-9 (para cumplimiento de norma).

Ajuste pH 6-9					
ml H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH				Promedio
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	
5	9,85	9,76	9,66	9,79	9,77±0,19
10	9,52	9,42	9,33	9,45	9,43±0,19
15	8,89	8,68	8,62	8,74	8,73±0,27

**Fuente:** elaboración propia

**Gráfica 6.** Ajuste de pH 6-9 (para cumplimiento de norma).



**Fuente:** elaboración propia

Teniendo en cuenta la Tabla 15, se requiere dosificar 15 mg/L de ácido sulfúrico para alcanzar el pH entre 6 y 9.

**4.4.8 Floculación.** Los precipitados formados tienen velocidad de sedimentación muy baja, por lo cual se sugiere emplear floculación para obtener precipitados más sedimentables<sup>333</sup>.

Teniendo en cuenta lo expuesto por los autores Ramírez L y Zorilla J; Franco D cuando se tienen procesos de precipitación de metales pesados no se hace necesario el uso de coagulantes debido a que estos son solubles a pH mayor de 8,5 por lo cual se obtiene precipitado sin ser necesario el uso de éste<sup>334 335</sup>.

De acuerdo a los resultados obtenidos por Ramírez L y Zorilla J<sup>336</sup>; Velasquez C<sup>337</sup>, en donde, para el tratamiento de aguas residuales provenientes de procesos galvánicos, se realizan pruebas de jarras teniendo en cuenta cuatro tipos de floculantes (polímero aniónico de carga alta, polímero aniónico de carga baja, polímero catiónico de carga alta, polímero aniónico de carga baja) se selecciona el polímero aniónico de carga baja, debido a que fue el que mejores resultados presentó al aglomerar la mayoría de iones metálicos presentes en el agua residual, debido a que este se encuentra cargado negativamente<sup>338</sup>, por tanto se tiene en cuenta para el desarrollo de este proyecto polímero aniónico como floculante.

<sup>333</sup> GARCIA, Op. cit., p 96-97.

<sup>334</sup> RAMÍREZ, Lina, Op. cit., p 68.

<sup>335</sup> FRANCO, Op. cit., p 65.

<sup>336</sup> RAMÍREZ, Lina Op. cit., p 70.

<sup>337</sup> VELASQUEZ, Op. cit., p 81.

<sup>338</sup> RAMÍREZ, Lina, Op. cit., p 69.

Teniendo en cuenta el método que sugiere la norma NTC 3903, en el cual se estipula el paso a paso a realizar para el ensayo de jarras, además de consideraciones en el empleo de floculantes<sup>339</sup>, se procedió con el desarrollo del análisis de jarras con cuatro vasos precipitados, en donde se agrega 1L de muestra de agua residual, a cada una de estas, se agrega diferentes dosificaciones del polímero aniónico al 0,1% (Anexo K).

Teniendo en cuenta las dosificaciones establecidas por los autores Franco, Daniela<sup>340</sup>; Velasquez, Johana<sup>341</sup> y Carlos Cano<sup>342</sup> se realizan la adición de 3 mg/L, 5 mg/L, 10 mg/L y 15 mg/L de polímero aniónico al 0,1%, empleando agitación rápida de 120 rpm por 5 minutos, posteriormente se baja la velocidad a 40 rpm por 15 minutos, en el cual se considera el aspecto y tamaño del floc formado en cada uno de los vasos precipitados; finalmente se suspende la agitación y se establece el índice de Willcomb.( Anexo L), el cual se observa en la Tabla 16. Se realizan mediciones de la turbiedad a los 5, 15, 30, 45 y 60 minutos a cada una de las jarras, de esta manera se determina el porcentaje de floc removido (Anexo L), teniendo en cuenta la turbiedad inicial.

**Tabla 16.** Prueba de jarras para seleccionar dosificación de floculante adecuado.

	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4
Turbiedad inicial (NTU)	1,42	1,52	0,75	1,37
Dosificación (mg/L)	3	5	10	15
Índice Willcomb	4	10	8	6

**Fuente:** elaboración propia

Como se observa según los resultados obtenidos (Tabla 17 y Gráfica 7), la jarra que dio mayor porcentaje de floc removido corresponde a la jarra 2, en la cual se dosifico 5 mg/L de polímero aniónico, seleccionado esta cantidad como la indicada para continuar con el desarrollo experimental (Figura 46)

<sup>339</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Gestión ambiental. Agua. Procedimiento para el método de jarras en la coagulación- floculación del agua. NTC 3903. Bogotá, D.C. ICONTEC. Disponible en: <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC3903.pdf>

<sup>340</sup> FRANCO, Op. cit., p 67.

<sup>341</sup> VELASQUEZ, Op. cit., p 80.

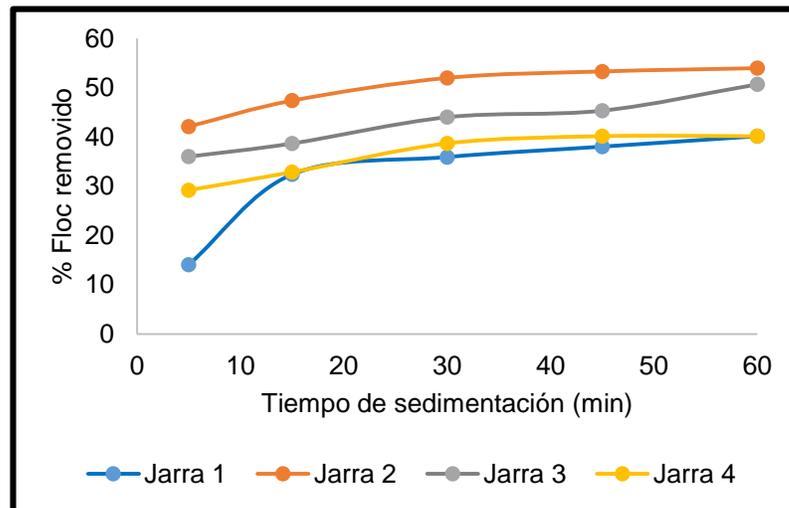
<sup>342</sup> CANO, Carlos. Evaluación de un tratamiento de floculación-flotación para el agua residual generada en el procesamiento de subproductos avícolas. Trabajo de Grado Ingeniero Ambiental. Bogotá D.C: Universidad Libre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Ambiental. 2015. p. 35.

**Tabla 17.** % de floc removido.

Tiempo sedimentación (min)	% Floc removido			
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4
5	14,08	42,11	36,00	29,20
15	32,39	47,37	38,67	32,85
30	35,92	51,97	44,00	38,69
45	38,03	53,29	45,33	40,15
60	40,14	53,95	50,67	40,15

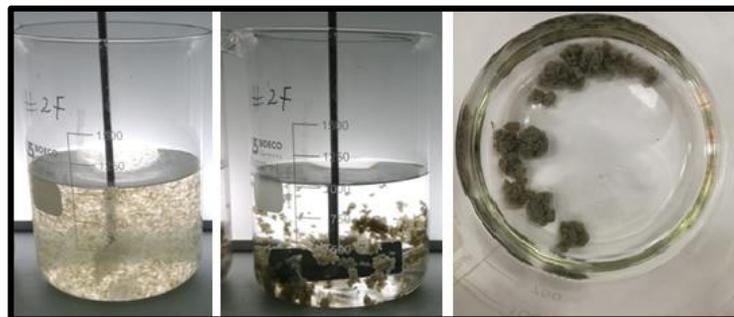
Fuente: elaboración propia

**Gráfica 7.** % de floc removido para diferentes dosificaciones.



Fuente: elaboración propia

**Figura 46.** Formación de flocs.



Fuente: elaboración propia

Se determina la cantidad de lodos generados por litro de agua tratada, teniendo en cuenta el proceso realizado con floculación y sin floculación obteniendo los resultados que se observan en la Tabla 18, los cuales corresponden a un tiempo de sedimentación de una hora y doce horas respectivamente.

**Tabla 18.** % de aumento de cantidad de lodos.

	<b>Cantidad de lodos (g) por litro de agua tratada</b>	<b>% Aumento cantidad de lodos</b>
<b>Con floculación</b>	0,3238	
<b>Sin floculación</b>	0,3198	1,25

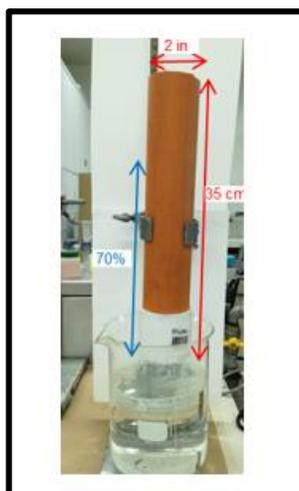
**Fuente:** elaboración propia

Se calcula el porcentaje de aumento de formación de lodos, obteniendo un valor de 1,25 %, teniendo en cuenta que el proceso de sedimentación de lodos con floculación tuvo un tiempo de duración de 1 hora, con respecto al tiempo de sedimentación sin floculación de 12 horas; por lo cual se evidencia que es más conveniente considerar la etapa de floculación, con el fin de disminuir el tiempo de retención del agua residual en el tanque de sedimentación.

**4.4.9 Filtración.** Posterior, de haber seleccionada la dosificación apropiada de floculante, se realiza el proceso de filtración a modo de remover los sólidos suspendidos presentes en el agua, y mejorar la turbidez. El filtro se elaboró con un tubo PVC de 2" de diámetro y con 35 cm de largo, en la parte final se acoplo un adaptador macho y uno hembra con un retenedor de sólidos para evitar la salida de estos. Se deposita grava y arena hasta un 70% del filtro<sup>343</sup>. Al agua obtenida de la etapa de floculación, se hace pasar por el filtro como se observa en la Figura 47, esta desciende por gravedad, durante 15 minutos.

<sup>343</sup> FRANCO, Op. cit., p 68

**Figura 47.** Montaje de laboratorio para filtración.



**Fuente:** elaboración propia

Se determinó la turbiedad antes y después del proceso de filtración para hallar el porcentaje de remoción de la turbiedad, como se observa en la Tabla 19.

**Tabla 19.** % remoción de turbiedad.

<b>Turbiedad (NTU)</b>	<b>Jarra 1</b>	<b>Jarra 2</b>	<b>Jarra 3</b>	<b>Jarra 4</b>
Antes de filtración	0,7	0,63	0,69	0,79
Después de filtración	0,25	0,23	0,24	0,27
% remoción	64,29	63,49	65,22	65,82

**Fuente:** elaboración propia

Se obtiene un promedio de porcentaje de remoción de turbiedad de 64,71%.

#### **4.5 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA TRATADA**

Se realizó la determinación de parámetros que incumplieron con normatividad en la caracterización inicial (níquel, cromo total, cadmio y cianuro total) para la caracterización del agua tratada en el Laboratorio Quimicontrol LTDA, los resultados obtenidos de cada parámetro (Anexo M), en la Tabla 20, se comparan con los valores permitidos por la resolución 0631 del 2015, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, para el vertimiento de aguas residuales al sistema de alcantarillado.

**Tabla 20.** Caracterización agua tratada (metales pesados, cianuro).

Parámetro	Resultado	%Remoción	Resolución 0631 de 2015
Cianuros (ppm)	<0,427	94,33	0,1
Cadmio (ppm)	0,017	99,5	0,05
Cromo (ppm)	0,064	99,54	0,5
Níquel (ppm)	0,063	97,9	0,5

\*Parámetros que incumplen la norma 0631 del 2015

**Fuente:** elaboración propia

Por otra parte, se realizó el análisis de los parámetros DQO, DBO<sub>5</sub>, grasas y aceites, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, pH, y turbiedad, en las instalaciones de laboratorio de calidad de aguas de la Universidad Militar Nueva Granada (Anexo I), los cuales se llevan a cabo mediante lo establecido en el IDEAM, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 21 los cuales son comparados con los valores permitidos por la resolución 0631 del 2015.

**Tabla 21.** Caracterización agua tratada.

Parámetros	Resultado	% Remoción	Resolución 0631 de 2015
Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)	0,1513	99,97	100
Demanda Química de Oxígeno DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	28,8	99,97	250
Grasas y Aceites (ppm)	9,7	90,62	10
pH	8,66		6 a 9
Sólidos Sedimentables (SSED) (ppm)	0	100	2
Sólidos Suspendidos Totales (SST) (ppm)	6,67	99,84	50
Turbiedad (NTU)	0,25	99,89	

**Fuente:** elaboración propia

Con los resultados obtenidos (Tabla 20 y Tabla 21) se observa reducción de los parámetros analizados con respecto a los mostrados en la caracterización inicial (Tabla 6 y Tabla 7), permitiendo el cumplimiento con la resolución 0631 de 2015 para todos los parámetros evaluados excepto para cianuro que presentó 94,33 % de remoción. Se recomienda aumentar la cantidad de oxidantes de cianuro en un 25% para cumplimiento total de la resolución 0631 de 2015.

Al realizar la comparación de los porcentajes de remoción de los parámetros que no cumplían los límites estipulados por la resolución 0631 de 2015 de la alternativa seleccionada con respecto al histórico registrado en la sección 2.3.2 se determina que, para cadmio, cromo, níquel, DBO<sub>5</sub>, DQO y grasas y aceites supera los porcentajes de remoción con el tratamiento seleccionado; sin embargo, por el contrario para cianuro y SST el porcentaje de remoción fue superior en el proceso que se realizaba con anterioridad en la PTAR, pero éste con 10 días más que en el propuesto en el presente proyecto.

Por otro lado, se obtiene por revisión bibliográfica los porcentajes de remoción de para los parámetros evaluados de tratamientos similares (Tabla 22).

**Tabla 22.** Comparación de % de remoción con tratamientos similares.

Parámetro	Franco, Daniela <sup>344</sup>	Caviedes, Diego, et al. <sup>345</sup>	Lizarazo, Paula y Villota, Katya <sup>346</sup>	Garzón, Paola <sup>347</sup>	Velásquez, Johana <sup>348</sup>	Martínez, Adriana <sup>349</sup>	Gaviria, Ana y Meza, Luis <sup>350</sup>
Cianuro	100%		98%	78,84%			>93%
Cromo	99,34	95-99%			99,92%	90,74%	
Níquel	99,95	80-90%		99,96%		99,87%	
Cadmio		95-99%			96,48%	85,07%	
DQO	92,04			0,88%			
DBO <sub>5</sub>	98,86			1,69%			
Sólidos suspendidos totales				78,84%			
Grasas y aceites				42,86%			

**Fuente:** elaboración propia

<sup>344</sup> FRANCO. Op. cit., p. 69

<sup>345</sup> CAVIEDES, Op. cit., p 80.

<sup>346</sup> LIZARAZO, Paula y VILLOTA, Katya. Desarrollo de una propuesta de un sistema para el tratamiento de aguas residuales provenientes del térmico realizado por una empresa metalmeccánica. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2017. p. 52.

<sup>347</sup> GARZÓN, Paola. remoción de cianuros y metales pesados de las aguas residuales de industrias Inca S.A. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 1999.

<sup>348</sup> VELASQUEZ, Op. cit., p 111-112.

<sup>349</sup> MARTÍNEZ, Op. cit., p 114-124.

<sup>350</sup> GAVIRIA, Op. cit., p 31.

Basándose en los porcentajes de la Tabla 22, a continuación, se mencionan los tratamientos empleados por cada una de las referencias bibliográficas, con el fin de comprar estos resultados con los obtenidos mediante el presente proyecto:

- Franco, Daniela; emplea un tratamiento en el que se involucra oxidación cianuro, reducción cromo, precipitación metales, floculación, filtración e intercambio iónico, mediante el cual obtiene porcentajes de remoción inferior al obtenido en el presente proyecto para cianuro y níquel, aunque este teniendo en cuenta una etapa adicional de intercambio iónica lo cual implica aumento de costos para este tratamiento<sup>351</sup>.
- Caviedes, Diego, et al; este artículo se basa en un tratamiento de precipitación química para guas que contienen metales pesados como cromo, níquel y cadmio, en donde se logran menores porcentajes de remoción a los obtenidos en el presente proyecto.<sup>352</sup>
- Lizarazo, Paula y Villota, Katya; en el desarrollo de esta propuesta se tiene en cuenta un sistema de oxidación de cianuro en donde solo se emplea hipoclorito, dando un mayor rendimiento, al obtenido en el presente proyecto, esto dado que esta agua solo tiene presencia de cianuro y no de metales, por lo cual se requiere obtener rendimientos mayores al 98%<sup>353</sup>.
- Garzón, Paola; en este proyecto de grado se realiza un tratamiento de aguas basado en precipitación de metales, oxidación de cianuro, floculación y sedimentación, del cual se obtienen menores porcentajes de remoción de cianuro, DQO, DBO<sub>5</sub>, sólidos suspendidos, grasas y aceites en comparación a los obtenidos mediante el desarrollo del presente proyecto<sup>354</sup>.
- Velásquez, Johana; basándose en un tratamiento de agua que involucra reducción de cromo, precipitación metales, coagulación-floculación y sedimentación, se tiene un mejor resultado para remoción de cromo en comparación a los resultados obtenidos en el presente proyecto, además este tipo de agua no contenía presencia de cianuro<sup>355</sup>.
- Martínez, Adriana; expone un proceso de tratamiento basado en reducción de cromo, precipitación metales, floculación y sedimentación, obteniendo mayor rendimiento en la remoción de níquel, en comparación a los resultados obtenidos en el presente proyecto, cabe resaltar que este tipo de aguas no

---

<sup>351</sup> FRANCO. Op. cit., p. 69

<sup>352</sup> CAVIEDES, Op. cit., p 80.

<sup>353</sup> LIZARAZO, Op. cit., p. 52.

<sup>354</sup> GARZÓN, Op. cit.

<sup>355</sup> VELASQUEZ, Op. cit., p 111-112.

contenía cianuro por lo cual se evitan problemas de inhibición en la remoción de metales<sup>356</sup>.

- Gaviria, Ana y Meza, Luis; en este artículo se tiene en cuenta como tratamiento oxidación cianuro empleando peróxido de hidrógeno e hipoclorito, obteniendo porcentajes de remoción mayores al 93%, lo cual indica que el rendimiento conseguido para el presente proyecto se encuentra dentro de los porcentajes establecidos por los autores<sup>357</sup>.

---

<sup>356</sup> MARTÍNEZ, Op. cit., p 114-124.

<sup>357</sup> GAVIRIA, Op. cit., p 31.

## 5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

En esta capítulo se presentarán las condiciones técnicas de la alternativa seleccionada, especificando cantidades de cada reactivo o materia prima a utilizar, y equipos requeridos, basándose en el desarrollo experimental y los resultados obtenidos de la caracterización del agua tratada.

### 5.1 ESPECIFICACIONES PREVIAS

El proceso de tratamiento de agua residual proveniente del taller de electroquímica es de tipo batch, se llevará a cabo cuando se completen 5.000 L y este tendrá una duración de 2 días laborales teniendo en cuenta los tiempos de retención mostrados en el Cuadro 26 y los equipos mencionados en la Figura 49.

**Cuadro 26.** Tiempos de retención alternativa seleccionada.

Proceso	Equipo	Tiempo de retención (h)
Transferencia de agua almacenada a tanque de sedimentación	De TK2 a TK3	1
Oxidación de cianuro	TK3	2,5
Reducción de cromo	TK3	1
Precipitación de cromo	TK3	1,5
Precipitación de metales	TK3	1,5
Ajuste a pH normatividad	TK3	0,2
Floculación	TK3	0,5
Sedimentación	TK3	*15
Disposición de lodos	De TK3 a TK10, TK11, TK12	2
Filtración	De TK3 a F1 Y F2	3
Vertimiento	De F1 y F2 a sistema de alcantarillado	1

\*Dado a que en el horario laboral de un día no se culmina la realización del tratamiento, la sedimentación posterior a la floculación se realiza durante la noche, hasta comienzo del siguiente día laboral.

**Fuente:** elaboración propia

El proceso se debe realizar de la siguiente manera:

La recolección del agua se llevará a cabo de tal manera que el agua proveniente del taller (Corriente 1) pasa por la trampa de sólidos (T1) y llega al tanque de

almacenamiento (TK1) ya existente, que como se mencionó anteriormente en la sección 2.3.3 no cuenta con la capacidad requerida y por tanto se debe usar un tanque de sedimentación ya existente que no se requiere su uso para esta alternativa, por tanto se empleara como tanque recolector (TK2), es decir que se hace transferencia de la misma (Corriente 3) por medio de la bomba sumergible (B1) hacía el tanque ya mencionado. Al completar un volumen de 5.000 L se realiza transferencia por medio de una bomba centrífuga (B2) al tanque de sedimentación (TK3), en donde comienza el tratamiento dependiendo del pH inicial, de tal forma que si éste se encuentra menor a un rango entre 9-11 se debe adicionar hidróxido de sodio por medio de la bomba dosificadora (D1); si por el contrario el agua ingresa con un pH mayor a 11 se agrega ácido sulfúrico (D3); en los dos casos hasta ajustar el pH requerido para la oxidación de cianuro con velocidad de agitación de 120 rpm por 10 minutos. Seguidamente, para empezar con la etapa de oxidación de cianuro se dosifica peróxido de hidrógeno (D4) e hipoclorito de calcio (D5) con velocidad de agitación de 120 rpm por 5 minutos para la primera adición con 20 minutos de reacción, la segunda adición se debe realizar con la misma velocidad y tiempo de agitación, pero con 60 minutos de reacción.

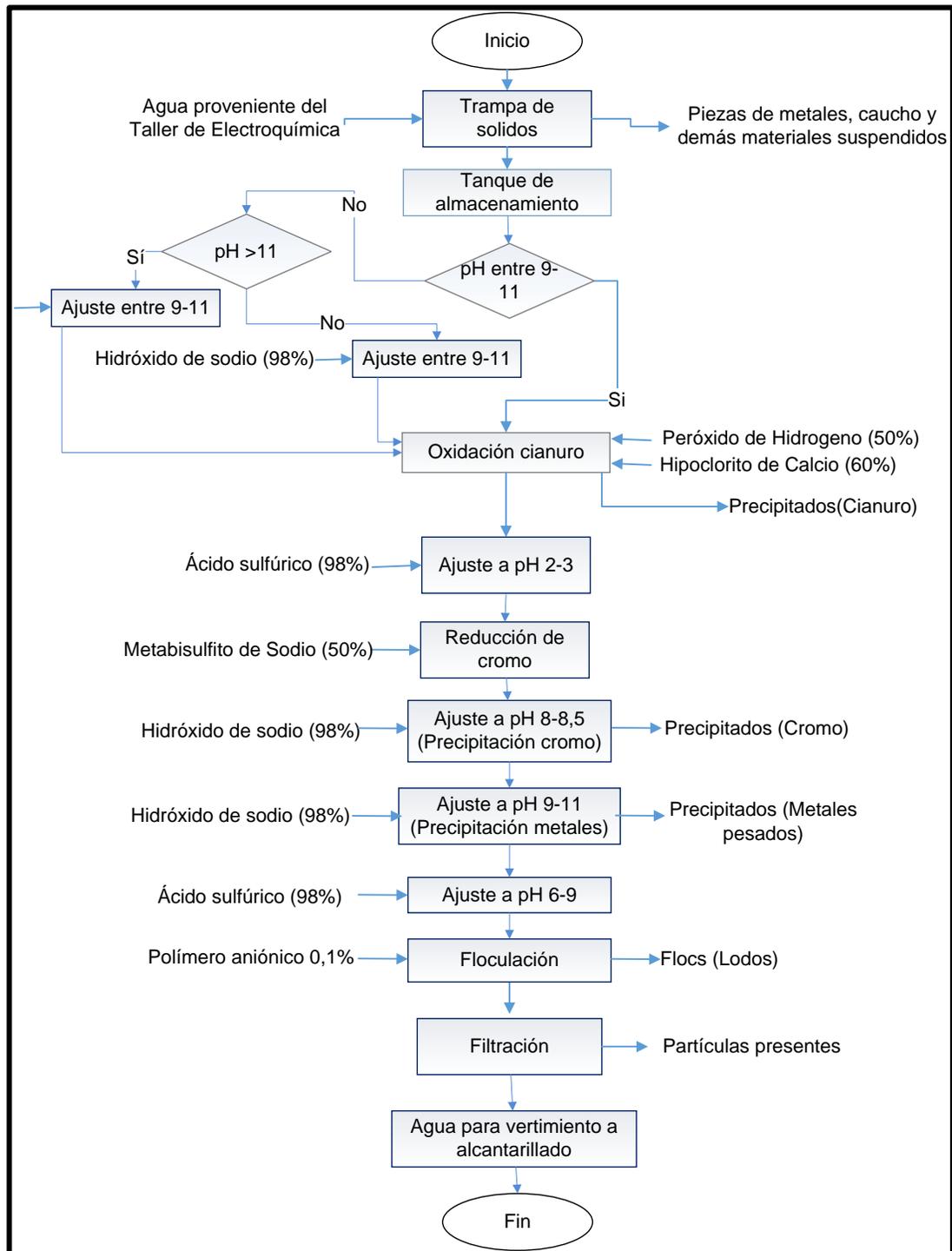
Posteriormente, se debe ajustar el pH con ácido sulfúrico (D3) entre 2-3 para la etapa de reducción de cromo, se debe agregar metabisulfito de sodio (D2) con una velocidad de agitación de 120 rpm por 10 minutos, hasta presentar un cambio de color de amarilla a traslucida, luego ésta se deja por un tiempo de reacción de 30 minutos. Seguidamente se debe dosificar hidróxido de sodio (D1) con el fin de llegar a un pH de 8-8,5 con una velocidad de agitación de 120 rpm por 10 minutos, dejando sedimentar por 60 minutos. Para la precipitación de metales se agrega hidróxido de sodio (D1) con una velocidad de agitación de 120 rpm por 10 minutos para ajustar pH de 9-11, con un tiempo de reacción de 60 minutos. A continuación, se realiza adición de ácido sulfúrico (D3) para modificar el pH entre 6-9 para cumplir con la resolución 0631 del 2015.

En la etapa de floculación se adiciona polímero aniónico (D6) con una velocidad de agitación de 120 rpm por 5 minutos y posteriormente se modifica la velocidad de agitación a 40 rpm por 15 minutos, se deja sedimentar por 60 minutos para la formación de lodos los cuales serán transferidos a los lechos de secado (TK10, TK11, TK12), por medio de la bomba centrífuga (B3). Finalmente, se lleva a cabo la etapa de filtración (F1, F2), en donde se obtiene el agua que será vertida al alcantarillado (Corriente 17).

Además, se cuenta con un tanque de almacenamiento de agua de lavado de filtros (TK13), el cual es empleado posterior a finalizar el proceso para el lavado de estos.

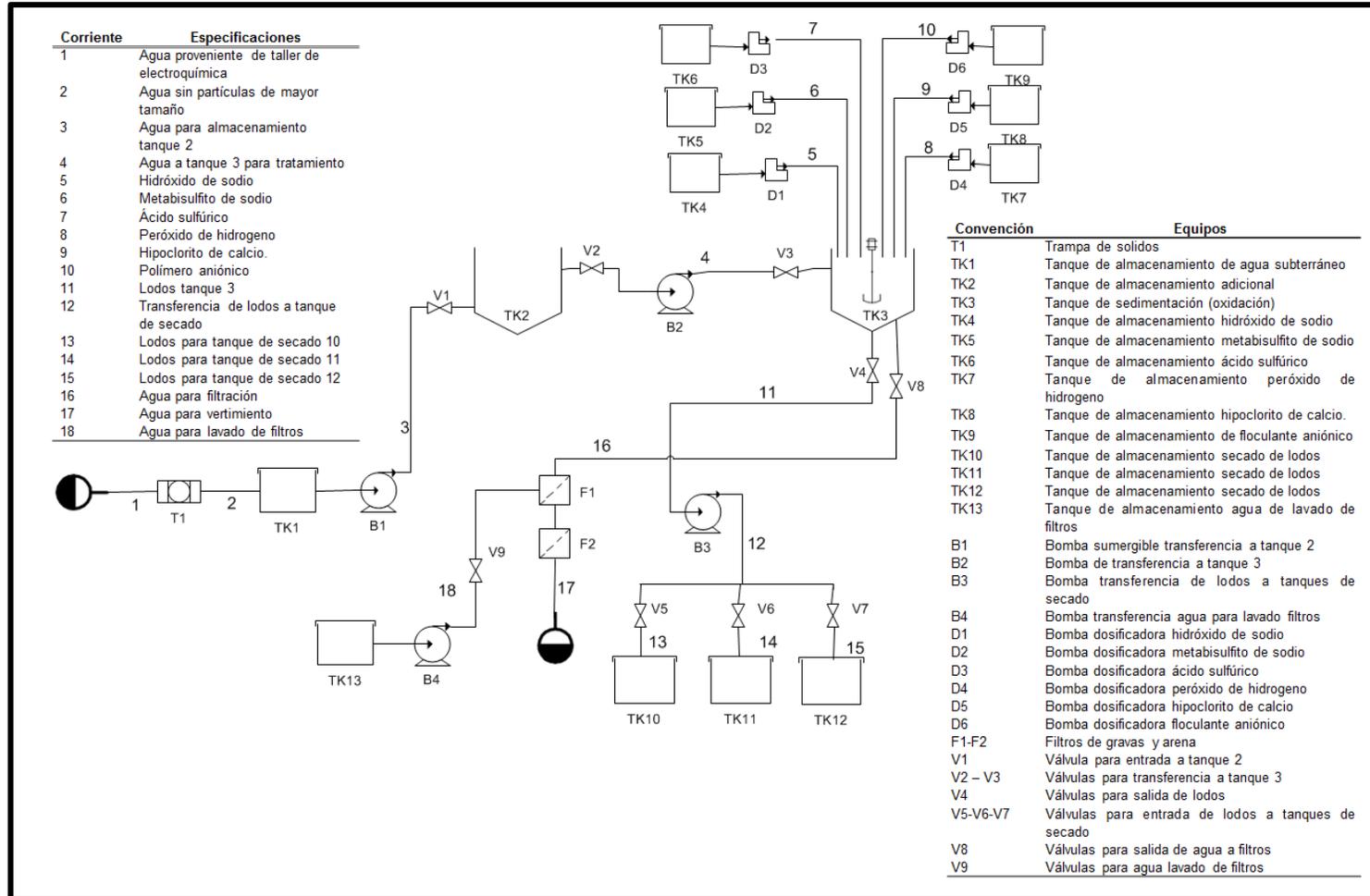
En la Figura 48 y 49 se muestra el proceso de tratamiento de agua seleccionado y el diagrama de proceso respectivamente.

**Figura 48.** Diagrama de Tratamiento seleccionado.



**Fuente:** elaboración propia

Figura 49. Diagrama de proceso PTAR alternativa seleccionada.



Fuente: elaboración propia

## 5.2 CANTIDAD DE MATERIA PRIMA

Mediante el desarrollo experimental se escala la cantidad requerida de reactivos en cada una de las etapas del proceso, para tratar el caudal de agua residual proveniente del taller de electroquímica con un volumen de 5.000 L (Anexo N).

En la Tabla 23 se muestran las cantidades requeridas de materia prima por tratamiento.

**Tabla 23.** Cantidad de materia prima.

<b>Materia Prima</b>	<b>Cantidad para tratamiento de 5.000L</b>
Ácido sulfúrico 98%	3,527 L
Hidróxido de sodio 98%	2,325 kg
Peróxido de hidrógeno 50%	0,188 L
Hipoclorito de calcio 12,5%	0,188 kg
Metabisulfito de sodio 96%	1 kg
Floculante aniónico 0,1%	0,025 kg
Agua	30,33 L

**Fuente:** elaboración propia

## 5.3 BALANCE DE MATERIA

Teniendo en cuenta las cantidades de materia prima requeridas por cada batch de tratamiento (Tabla 23) y la cantidad de agua a tratar, se realiza un balance de materia para el proceso de la alternativa seleccionada.

$$Entrada = Salida$$

$$F_{H_2O (in)} + F_{reactivos} = F_{H_2O (out)} + F_{lodos}$$

$$F_{H_2O (in)} * \rho_{H_2O (in)} + F_{reactivos} * \rho_{reactivos} = F_{H_2O (out)} * \rho_{H_2O (out)} + F_{lodos} * \rho_{lodos}$$

$$F_{H_2O (in)} * \rho_{H_2O (in)} + F_{H_2SO_4} * \rho_{H_2SO_4} + F_{NaOH} * \rho_{NaOH} + F_{H_2O_2} * \rho_{H_2O_2} + F_{Ca(ClO)_2} * \rho_{Ca(ClO)_2} + F_{Na_2S_2O_5} * \rho_{Na_2S_2O_5} + F_{Polimero} * \rho_{Polimero} = F_{H_2O (out)} * \rho_{H_2O (out)} + F_{lodos} * \rho_{lodos}$$

Donde,

$F_{H_2O (in)}$ : Flujo de agua residual de entrada (5.000 L - Corriente 1)

$\rho_{H_2O (in)}$ : Densidad agua residual (1,025 kg/L)

$F_{H_2SO_4}$ : Flujo de ácido sulfúrico (3,527 L – Corriente 7)

$\rho_{H_2SO_4}$ : Densidad ácido sulfúrico (1,84 kg/L)

$F_{NaOH}$  : Flujo de hidróxido de sodio (2,325 L- Corriente 5)  
 $\rho_{NaOH}$ : Densidad hidróxido de sodio (2,13 kg/L)  
 $F_{H_2O_2}$  : Flujo peróxido de hidrógeno (0,188 L- Corriente 8)  
 $\rho_{H_2O_2}$  : Densidad peróxido de hidrógeno (1,11 kg/L)  
 $F_{Ca(ClO)_2}$  : Flujo hipoclorito de calcio (1,054 L- Corriente 9)  
 $\rho_{Ca(ClO)_2}$  : Densidad hipoclorito de calcio (0,8 kg/L)  
 $F_{Na_2S_2O_5}$  : Flujo metabisulfito de sodio (1,92 L – Corriente 6)  
 $\rho_{Na_2S_2O_5}$  : Densidad metabisulfito de sodio (1,2 kg/L)  
 $F_{Polimero}$  : Flujo de polímero aniónico (26,054 L- Corriente 10)  
 $\rho_{Polimero}$  : Densidad polímero aniónico (0,8 kg/L)  
 $F_{H_2O (out)}$ : Flujo agua residual tratada (Corriente 17)  
 $\rho_{H_2O (out)}$ : Densidad agua tratada (1,025 kg/L)  
 $F_{lodos}$ : Flujo de lodos (1,27 L- Corriente 12)  
 $\rho_{lodos}$ : Densidad de lodos (1,27 kg/L)

Reemplazando los valores en el balance anterior

$$\begin{aligned}
 & 5.000L * 1,025 \frac{kg}{L} + 3,527 L * 1,84 \frac{kg}{L} + 2,325 L * 2,13 \frac{kg}{L} + 0,188 L * 1,11 \frac{kg}{L} \\
 & \quad + 1,054 L * 0,8 \frac{kg}{L} + 1,92 L * 1,2 \frac{kg}{L} + 26,054 L * 0,8 \frac{kg}{L} \\
 & = F_{H_2O (out)} * 1,025 \frac{kg}{L} + 1,27 L * 1,27 \frac{kg}{L}
 \end{aligned}$$

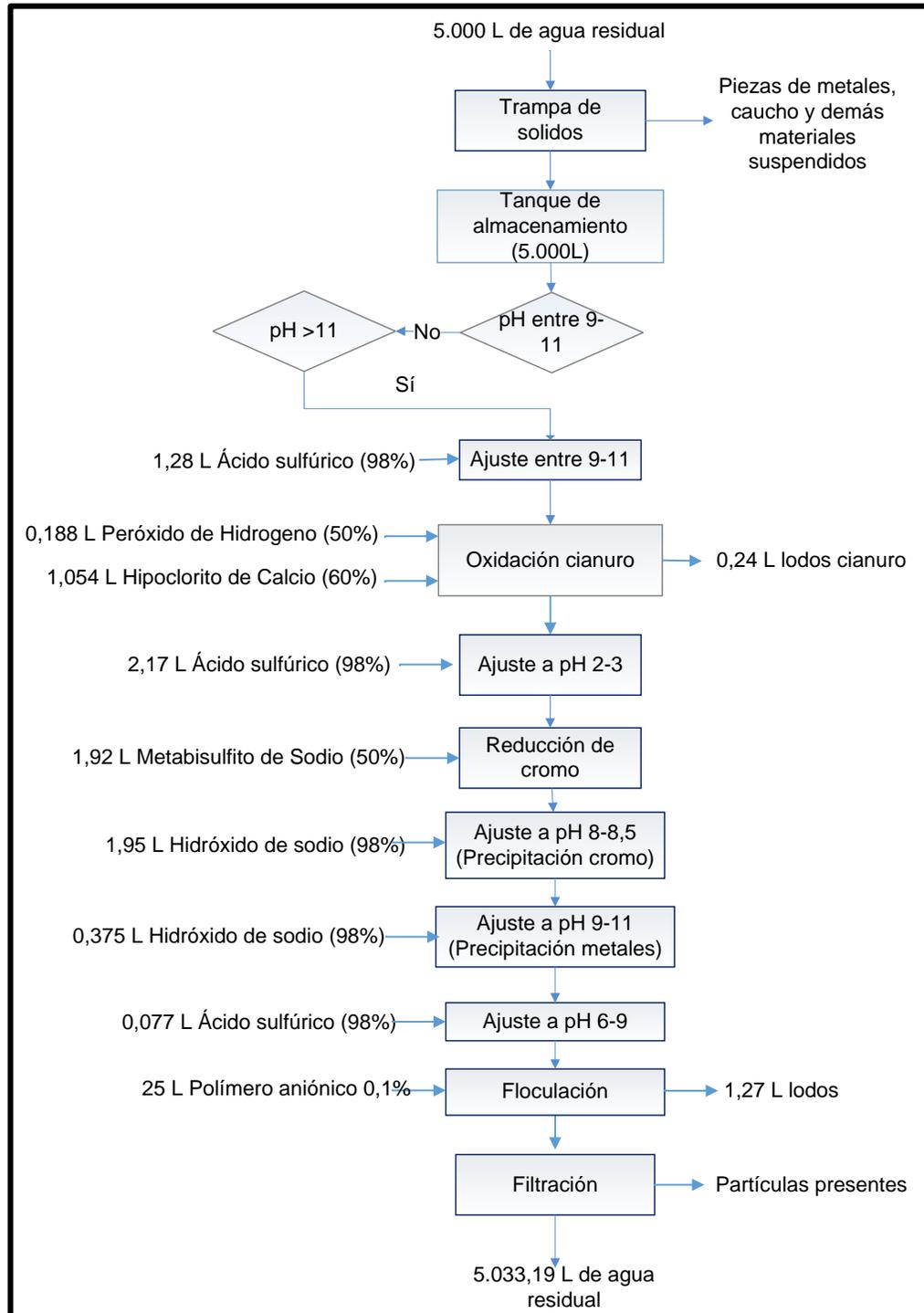
Despejando  $F_{H_2O (out)}$  se obtiene

$$F_{H_2O (out)} = 5.033,1982 L$$

Es decir, que por la corriente 17 que corresponde al agua vertida al sistema de alcantarillado se tienen un volumen de 5.033,1982 L de agua tratada.

En la Figura 50 se muestra el balance de materia por cada etapa de la alternativa de tratamiento seleccionada.

**Figura 50.** Diagrama tratamiento seleccionado con balance de materia.



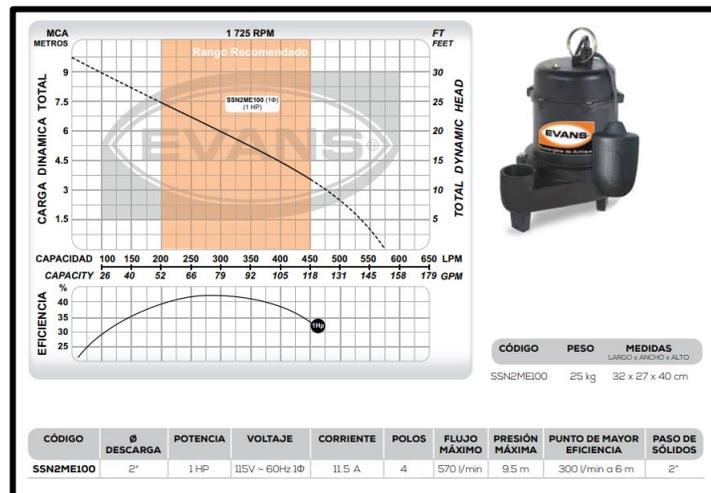
**Fuente:** elaboración propia

## 5.4 ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS

**5.4.1 Tanque de almacenamiento.** Debido a que el tanque de almacenamiento con el que se cuenta actualmente no presenta la capacidad adecuada para almacenar el agua generada en 5 días por el taller de electroquímica, se debe hacer uso del tanque de sedimentación que no será usado para la recolección de la misma, ya que este cuenta con un volumen de 5.000 L, el cual corresponde al agua generada por los 5 días.

**5.4.2 Bomba sumergible.** Para la elección de la bomba sumergible que permite llevar el agua desde el tanque de almacenamiento a los tanques de sedimentación se tiene en cuenta la bomba sumergible clase JP con el código SSN2ME100 perteneciente a la empresa Evans (Figura 51) ésta cuenta con un motor de 4 polos, impulsor tipo canal en hierro gris, sus aplicaciones van desde aguas fluviales, residuales, granjas, industria alimenticias, entre otras; presenta una potencia de 1HP, voltaje de 115 V, un flujo máximo de 570 L/min.

**Figura 51.** Bomba sumergible clase JP.



**Fuente:** HIDRODIRECT. [sitio web]. Ecuador: EVANS.  
 Bomba sumergible clase JP código SSN2ME100. [Consulta 22 abril 2019].  
 Disponible en:  
<https://www.hidrodirect.com/SSN2ME100>.

**5.4.3 Tanque de sedimentación.** Se determinaron las dimensiones requeridas para el tanque de sedimentación, tomando un volumen de agua de 5.000 L ( $5m^3$ ), ya que es la cantidad que se genera en un periodo de 5 días, en estos tanques se realizan los procesos de ajustes de pH, oxidación de cianuro, reducción de cromo, precipitación de metales pesados y floculación; con el fin de obtener agua clarificada, que pasa a filtración y lodos que serán transferidos a lechos de secado por la parte inferior del tanque. Por tal razón, se calcula el volumen del tanque Ecuación 2, considerando un factor de seguridad de 15%<sup>358</sup>.

**Ecuación 2.** Volumen tanque de sedimentación.

$$V_{tanque} = V_{agua\ a\ tratar} + (V_{agua\ a\ tratar} * 0,15)$$

**Fuente:** FRANCO, Daniela. Propuesta para la reutilización de aguas residuales del proceso de recubrimientos electrolíticos de la empresa ZINTEPEC LTDA. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2018. p. 75

$$V_{tanque} = 5m^3 + (5m^3 * 0,15) = 5,75m^3$$

Para determinar el diámetro del tanque, se despeja de la Ecuación 3, considerando volumen del tanque y un factor de diseño que relaciona altura y diámetro de 1,5<sup>359</sup>.

**Ecuación 3.** Volumen del cilindro.

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} * D^2 * h$$

**Fuente:** FRANCO, Daniela. Propuesta para la reutilización de aguas residuales del proceso de recubrimientos electrolíticos de la empresa ZINTEPEC LTDA. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2018. p. 75

Donde,

$D$ : Diámetro del tanque

<sup>358</sup>FRANCO, Op. cit., p 74.

<sup>359</sup> ROMERO ROJAS, Op. cit., p 1093.

$h$ : Altura del tanque

Despejado el diámetro de la Ecuación 3, se obtiene

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V_{tanque}}{\pi * 1,5}} =$$
$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * 5,75m^3}{\pi * 1,5}} = 1,696 m$$

La altura se calcula con la relación  $h/D$  de 1,5 (Ecuación 4)

**Ecuación 4.** Relación  $h/D$ .

$h = 1,5 * D$
---------------

**Fuente:** FRANCO, Daniela. Propuesta para la reutilización de aguas residuales del proceso de recubrimientos electrolíticos de la empresa ZINTEPEC LTDA. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2018. p. 75

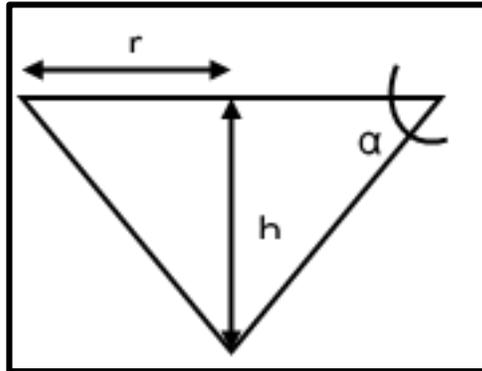
$$h = 1,5 * 1,696m = 2,544m$$

Para la sección cónica del tanque Figura 52, se establece un ángulo de  $45^\circ$  respecto a la horizontal<sup>360</sup>, para obtener la altura de la misma (Ecuación 5)

---

<sup>360</sup> HERNÁNDEZ ARIZALA, Diana y LEAL Paula. Ingeniería básica para una planta de tratamiento de aguas residuales en cárnicos rico jamón. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2009. p.86 .

**Figura 52.** Sección cónica del tanque.



**Fuente:** elaboración propia

**Ecuación 5.** Angulo de inclinación.

$$\tan(\alpha) = \frac{h}{r}$$

**Fuente:** FRANCO, Daniela. Propuesta para la reutilización de aguas residuales del proceso de recubrimientos electrolíticos de la empresa ZINTEPEC LTDA. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2018. p. 75

Donde,

$\alpha$ : Grados de inclinación

$h$ : Altura sección cónica

$r$ : radio de la sección cónica o del tanque

Por tanto, despejando  $h$  se obtiene

$$h_{cono} = r * \tan(\alpha)$$

$$h_{cono} = \frac{1,696m}{2} * \tan(45^\circ) = 0,848 m$$

Posteriormente, se determina el volumen de la sección cónica, Ecuación 6

**Ecuación 6.** Volumen del cono.

$$V_{cono} = \frac{\pi}{3} * r^2 * h$$

**Fuente:** elaboración propia

$$V_{cono} = \frac{\pi}{3} * \left(\frac{1,696m}{2}\right)^2 * 0,848m = 0,638m^3$$

Teniendo el volumen del tanque y del cono, se puede determinar el volumen del cilindro mediante la Ecuación 7

**Ecuación 7.** Volumen del cilindro.

$$V_{cilindro} = V_{tanque} - V_{cono}$$

**Fuente:** elaboración propia

$$V_{cilindro} = 5,75m^3 - 0,638m^3 = 5,112m^3$$

Y por ende la altura del cilindro se obtiene mediante la Ecuación 3

$$h_{cilindro} = \frac{4 * V_{cilindro}}{\pi * D^2} = \frac{4 * 5,112m^3}{\pi * (1,696 m)^2} = 2,263 m$$

$$h_{cilindro} = \frac{4 * 5,112m^3}{\pi * (1,696 m)^2} = 2,263 m$$

Finalmente, se establece la altura total del tanque por medio de la Ecuación 8.

**Ecuación 8.** Altura total tanque.

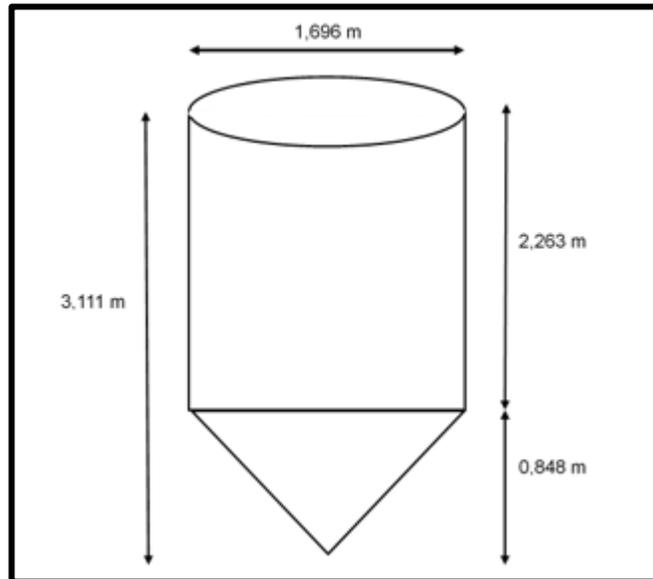
$$h_{total} = h_{cilindro} + h_{cono}$$

**Fuente:** elaboración propia

$$h_{total} = 2,263 m + 0,848m = 3,111 m$$

Para el tanque de sedimentación se obtienen las dimensiones mostradas en la Figura 53.

**Figura 53.** Dimensiones tanque de sedimentación.



**Fuente:** elaboración propia

**5.4.4 Agitador Mecánico.** Para la selección del agitador mecánico requerido para el tanque de sedimentación se cuenta con algunos parámetros determinados del agua sin tratar, a continuación (Cuadro 27).

**Cuadro 27.** Parámetros agua generada en taller de electroquímica.

Parámetro	Valor
Fluido a agitar	Agua residual Industrial
Diámetro del tanque (m)	1,696
Altura del tanque sin sección cónica (m)	2,263
Volumen de agua a tratar (m <sup>3</sup> )	5
Densidad del fluido (kg/ m <sup>3</sup> )	1025
Viscosidad del fluido (kg/m*s)	0,0031
Velocidad de agitación (rpm)	40-120

**Fuente:** elaboración propia

**5.4.4.1 Tipo de agitador.** Para la selección del impulsor del agitador mecánico se tiene en cuenta los tipos y especificaciones establecidos por NOVATEC FLUID SYSTEM S.A. quienes se encargan de diseñar y fabricar estos accesorios, para homogenizar, neutralizar y flocular en contenedores que va desde los 50 a 180.000 galones, estos se observan en el Cuadro 28.

**Cuadro 28.** Tipos de agitadores.

Tipo	Imagen	Aplicaciones	Características
<p>Serie V3 (Velocidad reducida) Propela curva tripala</p>		<p>Homogeneización, preparación de aditivos, suspensiones y polímeros, suspensión de lodos, mezcla lenta y rápida, disoluciones, transferencia térmica, floculaciones, aireador de superficie.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ø Propela: Desde 200 mm hasta 1.800 mm</li> <li>• Velocidades: Hasta 335 RPM</li> <li>• Potencia: Hasta 22 kW</li> <li>• Volumen del depósito: Hasta 1.000 m<sup>3</sup></li> </ul>
<p>Serie V1 (Directo - Velocidad rápida) Hélice marina para bajos caudales</p>		<p>Mezcla sencilla de líquidos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ø Propela: 128 mm y 160 mm</li> <li>• Velocidades: Hasta 1.750 RPM</li> <li>• Potencia: Hasta 1,5 kW</li> <li>• Volumen del depósito: Hasta 0,5 m<sup>3</sup></li> </ul>
<p>Serie V5 (Velocidad reducida) Floculador - Propela bipala</p>		<p>Floculaciones, mezcla lenta, suspensión de lodos biológicos, homogeneización.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ø Propela: Desde 300 mm hasta 3.600 mm</li> <li>• Velocidades: Hasta 70 RPM</li> <li>• Potencia: Hasta 2,2 kW</li> <li>• Volumen del depósito: Hasta 1.000 m<sup>3</sup></li> </ul>
<p>Serie V6 (Velocidad reducida) Propela escualizable (palas plegables)</p>		<p>Homogeneización, preparación de aditivos, mezcla rápida, preparación de polímeros, disoluciones</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ø Propela: 300 mm, 400 mm y 540 mm</li> <li>• Velocidades: Hasta 250 RPM</li> <li>• Potencia: Hasta 1,5 kW</li> <li>• Volumen del depósito: Hasta 1 m<sup>3</sup></li> </ul>

**Cuadro 28. (Continuación).**

Tipo	Imagen	Aplicaciones	Características
Serie T1 (Velocidad rápida) Agitador de Turbina		Mezcla de soluciones acuosas o de baja viscosidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ø Propela: Desde 60 mm hasta 150 mm</li> <li>• Velocidades: 1.100 y 1.650 RPM</li> <li>• Potencia: Hasta 0,9 kW</li> </ul>

**Fuente:** NOVATEC FLUID SYSTEMS S.A. [sitio web]. Colombia. Soluciones Confiables. Sistemas y equipos para el manejo, control, dosificación y agitación de fluidos. [Consulta 22 abril 2019]. Disponible en: <https://novatecfs.com/wp-content/uploads/2018/09/novatec-catalogo-novatecfs.pdf>.

Considerando el Cuadro 28 se tiene en cuenta aquellos agitadores que cumplan con una velocidad de agitación de 40 a 120 rpm, un volumen de 5m<sup>3</sup> y sus aplicaciones, de tal manera que aquel que cumple con las condiciones adecuadas es el Serie V3 (Velocidad Reducida) con impulsor de propela curva tripala que hace parte de un agitador de hélice.

**5.4.4.2 Dimensiones del agitador.** Para calcular el diámetro del agitador, se tiene en cuenta la Ecuación 9<sup>361</sup>.

**Ecuación 9.** Diámetro agitador.

$$D_{agitador} = 0,33 * D_{tanque}$$

**Fuente:** CASTILLO, Vladimir. Diseño y cálculo de un agitador de fluidos. Trabajo de Grado Ingeniero Mecánico. Chile: Universidad del Bío- Bío. Facultad de ingeniería, 2013. p 29. [Citado el 22 de abril del 2019]. Disponible en: [http://repopib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo\\_Uribe\\_Vladimir.pdf](http://repopib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo_Uribe_Vladimir.pdf)

$$D_{agitador} = 0,33 * 1,696m = 0,56m$$

Por otro lado, la distancia entre el fondo del tanque y el agitador (E) se obtiene mediante la Ecuación 10

<sup>361</sup>CASTILLO, Vladimir. Diseño y cálculo de un agitador de fluidos. [en línea]. Trabajo de Grado Ingeniero Mecánico. Chile: Universidad del Bío- Bío. Facultad de ingeniería, 2013. p 29. [Citado el 22 de abril del 2019]. Disponible en: [http://repopib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo\\_Uribe\\_Vladimir.pdf](http://repopib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo_Uribe_Vladimir.pdf)

**Ecuación 10.** Distancia entre el fondo del tanque y el agitador.

$$E = 0,33 * D_{\text{tanque}}$$

**Fuente:** CASTILLO, Vladimir. Diseño y cálculo de un agitador de fluidos. [en línea]. Trabajo de Grado Ingeniero Mecánico. Chile: Universidad del Bío- Bío. Facultad de ingeniería, 2013. p 29. [Citado el 22 de abril del 2019]. Disponible en:  
[http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo\\_Uribe\\_Vladimir.pdf](http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo_Uribe_Vladimir.pdf)

$$E = 0,33 * 1,696m = 0,56m$$

Con la distancia E, se calcula la longitud mínima del eje del agitador con la Ecuación 11

**Ecuación 11.** Longitud agitador.

$$L_{\text{eje}} = h_{\text{tanque}} - E$$

**Fuente:** CASTILLO, Vladimir. Diseño y cálculo de un agitador de fluidos. [en línea]. Trabajo de Grado Ingeniero Mecánico. Chile: Universidad del Bío- Bío. Facultad de ingeniería, 2013. p 29. [Citado el 22 de abril del 2019]. Disponible en:  
[http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo\\_Uribe\\_Vladimir.pdf](http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo_Uribe_Vladimir.pdf)

$$L_{\text{eje}} = 2,263m - 0,56m = 1,703m$$

**5.4.4.3 Potencia de trabajo requerida.** Esta se calcula teniendo en cuenta la Ecuación 12 relación de número de Reynolds ( $Re$ ) y numero de potencia, como se muestra a continuación.

**Ecuación 12.** Numero de Reynolds.

$$Re = \frac{N * (D_{agitador})^2 * \rho}{\mu}$$

**Fuente:** FRANCO, Daniela. Propuesta para la reutilización de aguas residuales del proceso de recubrimientos electrolíticos de la empresa ZINTEPEC LTDA. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2018. p. 80

Donde,

$N$ : Velocidad de rotación (rps), se debe tomar la mayor velocidad de trabajo

$D_{agitador}$ : Diámetro del agitador

$\rho$ : Densidad de agua residual

$\mu$ : Viscosidad de agua residual

$$Re = \frac{2rps * (0,56m)^2 * 1025 \text{ kg/m}^3}{0,0031 \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}}} = 207380,64$$

Mediante el número de Reynolds, se determina si el fluido es turbulento o laminar, sabiendo que

Régimen laminar:  $Re < 10$

Régimen transitorio:  $300 < Re < 10000$

Régimen turbulento:  $Re > 10000$

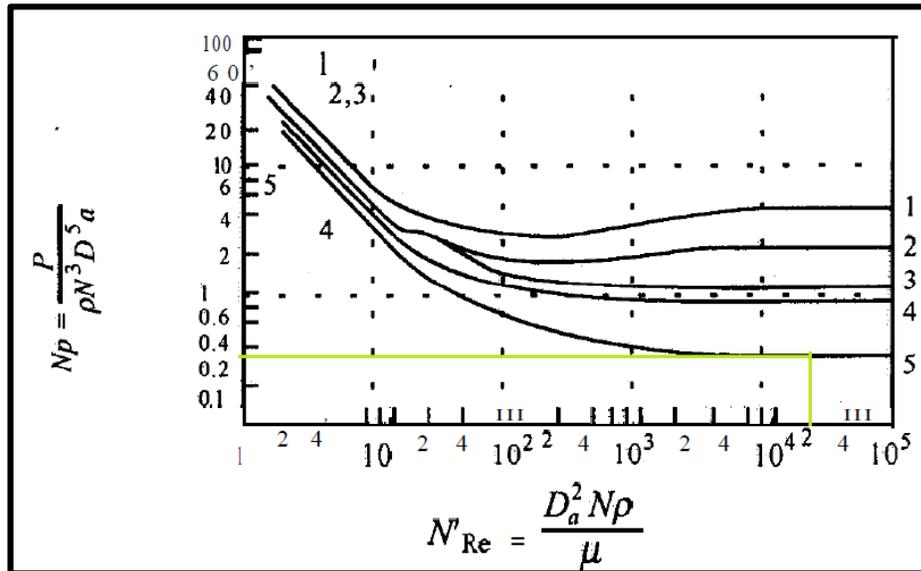
De tal manera, que para este caso se tiene un régimen turbulento de 207380,64

Para determinar el número de potencia ( $Np$ ), se determina con la Figura 54 teniendo en cuenta la curva 5 que corresponde a un propulsor en posición angular sin deflectores en el tanque<sup>362</sup>, por tanto, el número de potencia es 0,36.

---

<sup>362</sup> GEANKOPLIS, Christie. J. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Tercera edición. México. Compañía editorial continental S.A de CV.1998.165 p. ISBN 9682613167.

**Figura 54.** Curva experimental número de potencia  $N_p$ .



**Fuente:** GEANKOPLIS, Christie. J. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Tercera edición. México. Compañía editorial continental S.A de CV.1998.165 p. ISBN 9682613167

La potencia, se calcula por medio de la Ecuación 13,

**Ecuación 13.** Potencia agitador.

$$P = N_p * N^3 * (D_{agitador})^5 * \rho$$

**Fuente:** FRANCO, Daniela. Propuesta para la reutilización de aguas residuales del proceso de recubrimientos electrolíticos de la empresa ZINTEPEC LTDA. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2018. p. 82

Donde,

$P$ : Potencia

$N_p$ : Número de potencia

$N$ : Velocidad de rotación

$D_{agitador}$ : Diámetro del agitador

$\rho$ : Densidad de agua residual

$$P = 0,35 * (2rps)^3 * (0,56m)^5 * 1025 \frac{kg}{m^3} = 158,06 W$$

En el Cuadro 29 se muestran las especificaciones técnicas para los agitadores requeridos

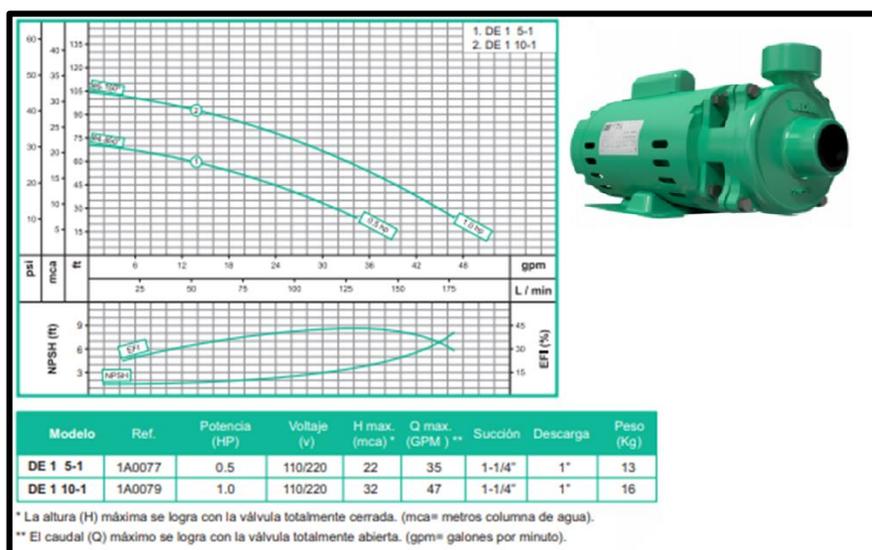
**Cuadro 29.** Características agitador.

<b>Características del agitador seleccionado</b>	
Tipo de agitador	Mecánico giratorio tripala
Material	Acero inoxidable
Longitud de eje	1,703 m
Diámetro	0,56 m
Potencia	158,06 W
Velocidad	40-120 rpm

**Fuente:** elaboración propia

**5.4.5 Bombas centrífugas.** Para la elección de las bombas centrífugas que permite llevar el agua entre los tanques de sedimentación, a los filtros de gravas, y a los lechos de secado, se tiene en cuenta la bomba centrífuga modelo 5-1 referencia 1A0077 perteneciente a la empresa Barnes (Figura 55), ésta cuenta con un motor eléctrico con 1 fase, voltaje de 110/220 V, con potencia de 0,5 HP con un caudal máximo de 132,5 L/min; con aplicaciones en aguas limpias, torres de enfriamiento, plantas de tratamiento, riego por goteo, entre otras.

**Figura 55.** Bomba centrífuga Barnes.



**Fuente:** BARNES. [sitio web]. Colombia. Bomba Sumergible. [Consulta 23 abril 2019]. Disponible en: <http://www.barnes.com.co/>.

**5.4.6 Bombas y tanques de dosificación.** El tratamiento requiere de 6 bombas dosificadoras y por tanto de 6 tanques donde se encuentren almacenadas las soluciones a dosificar durante el proceso. Se tiene en cuenta la bomba modelo CP-63 perteneciente a la empresa Blue-White (Figura 56), ésta cuenta con un caudal de 8L/h y 3 bar, es de tipo diafragma, y cuenta con un motor monofásico, voltaje de 110 V con aplicaciones en clarificantes, floculantes, entre otros.

**Figura 56.** Bomba dosificadora Blue-White.



**Fuente:** BARNES. [sitio web]. Colombia. Bomba Dosificadora Blue- White. [Consulta 23 abril 2019]. Disponible en: <http://www.barnes.com.co/>

Actualmente se cuenta con 4 bombas dosificadoras y tanques de preparación de reactivos cada uno con las siguientes capacidades; tanque de ácido sulfúrico 500 L, tanque de hidróxido de sodio 200 L, tanque de peróxido de hidrógeno 100 L, tanque hipoclorito de calcio 150 L. Por tanto, es necesario adquirir dos bombas dosificadoras y dos tanques.

**5.4.7 Tuberías y válvulas.** Se requiere de tubería de PVC (policloruro de vinilo) debido a que esta presenta resistencia a la corrosión de las sustancias empleadas durante el tratamiento; se debe usar tubería con diámetro de 1 1/2 pulgada.

La planta necesita 9 válvulas de paso tipo bola, como se muestra en la Figura 49 con las que ya se cuentan actualmente.

**5.4.8 Filtros.** Luego de la etapa de oxidación de cianuro, precipitación química y floculación, se lleva a cabo la filtración rápida dado que se realiza por medio de gravedad.

Se determina el número de filtros necesarios mediante la Ecuación 14 teniendo en cuenta un caudal de 42 L/min (60,48 m<sup>3</sup>/d).

**Ecuación 14.** Numero de filtros.

$$n = 0,044 \sqrt{Q}$$

**Fuente:** RAMÍREZ, Lina y ZORRILLA, Jorge. Ingeniería Básica para el tratamiento de los vertimientos del proceso de Zincado en ASTECNICA LTDA. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2010. p 119.

Donde,

$n$ : Numero de filtro

$Q$ : Caudal  $m^3/d$

$$n = 0,044\sqrt{60,48 m^3/d} = 0,34 \cong 1 \text{ filtro}$$

Para este caudal se requiere un filtro de arena, posteriormente se determina el área superficial del filtro utilizando la Ecuación 15.

**Ecuación 15.** Tasa de filtración.

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

**Fuente:** RAMÍREZ, Lina y ZORRILLA, Jorge. Ingeniería Básica para el tratamiento de los vertimientos del proceso de Zincado en ASTECNICA LTDA. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2010. p 119.

Donde,

$q$ : Tasa de filtración ( $120m/d$ )<sup>363</sup>

$Q$ : Caudal  $m^3/día$

$A_s$ : Área superficial

<sup>363</sup> ROMERO ROJAS, Jairo A. Purificación Del Agua. 2ª ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2006. 473 p. ISBN 9588060664

$$A_s = \frac{60,48 \text{ m}^3/d}{120 \text{ m/d}} = 0,5 \text{ m}^2$$

Mediante la Ecuación 16 se determina el ancho del filtro

**Ecuación 16.** Ancho del filtro.

$$B = \sqrt{\frac{A_s}{N_f}}$$

**Fuente:** RAMÍREZ, Lina y ZORRILLA, Jorge. Ingeniería Básica para el tratamiento de los vertimientos del proceso de Zincado en ASTECNICA LTDA. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2010. p 120.

Donde,

$B$ : Ancho del filtro (m)

$A_s$ : Área superficial del filtro (m<sup>2</sup>)

$N_f$ : Numero de filtros

$$B = \sqrt{\frac{0,5 \text{ m}^2}{1}} = 0,71 \text{ m}$$

Se determina la longitud del filtro usando la Ecuación 17

**Ecuación 17.** Longitud del filtro.

$$L_T = \frac{A_s}{B}$$

**Fuente:** RAMÍREZ, Lina y ZORRILLA, Jorge. Ingeniería Básica para el tratamiento de los vertimientos del proceso de Zincado en ASTECNICA LTDA. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2010. p 120.

Donde,

$L_T$ : Longitud del filtro (m)

$B$ : Ancho del filtro (m)

$A_S$ : Área superficial del filtro (m<sup>2</sup>)

$$L_T = \frac{0,5 \text{ m}^2}{0,71 \text{ m}} = 0,7 \text{ m}$$

Basándose en lo establecido por la norma RAS 2000 para filtros por gravedad de arena se recomienda una profundidad de lecho entre 0,5-0,9 m y para grava de 0,3m. Para este diseño se selecciona los siguientes criterios:<sup>364</sup>

- Profundidad de grava: 0,3m
- Profundidad de arena: 0,3m

Teniendo en cuenta el área superficial y la profundidad de grava y arena establecida anteriormente, se determina que la altura de lodos corresponderá a un valor de 0,1 m.

**5.4.9 Lechos de secado de lodos.** Se requiere de tanque de lecho de secado, para la disposición de lodos residuales, por tanto, se determinan las dimensiones del mismo, teniendo en cuenta que en el desarrollo experimental se obtuvo 0,3238 g/ L de agua tratada, es decir que para el tratamiento de 5.000 L se producen 1,619 kg de lodo aproximadamente. La densidad del lodo corresponde 1,27 kg/L (Anexo I), por tanto, el volumen se determina de la siguiente manera

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{1,619 \text{ kg}}{1,27 \text{ kg/L}} = 1,27 \text{ L}$$

Se requiere un lecho de secado con capacidad de 1,27 L por tratamiento, es decir, que como estos son eliminados cada 4 meses, los lechos de secado deben contar con mínimo 25,4L.

## 5.5 EQUIPOS Y ACCESORIOS DE PROCESO

A continuación, en el Cuadro 30 se exponen los equipos y accesorios requeridos para la implementación de la alternativa seleccionada, de igual modo se tiene en cuenta el criterio de disponibilidad a modo de identificar si se cuenta o no con estos actualmente.

---

<sup>364</sup> RAMÍREZ, Lina. Op. cit., p 120.

**Cuadro 30.** Equipos y accesorios de proceso.

<b>Cantidad</b>	<b>Equipo / Accesorio</b>	<b>Criterio de disponibilidad</b>
1	Tanque de almacenamiento	Existente
1	Trampa de sólidos	Existente
1	Bomba sumergible 1HP	Existente
1	Tanque de sedimentación	Existente
1	Agitador mecánico (propela curva tripala)	No existente
3	Bomba centrífuga 0,5 HP	Existente
6	Bombas dosificadoras de reactivos	Se cuenta con 4 de estas
6	Tanques para dosificación de reactivos	Se cuenta con 4 de estos
	Válvulas de paso tipo bola	Existente
1	Filtro de arena y grava	Existente
1	Lechos de secado	Existente
9	Válvulas tipo bola	Existente

**Fuente:** elaboración propia

Tal como se observa en la Tabla 30, dentro de los equipos y accesorios necesarios para la implementación de la alternativa seleccionada, se requiere adquirir dos bombas dosificadoras una para el metabisulfito de sodio y otra para el floculante aniónico; además dos tanques para la dosificación para estas soluciones de 250 L y 500 L respectivamente y un agitador mecánico. Por otro lado, actualmente existen dos filtros que cuentan con igual área superficial que la determinada en la sección 5.3.8 por tanto, no se necesita adquirir este equipo, asimismo, con los filtros existentes se cumple con la longitud calculada.

Cabe resaltar que los equipos que existen actualmente cuentan con la capacidad requerida para tratar la totalidad del agua producida por el taller de electroquímica debido a que el tiempo de retención del proceso disminuyó de 12 días a 2 días; el agua generada durante estos días será almacenada en el tanque de sedimentación TK2 para procesar 5.000 L de agua residual en cada lote.

## 6. ANALISIS FINANCIERO

El presente capítulo comprende un análisis financiero de la alternativa seleccionada, además de determinación de costos que conlleva la sanción por incumplimiento de normatividad para vertimientos de aguas residuales industriales al sistema de alcantarillado

### 6.1 COSTOS INVERSIÓN

Para determinar el costo de inversión de la propuesta seleccionada, se calcula el costo total de adquisición de equipos y accesorios requeridos para la misma, como se observa en la Tabla 24 Las cotizaciones de cada equipo se encuentran en el Anexo O.

**Tabla 24.** Costos de inversión de equipos y accesorios.

Cantidad	Equipos	Valor unitario(\$)	Valor total(\$)
2	Bombas dosificadoras	1.309.000	2.618.000
1	Tanques de para dosificación (250L)	124.010	124.009,5
1	Tanques de para dosificación (500 L)	221.923	221.923
1	Agitador mecánico	20.880.000	20.880.000
<b>Total</b>			<b>23.843.933</b>

**Fuente:** elaboración propia

Por tanto, el costo de inversión para la alternativa seleccionada es de \$ 23.843.933 Se procede a determinar la anualidad de inversión, tal como se observa en la Ecuación 18.

**Ecuación 18.** Anualidad inversión.

$$anualidad_{inversión} = inversión * \frac{i * (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

**Fuente:** elaboración propia

En donde,

*i*: Tasa de interés

*n*: Tiempo de vida del proyecto

Se toma una tasa de oportunidad del 20% basándose en la tasa de interés de oportunidad que el banco ofrece y un tiempo de vida del proyecto de 5 años.

$$anualidad_{inversion} = 23.843.933 * \frac{0,2 * (1 + 0,2)^5}{(1 + 0,2)^5 - 1} = 7.972.927,24$$

Es decir que el valor de anualidad de inversión es de \$ 7.972.927,24.

## 6.2 COSTOS DE OPERACIÓN

El costo de operación de la alternativa seleccionada, se determina teniendo en cuenta costos de materia prima, servicio público, tratamiento de lodos y depreciación de equipos.

Para los costos de operación anuales se tuvo en cuenta que por mes se realizaran alrededor de 5 tratamientos y se trabajan los 12 meses del año, es decir:

$$Costo\ o\ valor\ anual = 5\ tratamientos * 12\ meses * valor\ por\ tratamiento$$

**6.2.1 Costos materia prima.** A continuación, en la Tabla 25 y Tabla 26 se muestran los costos de las materias primas requeridas para la alternativa seleccionada. Las cotizaciones de cada materia prima se encuentran en el Anexo O.

**Tabla 25.** Costo reactivos.

<b>Materia prima</b>	<b>Valor unitario(\$)</b>	<b>Cantidad tratamiento</b>	<b>Valor por tratamiento(\$)</b>	<b>Valor mensual(\$)</b>	<b>Valor anual(\$)</b>
Ácido sulfúrico 98% (L)	1.809	3,527	6.380	31.898	382.778
Hidróxido de sodio 98% (kg)	4.100	2,325	9.533	47.663	571.950
Peróxido de hidrógeno 50% (L)	3.800	0,188	714	3.572	42.864
Hipoclorito de calcio 70% (kg)	8.200	0,188	1.542	7.708	92.496
Metabisulfito de sodio 96% (kg)	2.892	1	2.892	14.459	173.502
Floculante aniónico (kg)	41.650	0,025	1.041	5.206	62.475
<b>Total</b>					<b>1.326.065</b>

**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 26.** Costos sistema de filtración.

<b>Materia prima</b>	<b>Valor unitario(\$)</b>	<b>Cantidad anual (kg)</b>	<b>Valor anual(\$)</b>
Arena para filtro	595	187,54	111.586,30
Grava para filtro	1.071	178,5	191.173,50
<b>Total</b>			<b>302.759,80</b>

**Fuente:** elaboración propia

Es decir que el costo de materias prima es de \$ 1.628.824.

**6.2.2 Costos servicio público.** Para la alternativa seleccionada se tiene en cuenta dentro de los servicios públicos, el de la energía eléctrica (Anexo O), en el cual se tienen en cuenta los equipos que requiere de esta, sabiendo que el valor por kWh es de \$435,56 y agua de servicio para la preparación de soluciones y para el retrolavado de los filtros para el Comando Aéreo de Mantenimiento, en la Tabla 27 y Tabla 28 respectivamente, se muestra el costo y consumo que requiere.

**Tabla 27.** Costos servicio público energía.

<b>Equipo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Potencia (kW)</b>	<b>Costo anual por unidad (\$)</b>	<b>Costo anual total (\$)</b>
Bombas dosificadoras	6	1	0,015	383,29	2.299,76
Bombas centrifugas	2	1	0,37	9.669,43	19.338,86
Bomba sumergible	1	1,5	0,75	29.400,30	29.400,30
Agitador mecánico	1	3	0,158	12.387,33	12.387,33
<b>Total</b>					<b>63.426,25</b>

**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 28.** Costos de acueducto.

<b>Agua de servicio</b>	<b>Valor unitario (\$/L)</b>	<b>Cantidad tratamiento (L)</b>	<b>Valor por tratamiento (\$)</b>	<b>Valor mensual (\$)</b>	<b>Valor anual (\$)</b>
Preparación soluciones	2,66	30,33	80,68	403,39	4.840,67
Retrolavado	2,66	300	798	3.990	47.880
<b>Total</b>					<b>52.720,67</b>

**Fuente:** elaboración propia

Es decir que el costo del consumo energético y de agua por año es de \$ 116.146,92.

**6.2.3 Costo tratamiento de lodos.** Para el tratamiento de lodos como se había mencionado en la sección 2.2 la empresa Ambiente & Soluciones S.A.S se encarga de la disposición de los mismos, los costos que implican estos se presentan a continuación en el Anexo O, en donde se especifica \$3.500 por kilogramo de lodo residual, por tanto, teniendo en cuenta que por tratamiento se disponen aproximadamente de 1,619 kg, y que estos son recogidos por la empresa cada 4 meses. En la Tabla 29 se muestran los costos por tratamiento y anual para el tratamiento de lodos.

**Tabla 29.** Costo tratamiento de lodos.

<b>Cantidad lodo por tratamiento (kg)</b>	<b>Costo disposición lodos (\$/kg)</b>	<b>Costo disposición por tratamiento (\$)</b>	<b>Costo disposición anual(\$)</b>
1,619	3.500	5.666,5	339.990

**Fuente:** elaboración propia

Lo cual quiere decir que la disposición de lodos anual tendrá un costo de \$ 339.990.

**6.2.4 Depreciación de equipos.** Teniendo en cuenta un periodo de diez años, se determina el costo de la depreciación de los equipos en línea recta, como se observa en la Ecuación 19.

**Ecuación 19.** Depreciación equipos en línea recta.

$$Depreciación\ línea\ recta = \frac{Cb - Vs}{n}$$

**Fuente:** elaboración propia

En donde,

*Cb*: Costo inversión

*Vs*: Valor salvamento

*n*: Periodo depreciación

$$Depreciación\ línea\ recta = \frac{23.843.933 - 2.384.393}{10} = \$2.145.954$$

Se tiene en cuenta un valor de salvamento del 10% del costo de los equipos y se obtiene como resultado una depreciación en línea recta de \$ 2.145.954.

Es decir que el costo total anual de operación para la implementación de la propuesta seleccionada es de \$4.230.915.

### 6.3 ANUALIDAD SALVAMENTO.

Se tiene en cuenta un valor de salvamento del 10% del costo de los equipos, además de una tasa de interés de 20% basándose en la tasa de interés de oportunidad que el banco ofrece, por tanto, para determinar la anualidad del salvamento se tiene en cuenta la Ecuación 20.

**Ecuación 20.** Anualidad salvamento.

$$anualidad_{salvamento} = \frac{valor_{salvamento}}{\frac{(1+i)^n - 1}{i}}$$

**Fuente:** RAMÍREZ, Lina y ZORRILLA, Jorge. Ingeniería Básica para el tratamiento de los vertimientos del proceso de Zincado en ASTECNICA LTDA. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2010. p 90

En donde,

*i*: Tasa de interés (20%)

*n*: Tiempo de vida del proyecto

$$anualidad_{salvamento} = \frac{2.384.393}{\frac{(1+0,2)^5 - 1}{0,2}} = \$ 320.414,02$$

Se obtiene como resultado una anualidad de salvamento de \$ 320.414,02.

### 6.4 COSTO ANUAL EQUIVALENTE (CAE)

Con los costos anuales totales, la anualidad de inversión y la anualidad de salvamento se determinan el costo anual equivalente, mediante la Ecuación 21.

**Ecuación 21.** Costo anual equivalente.

$$CAE(i) = anualidad_{inversion} + costos\ total - anualidad_{salvamento}$$

**Fuente:** RAMÍREZ, Lina y ZORRILLA, Jorge. Ingeniería Básica para el tratamiento de los vertimientos del proceso de Zincado en ASTECNICA LTDA. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2010. p 90

$$CAE(0,2) = 7.972.927,24 + 7.837.403,30 - 320.414,02 = \$ 15.489.916,52$$

Como se puede observar el valor anual que presenta la implementación y el funcionamiento de la planta corresponde a \$ 15.489.916,52 teniendo en cuenta una tasa de interés de oportunidad del 20% anual durante un periodo de 5 años.

## 6.5 SANCIÓN AMBIENTAL

De acuerdo a lo estipulado en la resolución 2086 del 25 de octubre de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, se determinan los costos que implicarían una posible multa por incumplimiento de la resolución 0631 de 2015.

Considerando el artículo 3° de la resolución ya mencionada, se tienen en cuenta los siguientes criterios:

*B*: Beneficio ilícito

*A*: Circunstancias agravantes y atenuantes

$\alpha$ : Factor de temporalidad

*Ca*: Costos asociados

*i*: Grado de afectación ambiental

*Cs*: Capacidad socioeconómica del infractor

Según el artículo 4° la tasación de multas que las autoridades ambientales deben tener como referencia, se determina mediante la Ecuación 22.

**Ecuación 22.** Tasación de multa.

$$Multa = B + [(\alpha * i) * (1 + A) + Ca] * Cs$$

**Fuente:** MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 2086 del 25 de octubre de 2010. En: MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. p.3 [Sitio web]. Minambiente. [Consulta 01 de mayo 2018]. Archivo pdf. Disponible en: [http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemas/pdf/Regimen-Sancionatorio-Ambiental/res\\_2086\\_251010.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemas/pdf/Regimen-Sancionatorio-Ambiental/res_2086_251010.pdf)

**6.5.1 Beneficio ilícito.** Se determina mediante la Ecuación 23.

**Ecuación 23.** Beneficio ilícito.

$$|B| = \frac{Y * (1 - p)}{p}$$

**Fuente:** MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 2086 del 25 de octubre de 2010. En: MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. p.4 [Sitio web]. Minambiente. [Consulta 01 de mayo 2018]. Archivo pdf. Disponible en: [http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemas/pdf/Regimen-Sancionatorio-Ambiental/res\\_2086\\_251010.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemas/pdf/Regimen-Sancionatorio-Ambiental/res_2086_251010.pdf)

En donde,

*B*: Beneficio ilícito obtenido por el infractor

*Y*: Sumatoria de ingresos y costos (costos evitados)

*p*: Capacidad de detección de la conducta la cual está en función de las condiciones de la autoridad ambiental y puede tomar los siguientes valores

- Capacidad de detección baja:  $p=0,40$
- Capacidad de detección media:  $p=0,45$
- Capacidad de detección alta:  $p=0,50$

De acuerdo con los valores anteriores para la FAC se establece un valor de  $p=0,50$ .

Los costos evitados se hallan teniendo en cuenta la operación de inversiones que es el costo en el que habría incurrido el infractor por la operación de la inversión que debió realizar; este es el caso de plantas de tratamiento de aguas residuales que requieren inversión en mano de obra e insumos para su operación y las inversiones en equipos, infraestructura, instrumentos<sup>365</sup>. Considerando lo anterior, este valor representa el mismo que el CAE ya que está asociado al costo total del tratamiento de agua residual.

Debido a que el infractor no se queda con todo el beneficio ilícito, sino que un porcentaje es destinado al pago de impuestos se realiza un dispuesto tributario mediante la Ecuación 24.

**Ecuación 24.** Costos evitados.

$$Y_2 = C_E * (1 - T)$$

**Fuente:** MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Metodología para el cálculo de multas por infracción a la normativa ambiental. Bogotá, 2010. 12 p. En: Autoridad Nacional de licencias ambientales. [Sitio web]. ANLA. [Consulta 01 de mayo 2018]. Archivo pdf. Disponible en: [http://portal.anla.gov.co/documentos/tramites\\_servicios/Metodolog%C3%ADa-c%C3%A1lculo-multas-por-infracci%C3%B3n-a-la%20normativa-ambiental.pdf](http://portal.anla.gov.co/documentos/tramites_servicios/Metodolog%C3%ADa-c%C3%A1lculo-multas-por-infracci%C3%B3n-a-la%20normativa-ambiental.pdf)

En donde,

$C_E$ : Costos evitados

$T$ : Impuestos (La tasa impositiva esta consignada en el Estatuto Tributario Ley 636 de 2000-Capitulo IX- Tarifas de impuesto de renta)

$$Y_2 = \$15.489.916,52 * (1 - 0,33) = \$10.378.244,07$$

Considerando la Ecuación 23, se determina el valor del beneficio ilícito de la siguiente manera:

$$|B| = \frac{\$10.378.244,07 * (1 - 0,5)}{0,5} = \$10.378.244,07$$

<sup>365</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Metodología para el cálculo de multas por infracción a la normativa ambiental. Bogotá, 2010. 12 p. En: Autoridad Nacional de licencias ambientales. [Sitio web]. ANLA. [Consulta 01 de mayo 2018]. Archivo pdf. Disponible en: [http://portal.anla.gov.co/documentos/tramites\\_servicios/Metodolog%C3%ADa-c%C3%A1lculo-multas-por-infracci%C3%B3n-a-la%20normativa-ambiental.pdf](http://portal.anla.gov.co/documentos/tramites_servicios/Metodolog%C3%ADa-c%C3%A1lculo-multas-por-infracci%C3%B3n-a-la%20normativa-ambiental.pdf)

**6.5.2 Grado de afectación ambiental (i).** Para estimar este criterio se tienen en cuenta los atributos y valores presentados en el artículo 7° de la resolución 2086 del 25 de octubre de 2010, además la Ecuación 25 para determinar la importancia de afectación.

**Ecuación 25.** Importancia de afectación.

$$I = (3 * IN) + (2 * EX) + PE + RV + MC$$

**Fuente:** MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 2086 del 25 de octubre de 2010. En: MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. p.6. [Sitio web]. Minambiente. [Consulta 01 de mayo 2018]. Archivo pdf. Disponible en: [http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Regimen-Sancionatorio-Ambiental/res\\_2086\\_251010.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Regimen-Sancionatorio-Ambiental/res_2086_251010.pdf)

Donde,

*IN*: Intensidad

*EX*: Extensión

*PE*: Persistencia

*RV*: Reversibilidad

*MC*: Recuperabilidad

$$I = (3 * 8) + (2 * 1) + 3 + 1 + 3 = 33$$

De acuerdo con el valor de importancia de afectación obtenido, puede ser calificada como una importancia moderada al impacto a partir del grado de incidencia de la alteración producida y de sus efectos.

Posteriormente, se establece el grado de afectación ambiental mediante la Ecuación 26.

**Ecuación 26.** Valor monetario de la importancia de la afectación.

$$i = (22,06 * SMMLV) * I$$

**Fuente:** MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 2086 del 25 de octubre de 2010. En: MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. [Sitio web]. p.7. Minambiente. [Consulta 01 de mayo 2018]. Archivo pdf. Disponible en: [http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Regimen-Sancionatorio-Ambiental/res\\_2086\\_251010.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Regimen-Sancionatorio-Ambiental/res_2086_251010.pdf)

Donde,

*i*: Valor monetario de la importancia de la afectación

*SMMLV*: Salario mínimo mensual legal vigente

*I*: Importancia de la afectación

$$i = (22,06 * 828.116) * 33 = \$602.851.885,7$$

Por otro lado, se calcula la variable alfa ( $\alpha$ ), la cual afecta el grado de afectación ambiental, teniendo en cuenta la Ecuación 27.

**Ecuación 27.** Factor de temporalidad.

$$\alpha = \frac{3}{364} * d + \left(1 - \frac{3}{364}\right)$$

**Fuente:** MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 2086 del 25 de octubre de 2010. En: MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. p.7. [Sitio web]. Minambiente. [Consulta 01 de mayo 2018]. Archivo pdf. Disponible en: [http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Regimen-Sancionatorio-Ambiental/res\\_2086\\_251010.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Regimen-Sancionatorio-Ambiental/res_2086_251010.pdf)

Donde,

$\alpha$ : Factor de temporalidad

*d*: Número de días continuos o discontinuos durante los cuales sucede el ilícito (entre 1 y 365)

$$\alpha = \frac{3}{364} * 30 + \left(1 - \frac{3}{364}\right) = 1,24$$

**6.5.3 Circunstancias agravantes y atenuantes.** Considerando el artículo 9° se califican teniendo en cuenta los valores ponderados, de las circunstancias agravantes y atenuantes. Para los agravantes se tiene presentes, que la infracción genere daño grave al medio ambiente, a los recursos naturales, al paisaje o a la salud humana; además las infracciones que involucren residuos peligrosos por tanto estas circunstancias se encuentran valoradas ya en la importancia de la afectación contando con un valor de 0,4. Por otro lado dentro de los atenuantes se considera resarcir o mitigar por iniciativa propia el daño, compensar o corregir, el perjuicio causado antes de iniciarse el procedimiento sancionatorio ambiental, siempre que con dichas acciones no se genere un daño mayor, obteniendo un valor de -0,4.

Se realiza la suma aritmética de estas dos variables para determinar el valor total de agravantes y atenuantes (Ecuación 28)

**Ecuación 28.** Circunstancias agravantes y atenuantes.

$A = \textit{agravantes} + \textit{atenuantes}$
---

**Fuente:** elaboración propia

$$A = 0,4 + (-0,4) = 0$$

**6.5.4 Capacidad socioeconómica del infractor.** Para este parámetro se tiene en cuenta la diferenciación entre personas naturales, personas jurídicas y entes territoriales, de conformidad con las tablas del artículo 10°, se establece un factor de ponderación 1 dado que cuenta como persona jurídica con tamaño de empresa grande.

$$Cs = 1$$

**6.5.5 Costos asociados.** Esta variable contempla el costo de inspección de un profesional de ingeniería ambiental por parte del Ministerio de Ambiente, el cual se estima que tiene un salario base de cuatro millones quinientos mil pesos (\$4.500.000). Se calcula el salario por ocho días de trabajo como tiempo proyectado de inspección, es decir, un millón doscientos mil pesos (\$1.200.000).

$$Ca = \$1.200.000$$

**6.5.6 Multa generada por un mes.** De acuerdo a la Ecuación 22, se determina el costo de la multa generada durante un mes de incumplimiento en la norma de vertimiento del agua residual producida en el taller de electroquímica al sistema de alcantarillado.

$$Multa = \$10.378.244,07 + [(1,24 * \$602.851.885,7) * (1 + 0) + \$1.200.000] * 1$$

$$Multa = \$759.114.582,3 \text{ mensual}$$

Es decir que la sanción ambiental mensual para la base aérea My Justino Mariño Cuesta de la Fuerza Aérea Colombiana es de \$759.114.582,3 dado el incumplimiento de vertimiento de aguas residuales por parte del taller de electroquímica. Por tal razón, la opción más viable económicamente es la implementación de la alternativa seleccionada, ya que esta presenta un valor mensual de \$1.290.826.

## 7. CONCLUSIONES

- Se diagnosticó en el proceso de tratamiento ya existente, un volumen promedio de agua a tratar de 5.000 L por batch, además se determinó que este no cuenta con un orden adecuado de etapas, dosificaciones, tiempos y pH correctos para precipitación de los contaminantes presentes como 3,57 mg Cd/L de cadmio total, 7,53 mg CN<sup>-</sup>/L de cianuro total, 14 mg Cr/L de cromo total, 0,086 mg Pb/L de plomo total, 0,006 mg Ag/L de plata total, 3 mg Ni/L de níquel total, <0,0007 mg Hg/L de mercurio total, <0,049 mg/L de fenoles, 501,33 mg O<sub>2</sub>/L de DBO<sub>5</sub>, 587,2 mg O<sub>2</sub>/L de DQO, 103,4 mg/L de grasas y aceites, 9 mg/L de SSED, 4053,33 mg/L de SST y 12,12 unidades de pH; determinando que la concentración de cianuro, cromo, cadmio, níquel, DQO, DBO<sub>5</sub>, grasas y aceites, SST, SSED y pH no cumplen con los establecido en la resolución 0631 del 2015.
- Se plantearon tres alternativas para la disminución de los contaminantes de aguas residuales galvánicas, para seleccionar mediante una matriz de decisión donde se evaluaron criterios económicos, operativos y técnicos, considerando las necesidades de la FAC, siendo ésta la alternativa A, que corresponde al mejoramiento del proceso actual por presentar el mayor puntaje 2,52.
- El desarrollo experimental, permitió determinar los mejores reactivos para oxidación de cianuro (peróxido de hidrógeno e hipoclorito de calcio), variando solo esta etapa; además, teniendo en cuenta el orden de las etapas de tratamiento (oxidación de cianuro, reducción de cromo, precipitación de metales pesados, floculación, filtración); se obtienen las cantidades necesarias de reactivos para tratar 5.000 L de agua son 3,527 L de ácido sulfúrico al 98%, 2,325 kg de hidróxido de sodio al 98%, 0,188 L de peróxido de hidrógeno al 50%, 0,188 kg de hipoclorito de calcio al 12,5%, 1 kg de metabisulfito de sodio al 96%, 0,025 kg de floculante aniónico al 0,1%
- El agua tratada en el desarrollo experimental, presentó los siguientes valores para los parámetros que incumplían la resolución 0631 de 2015, 0,017 mg Cd/L de cadmio total, >0,427 mg CN<sup>-</sup>/L de cianuro total, 0,064 mg Cr/L de cromo total, 0,063 mg Ni/L de níquel total, 0,1513 mg O<sub>2</sub>/L de DBO<sub>5</sub>, 28,8 mg O<sub>2</sub>/L de DQO, 9,7 mg/L de grasas y aceites, 0 mg/L de SSED, 6,67 mg/L de SST y 8,66 unidades de pH, demostrando de esta manera que la alternativa seleccionada cumple la normatividad de vertimiento de aguas para todos los parámetros excepto para cianuro, por lo cual se recomienda un incremento del 25% en la dosificación de oxidantes.
- Se definen especificaciones técnicas teniendo en cuenta equipos, accesorios y materia prima para la implementación de la propuesta seleccionada; determinando las dimensiones y características de cada uno de los equipos requeridos por etapa, de esta forma estableciendo que es necesario la

adquisición de un agitador mecánico, dos bombas dosificadoras, dos tanques almacenamiento de soluciones, dado que actualmente ya se cuentan con los demás equipos; estipulando que la duración por tratamiento de agua es de 2 días y deberá tratarse 5.000 L por batch.

- Se realizó un análisis financiero donde se indica el costo de inversión que corresponde a \$ 23.843.933, costo de operación anual que es de \$4.230.915 y se determinan los costos que implica una sanción ambiental de \$759.114.582 mensualmente, en caso de seguir incumpliendo con la normatividad vigente, observando así que es más viable económicamente la alternativa seleccionada.

## 8. RECOMENDACIONES

- Estudiar la composición de los lodos y plantear un proceso para la recuperación de los metales retenidos en estos.
- Realizar adecuación en el taller de electroquímica con el fin de separar las aguas alcalinas de las acidas, para realizar posteriormente tratamiento a cada tipo de agua.
- Reutilizar el agua tratada para usos como lavado de pisos y evaluar los efectos posibles para la preparación de soluciones empleadas en el proceso.
- Validar los cambios en la calidad del agua obtenida o en el rendimiento del proceso efecto de la utilización de agua del acueducto en lugar de agua destilada para la preparación de las disoluciones de los productos químicos.
- Realizar estudio de la velocidad de sedimentación para diseñar decantador.

## BIBLIOGRAFÍA

ABOU- ELELA, Sohair; IBRAHIM, Hanan y ABOU- TALEB, Enas. Heavy metal removal and cyanide destruction in the metal plating industry: an integrated approach. *The Environmentalist*. [en línea]. 2008, October. 28 (3), p 223-229. [Consultado 15 enero de 2019]. ISSN 15732991. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10669-007-9132-6>

ABRIL, Dibar, y LOPEZ, Alexander. Ingeniería básica de una plata a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales en la empresa Quimicaplic Ltda. Mediante el método de electrocoagulación. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá: Universidad América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2009. p.130.

ACOSTA NIÑO, Gema Eunice, et al. La electrocoagulación como un tratamiento eficiente para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*. [en línea]. 2013. 9, (2), p. 306-317. [Consultado 30 enero de 2019]. ISSN 19004699.

AGUA LATINOAMÉRICA. [sitio web] The Capacity of Ion Exchange Resin. [Consulta 7 enero 2019]. Disponible en: <http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/5-6-02avila.pdf>

AGÜERO, A, et al. Aluminum slurry coatings to replace cadmium for aeronautic applications. *Surface and Coatings Technology*. [en línea]. 2012, December. 213, p. 229-238. [Consultado 18 diciembre 2018]. ISSN 02578972. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.10.052>

AHMARUZZAMAN, M. Role of Fly Ash in the Removal of Organic Pollutants from Wastewater. *Energy Fuels*. [en línea]. 2009, February. 23 (3), p. 1494-1511. [Consultado 25 enero de 2019]. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef8002697>.

AKBAL, Feryal y CAMCI, Selva. Copper, chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation. *Desalination*. [en línea]. 2011, March. 269 (1-3). p. 214-222. [Consultado 7 enero 2019]. ISSN 00119164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.001>

ALYÜZ, B y VELI, S. Kinetics and equilibrium studies for the removal of nickel and zinc from aqueous solutions by ion exchange resins. *Journal of Hazardous Materials*. [en línea]. 2009, August. 167(1-3). p. 482-488. [Consultado 20 diciembre 2018]. ISSN 03043894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.006>

ALZATE, Adriana. Guía de Producción más Limpia para el Sector De Recubrimientos Electrolíticos en Colombia. p. 25. En: INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS. [sitio web]. Buenaventura: INVEMAR. [Consulta 2 mayo 2019]. Archivo pdf. Disponible en: [http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/RinconLiterario/2009/octubre/JE\\_64.pdf](http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/RinconLiterario/2009/octubre/JE_64.pdf)

AMARNATH, Joshua; RAJAN, S y KUMAR, S. Removal of cyanide and heavy metals from gold plating industrial wastewater. Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences. [en línea]. 2014, October. 7(4), p. 281-283. [Consultado 16 enero de 2019]. ISSN 09742115.

AQUACHEM INC. [sitio web]. AMER, Sultan.I. Tratamiento de Acabados Metálicos de Aguas Residuales. [Consulta 25 enero 2019]. Disponible en: <http://www.aquachem-inc.com/w-metalfinishing.htm>

ARANGUI, Gonzalo y REYES, Iván. Cyanide Degradation from Mining Effluent Using Two Reagents: Sodium Metabisulphite and the Metabisulphite Mixture with Hydrogen Peroxide. TECCIENCIA. [en línea]. 2018, August. 13 (25), p.9. [Consultado 16 enero de 2019]. ISSN 24223670. DOI: <http://dx.doi.org/10.18180/tecciencia.2018.25.1>

ARELLANO, Javier. Introducción a la Ingeniería Ambiental. p. 32 [En línea]. México: Alfaomega, 2002. [Citado el 15 de septiembre de 2018]. ISBN 9789701507834. Disponible en: <https://es.slideshare.net/vladyvostok/introduccion-a-la-ingenier>.

ARROYO, M.G, et al. Effect of pH and chloride concentration on the removal of hexavalent chromium in a batch electrocoagulation reactor. Journal of Hazardous Materials. [en línea]. 2009, September. 169 (1-3). p 1127-1133. [Consultado 7 enero 2019]. ISSN 03043894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.04.089>

ARUNDEL, John y GONZÁLEZ, Vicente San José. Tratamiento De Aguas Negras y Efluentes Industriales. [En línea]. España: Acribia S.A, 2000. [Citado el 28 de enero de 2019]. ISBN 9788420009858. Disponible en: [https://books.google.com.co/books/about/Tratamientos\\_de\\_aguas\\_negras\\_y\\_efluentes.html?id=5px5AAAACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.co/books/about/Tratamientos_de_aguas_negras_y_efluentes.html?id=5px5AAAACAAJ&redir_esc=y).

AWAN. M. A. Reduction of Chemical Oxygen Demand from Tannery wastewater by oxidation. Electronic Journal of Environmental, Agriculture and Food Chemistry. [en línea]. 2004. 3 (1), p. 625-628.

AYALA, Ximena y BOHORQUEZ, Liliana. Propuesta para la reutilización del agua residual tratada proveniente del proceso Galvánico de industrias Tiber S.A. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. 2011. p 224.

AYRES, David; DAVIS, Allen y GIETKA, Paul. Removing Heavy metals from wastewater. Universidad de Maryland.1994. p.19. En: Bluevantage. [sitio web]. Bluevantage. [Consulta 15 enero de 2019]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.bluevantage.net/userdata/userfiles/file/Heavy%20Metals%20Removal.pdf>

BABEL, S.y. KURNIAWAN, T.A. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. Journal of hazardous materials. [en línea]. 2003, February. 97(1-3): p. 219-243. [Consultado 17 diciembre 2018]. ISSN 03043894. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00263-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00263-7)

BABICHE, Carlos. Intercambio iónico vs osmosis inversa. Industrial Data. [en línea]. 2014. 3 (1). p. 6. [Consultado 26 enero de 2019]. DOI: [10.15381/idata.v3i1.6571](https://doi.org/10.15381/idata.v3i1.6571).

BARAKAT, M.A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. Arabian Journal of Chemistry. [en línea]. 2011, October. 4 (4). p. 361-367. [Consultado 14 diciembre 2018]. ISSN 18785352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.07.019>.

BARNES. [sitio web]. Colombia. Bomba Sumergible. [Consulta 23 abril 2019]. Disponible en: <http://www.barnes.com.co/>.

BAUTISTA, Deissy. NIETO, Duvan. Desarrollo de la propuesta para el tratamiento de las aguas residuales, de la empresa Extrusiones SCHULER Ltda. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2010.p. 185.

BENVENUTI, T, et al. Closing the loop in the electroplating industry by electrodialysis. Journal of Cleaner Production. [en línea]. 2017, July. 155 (1). p.130-138. [Consultado 19 diciembre 2018]. ISSN 09596526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.139>

BORBA, C. E, et al. Removal of nickel (II) ions from aqueous solution by biosorption in a fixed bed column: experimental and theoretical breakthrough curves. Biochemical Engineering Journal. [en línea]. 2006, June .30 (2). p. 184-191. [Consultado 15 diciembre 2018]. ISSN 1369703X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2006.04.001>

BOSS TECH. [sitio web]. Lima, Perú: Tratamiento de agua por intercambio iónico. [Consulta 5 enero 2019]. Disponible en: <https://bosstech.pe/blog/tratamiento-de-agua-por-intercambio-ionico/>

BOTZ, M; MUDDER, T y AKCIL, A. Chapter 35. Cyanide Treatment: Physical, Chemical, and Biological Processes. En: Gold Ore Processing. 2ª edición. 2016. p. 1040. [En línea]. Amsterdam: Elsevier Science. [Citado el 19 de diciembre de 2018]. ISBN 9780444636584. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780444636584/gold-ore-processing>

\_\_\_\_\_. Overview of cyanide treatment methods. Elbow Creek Engineering, Inc. 2003, p. 10. En: Elbow Creek Engineering, Inc. [sitio web]. Estados Unidos: BOTZ. [Consultado 20 diciembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.botz.com/MEMCyanideTreatment.pdf>

BŘENDOVÁ, Kateřina, et al. Utilization of biochar and activated carbon to reduce Cd, Pb and Zn phytoavailability and phytotoxicity for plants. *Journal of Environmental Management*. [en línea]. 2016, October. 181. p 637-645. ISSN 03014797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.042>

CANO, Carlos. Evaluación de un tratamiento de floculación-flotación para el agua residual generada en el procesamiento de subproductos avícolas. Trabajo de Grado Ingeniero Ambiental. Bogotá D.C: Universidad Libre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Ambiental. 2015. p. 57

CARBOTECNIA [sitio web]. México. Osmosis Inversa. [Consulta 4 enero 2019]. Disponible en <https://www.carbotecnia.info/encyclopedia/que-es-la-osmosis-inversa/>.

CASTILLO, Vladimir. Diseño y cálculo de un agitador de fluidos. [en línea]. Trabajo de Grado Ingeniero Mecánico. Chile: Universidad del Bío- Bío. Facultad de ingeniería, 2013. p 79. [Citado el 22 de abril del 2019]. Disponible en: [http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo\\_Uribe\\_Vladimir.pdf](http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo_Uribe_Vladimir.pdf)

CAVIEDES, D. MUÑOZ, R. PERDOMO, A. RODRIGUEZ, D. y SANDOVA, I. Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Una Revisión. *Revista Ingenieria y Region*. [en línea]. 2015, September. 13 (1) p 73-90. [Consultado 22 enero de 2019]. DOI:10.25054/22161325.710

CENKIN, VE y BELEVSTEV. Electrochemical treatment of industrial wastewater. *Effluent and water treatment journal*. [en línea]. 1985. 25 (7), p. 243-249.

CHANG, Li-Yang. Alternative chromium reduction and heavy metal precipitation methods for industrial wastewater. *Environmental Progress*. [en línea]. 2003, October. 22(3), p. 174-182. [Consultado 17 enero de 2019]. DOI: <https://doi.org/10.1002/ep.670220315>.

CHEN, Quanyuan, et al. Comparison of heavy metal removals from aqueous solutions by chemical precipitation and characteristics of precipitates. *Journal of Water Process Engineering*. [en línea]. 2018, December.26. p. 289-300. [Consultado 20 diciembre 2018]. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.11.003.

\_\_\_\_\_, et al. Precipitation of heavy metals from wastewater using simulated flue gas: sequent additions of fly ash, lime and carbon dioxide. *Water Research*. [en línea]. 2009, June. 43 (10), p .2605-2614. [Consultado 25 enero de 2019]. ISSN 00431354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.007>.

CHURAMPI, Meryelem. Tratamento de efluentes contendo cianeto por oxigênio singlete gerado através da reação de peróxido de hidrogênio e hipoclorito de sódio. [en línea]. Río de Janeiro: Pontificia Universidad Católica. Proyecto de grado Ingeniería de materiales y de procesos químicos y metalúrgicos. Departamento de Ingeniería de materiales, 2012. p. 141. [Citado el 26 de enero del 2019]. Disponible en: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=21883@1>

Coating Materials and Methods . En: *ENGINEERING DESIGN HANDBOOK - DESIGN GUIDANCE FOR PRODUCIBILITY: (AMCP 706-100)*. [Anónimo]. p. 1-19. [En línea]. U.S: Army Materiel Command. [Citado el 18 de diciembre de 2018]. Disponible en <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEDHDGPA1/engineering-design-handbook-32/engineering-design-handbook-32>.

CORREDOR, Héctor y DIAZ, Elkin. Alternativa para la disminución de metales pesados en los efluentes de proceso de la Industria Galvánica Galvanotecnica. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2011. p 188.

DAVIS, J.R. *Handbook of Thermal Spray Technology*. ASM International [En línea]. ASM International, 2004. [Citado el 11 de septiembre de 2018]. ISBN 9781615032624. Disponible en: [https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpHTST0006/viewerType:toc//root\\_slug:handbook-thermal-spray/url\\_slug:handbook-thermal-spray](https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpHTST0006/viewerType:toc//root_slug:handbook-thermal-spray/url_slug:handbook-thermal-spray).

\_\_\_\_\_. Electrochemical Deposition. En: *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*. p 125-153. [En línea]. Estados Unidos: ASM International. [Citado el 11 de septiembre de 2018]. ISBN 9781591249634. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSECWR005/surface-engineering-corrosion/surface-engineering-corrosion>

\_\_\_\_\_. Process Selection Guide. En: Surface Hardening of Steels - Understanding the Basics. p. 1-15. [En línea]. ASM International, 2002. [Citado el 19 de diciembre de 2018]. ISBN 9781680159530 Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSHSUB003/surface-hardening-steels/surface-hardening-steels>

DÍAZ FRANKY, María Carolina. Capítulo 4. Estimación y medición de caudales de aguas residuales. En: ACADEMIA.EDU. [sitio web]. ACADEMIA.EDU. [Consulta 11 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: [https://www.academia.edu/24271087/UNIVERSIDAD\\_NACIONAL\\_ABIERTA\\_Y\\_A\\_DISTANCIA\\_UNAD\\_Cap%C3%ADtulo\\_4.\\_Estimaci%C3%B3n\\_y\\_medi%C3%B3n\\_de\\_caudales\\_de\\_aguas\\_residuales](https://www.academia.edu/24271087/UNIVERSIDAD_NACIONAL_ABIERTA_Y_A_DISTANCIA_UNAD_Cap%C3%ADtulo_4._Estimaci%C3%B3n_y_medi%C3%B3n_de_caudales_de_aguas_residuales)

DIAZ, Walter Juan. Propuesta de implementación y evaluación de tratamiento por oxígeno singlet para remover cianuro y subproductos de un proceso de cloración alcalina. [en línea]. Proyecto de grado ingeniero metalurgista. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, 2014. p.168. [Citado el 20 de enero del 2019]. Disponible en [http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/10452/1/diaz\\_pw.pdf](http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/10452/1/diaz_pw.pdf)

DINDEP. [sitio web]. Colombia. Electrocoagulación Y Electro-Oxidación. [Consulta 4 enero 2019]. Disponible en: <https://www.dindep.com.co/nuestrosproductos/>

DOMINGUEZ, J.R, et al. Aluminium sulfate as coagulant for highly polluted cork processing wastewaters: removal of organic matter. Journal of Hazardous Materials. [en línea]. 2007, September. 148 (1-2). p. 15-21. [Consultado 20 diciembre 2018]. ISSN 03043894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.003>.

DOWN CHEMICAL COMPANY, Ion Exchange. Resins Fundamentals of Ion Exchange. 2000. p 1-9. [sitio web]. Estados Unidos: DOWN CHEMICAL COMPANY. [Consulta 8 enero 2019]. Archivo pdf. Disponible en: [http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh\\_0032/0901b803800326ca.pdf](http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_0032/0901b803800326ca.pdf)

FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ, Rodolfo, et al. Mercury accumulation and speciation in plants and soils from abandoned cinnabar mines. Geoderma. [en línea]. 2015, September. 253-254. p 30-38. [Consultado 6 julio 2019]. ISSN 00167061. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.04.005>

FRANCO, Daniela. Propuesta para la reutilización de aguas residuales del proceso de recubrimientos electrolíticos de la empresa ZINTEPEC LTDA. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2018. p. 140.

FRAUME, Néstor; TORRES, Alberto y RAMÍREZ, Marcela. Abecedario Ecológico: La Más Completa Guía De Términos Ambientales. [En línea]. Bogotá: Editorial San Pablo, 2006. [Citado el 15 de septiembre de 2018]. ISBN 958823333X. Disponible en:

[https://books.google.com.co/books?id=rrGMx\\_DpbfAC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=rrGMx_DpbfAC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false).

FU, Fenglian y WANG, Qi. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. Journal of Environmental Management. [en línea]. 2011, March. 92 (3). p. 407-418. [Consultado 16 diciembre 2018]. ISSN 03014797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>.

FUERZA AÉREA COLOMBIANA. [sitio web]. Bogotá: FAC, Comando Aéreo de Mantenimiento Base Aérea – CAMAN. [Consulta 21 agosto 2018]. Disponible en: [www.caman.mil.co](http://www.caman.mil.co).

GARCIA, Jorge Ulises. Tratamiento de aguas residuales en la industria galvánica. [en línea]. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. Trabajo de grado ingeniero químico, 1997. p.180. [Citado el 24 de enero del 2019]. Disponible en: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/2242>

GARZÓN, Paola. Remoción de cianuros y metales pesados de las aguas residuales de industrias Inca S.A. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 1999.

GAVIRIA, Ana y MEZA, Luis. Análisis de alternativas para la degradación del cianuro en efluentes líquidos y sólidos del municipio de Segovia, Antioquia y en la planta de beneficio de la empresa mineros Nacionales, municipio de Marmato, Caldas. Dyna. [en línea]. 2006, January. 73 (149). p. 31. [Consultado 17 enero de 2019]. ISSN 00127353.

GEANKOPLIS, Christie. J. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Tercera edición. México. Compañía editorial continental S.A de CV.1998.165 p. ISBN 9682613167.

GODE, F y PEHLIVAN, E. Removal of chromium (III) from aqueous solutions using Lewatit S 100: the effect of pH, time, metal concentration and temperature. Journal of Hazardous Materials. [en línea]. 2006, August. 136(2). p. 330-337. [Consultado 6 enero 2019]. ISSN 03043894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.12.021>.

GÓMEZ LEIVA, Patricia. Degradación de cianuros mediante Oxidación Química en efluentes industriales. España: Universidad de Oviedo. [en línea]. Proyecto de Máster en Química y desarrollo sostenible, 2012. p.76. [Citado el 25 de enero del 2019]. Disponible en: [http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/3986/6/TFM\\_PatriciaGomezLeiva.pdf](http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/3986/6/TFM_PatriciaGomezLeiva.pdf)

GRUBBS, C. A. Anodizing of Aluminum. Metal Finishing. [en línea]. 2007. 105(10). p. 397-412. [Consultado 19 diciembre 2018]. ISSN 00260576. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(07\)80359-X](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(07)80359-X)

GUASTALLI, Andrea. Estudio sobre la aplicación de la tecnología de membranas para la reducción del ácido fosfórico de las aguas de lavado en el proceso de anodizado del aluminio. [en línea] Tesis Doctoral, Barcelona: Universidad de Barcelona. Facultad de Química. Departamento de Ingeniería Química, 2006. p 293. [Consultado 11 septiembre 2018]. Disponible en: [https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/69956/GUASTALLI\\_TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/69956/GUASTALLI_TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

GUIGUI, C, et al. Impact of coagulation conditions on the in-line coagulation/UF process for drinking water production. Desalination. [en línea]. 2002, September. 147 (1-3). p. 95-100. [Consultado 20 diciembre 2018]. ISSN 00119164. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00582-9](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00582-9)

HARSHA, Kilaru; SENTHIL, Ponnusamy y PANDA, Rames. A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. Journal of Molecular Liquids. [en línea]. 2019, June. p 1-98. ISSN 01677322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111197>

HAUMESSER, P. Copper Electroplating: from Superconformal to Extreme Fill. En: Nucleation and Growth of Metals. p. 71-106. [En línea]. London: ISTE Press - Elsevier, 2016. [Citado el 18 de diciembre de 2018]. ISBN 9781785480928. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-092-8.50004-5>.

HEIDMAN, I y CALMANO, W. Removal of Zn(II), Cu(II), Ni(II), Ag(I) and Cr(VI) present in aqueous solutions by aluminium electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials. [en línea]. 2008, April, 152 (3). p. 934- 941. [Consultado 14 diciembre 2018]. ISSN 03043894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.068>.

HERNÁNDEZ ARIZALA, Diana y LEAL Paula. Ingeniería básica para una planta de tratamiento de aguas residuales en cárnicos rico jamón. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2009. p.86

HIDRODIRECT. [sitio web]. Ecuador: EVANS. Bomba sumergible clase JP código SSN2ME100. [Consulta 22 abril 2019]. Disponible en: <https://www.hidrodirect.com/SSN2ME100>.

HOGG, R. Collision efficiency factors for polymer flocculation. *Journal of Colloid and Interface Science*. [en línea]. 1984, November. 102 (1). p. 232-236. [Consultado 20 diciembre 2018]. ISSN 00219797. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(84\)90215-7](https://doi.org/10.1016/0021-9797(84)90215-7).

HUISMAN, J.L; SCHOUTEN, G y SCHULTZ, C. Biologically produced sulphide for purification of process streams, effluent treatment and recovery of metals in the metal and mining industry. *Hydrometallurgy*. [en línea]. 2006, September. 83 (1-4). p.106-113. [Consultado 20 diciembre 2018]. ISSN 0304386X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.017>

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA. Chemical Precipitation Processes for the Treatment of Aqueous Radioactive Waste.p 95. [En línea]. VIC Library Cataloguing, 1992. [Citado el 18 de enero de 2019]. ISBN 9201019920. Disponible en: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/23/064/23064538.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/23/064/23064538.pdf)

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC- 1486-6166. Bogotá D.C: El instituto,2018. 153 p.

\_\_\_\_\_. Gestión ambiental calidad de agua. NTC-ISO 5667-10. Bogotá, D.C. ICONTEC.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Conductividad Eléctrica por el Método Electrométrico en Aguas. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Conductividad+El%C3%A9ctrica.pdf/f25e2275-39b2-4381-8a35-97c23d7e8af4>.

\_\_\_\_\_. Demanda Bioquímica de Oxígeno - 5 días en aguas. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Bioqu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/ca6e1594-4217-4aa3-9627-d60e5c077dfa>

\_\_\_\_\_. Demanda Química de Oxígeno por Reflujo cerrado y volumetría. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>

\_\_\_\_\_. Determinación de grasas y aceites en aguas por el método soxhlet. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en:

<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Grasas+y+Aceites+en+agua+por+m%C3%A9todo+Soxhlet..pdf/15096580-8833-415f-80dd-ceaa7888123d>

\_\_\_\_\_. Instructivo Para la Toma de Muestras De Aguas Residuales. Toma de muestras de aguas residuales. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en:

[http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma\\_Muestras\\_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428](http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428)

\_\_\_\_\_. pH en aguas por electrometría. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en:

<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/pH+en+agua+por+Electrometr%C3%ADa.pdf/ec53b64e-91eb-44c1-befe-41fcfccdff1>

\_\_\_\_\_. Sólidos Suspendidos Totales En Agua Secados A 103 – 105 °C. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en:

<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Suspendidos+Totales+en+aguas.pdf/f02b4c7f-5b8b-4b0a-803a-1958aac1179c>.

\_\_\_\_\_. Turbiedad por Nefelometría en el quipo Turbiquant 3000 T. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en:

<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Turbiedad+por+Nefelometr%C3%ADa..pdf/fc92342e-8bba-4098-9310-56461c6a6dbc>

IZQUIERDO, Marta. Eliminación de metales pesados en aguas mediante bioadsorción. Evaluación de materiales y modelación del proceso. [en línea]. Trabajo de grado Doctorado. España: Universitat De València. Departamento de Ingeniería Química, 2010. p.352. [Consultado 20 diciembre 2018]. Disponible en: <http://roderic.uv.es/bitstream/handle/10550/23403/izquierdo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

JIMÉNEZ PRIETO, Y y PERÉZ, Esperanza. Evaluación de la cloración alcalina con hipoclorito de sodio comercial en el tratamiento de cianuros alcalinos altamente peligrosos. Revista Cubana de Química. [en línea]. 2005. 17 (3). p. 86. [Consultado 18 julio 2019]. ISSN 02585995. URL: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543687028>.

KABDASLI, I, et al. Electrocoagulation applications for industrial wastewaters: a critical review. Environmental Technology Reviews. [en línea]. 2012, November. 1 (1), p. 2-45. [Consultado 5 enero 2019]. ISSN 21622523. DOI: <https://doi.org/10.1080/21622515.2012.715390>

KARALE, R.S; WADKAR, D.V y NANGARE, P.B. Removal and recovery of hexavalent chromium from industrial waste water by precipitation with due consideration to cost optimization. *Journal of Environmental Research and Development*. [en línea]. 2007. p. 215. [Consulta 17 enero de 2019]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.jerad.org/ppapers/dnload.php?vl=2&is=2&st=209>.

KARIMI, Habid. Effect of pH and Initial pb(II) Concentration on The Lead Removal Efficiency from Industrial Wastewater Using Ca(OH)<sub>2</sub>. *International Journal of Water and Wastewater Treatment*. [en línea]. 2017, January. 3 (2), p. 4. [Consultado 25 enero de 2019]. ISSN 23815299 DOI: 10.16966/2381-5299.139

KHEZAMI, L y CAPART, R. Removal of chromium (VI) from aqueous solution by activated carbons: kinetic and equilibrium studies. *Journal of Hazardous Materials*. [en línea]. 2005, August. 123 (1-3). p. 223-231. [Consultado 16 diciembre 2018]. ISSN 03043894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.04.012>

KHODADAD, A, et al. Detoxification of Cyanide in a Gold Processing Plant Tailings Water Using Calcium and Sodium Hypochlorite. *Mine Water and the Environment*. [en línea]. 2008, June. 57 (2), p. 27-127. [Consultado 18 diciembre 2018]. ISSN 16161068. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10230-008-0042-8>.

KITIS, M, et al. Destruction of cyanide by hydrogen peroxide in tailings slurries from low bearing sulphidic gold ores. *Minerals Engineering*. [en línea]. 2005, March. 18 (3), p. 353-362. [Consultado 26 enero de 2019]. ISSN 08926875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.06.003>.

KONGSRICHAROERN, N y POLPRASERT, C. Electrochemical precipitation of chromium (Cr<sup>6+</sup>) from an electroplating wastewater. *Water Science and Technology*. [en línea]. 1995. 31 (9), p.109-117. [Consultado 20 diciembre 2018]. ISSN 02731223. DOI: [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00412-G](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00412-G)

KUCHAR, D, et al. Sulfidation treatment of copper-containing plating sludge towards copper resource recovery. *Journal of Hazardous Materials*. [en línea]. 2006, November. 138 (1), p. 86-94. [Consultado 19 diciembre 2018]. ISSN 03043894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.037>

KURNIAWAN, Tonni A, et al. Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical Engineering Journal*. [en línea]. 2006. 118(1-2), p. 83-98. [Consultado 5 enero 2019]. ISSN 13858947. DOI: 10.1016/j.cej.2006.01.015

KUSHWAHA, Anamika, et al. A critical review on speciation, mobilization and toxicity of lead in soil-microbe-plant system and bioremediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. [en línea]. 2018, January. 147. p 1035-1045. [Consultado 6 julio 2019]. ISSN 01476513. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.049>

KUYUCAK, Nural y AKCIL, Ata. Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes. *Minerals Engineering*. [en línea]. 2013, September. 50-51, p.13-29. [Consultado 17 diciembre 2018]. ISSN 08926875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.05.027>.

LENNTECH. [sitio web] Electrodeionización (EDI). [Consulta 4 enero 2019]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/edi.htm>

\_\_\_\_\_. [sitio web]. Rohm and Haas ion exchange resins. [Consulta 21 enero 2019]. Disponible en: [https://www.lenntech.com/products/resins/rohm-haas/rohm-haas-ion-exchange-resins.htm?gclid=CjwKCAjw\\_\\_fnBRANEiwAuFxET4uof7bAJWwtZeXpn7ffKnhesbgiETg0\\_BcZs\\_CzOuuMJYMBDwo0GxoCdNQQAvD\\_BwE](https://www.lenntech.com/products/resins/rohm-haas/rohm-haas-ion-exchange-resins.htm?gclid=CjwKCAjw__fnBRANEiwAuFxET4uof7bAJWwtZeXpn7ffKnhesbgiETg0_BcZs_CzOuuMJYMBDwo0GxoCdNQQAvD_BwE)

LIZARAZO, Paula y VILLOTA, Katya. Desarrollo de una propuesta de un sistema para el tratamiento de aguas residuales provenientes del térmico realizado por una empresa metalmeccánica. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2017. p. 116.

MANAHAN, Stanley. Introducción a la Química Ambiental. [En línea] México: Reverté, 2006. [Citado el 11 de septiembre de 2018]. ISBN 968670860X. Disponible en: [https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpHTST0006/viewerType:toc//root\\_slug:handbook-thermal-spray/url\\_slug:handbook-thermal-spray](https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpHTST0006/viewerType:toc//root_slug:handbook-thermal-spray/url_slug:handbook-thermal-spray). p. 209.

MANTILLA, Fanny y MARTÍNEZ, María. Propuesta para el manejo de los residuos generados en los procesos de zincado, pavonado y fosfatizado de la empresa Ingezinc Ltda. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2009. p 206.

MARTÍNEZ, Adriana. Propuesta para el mejoramiento del tratamiento de aguas residuales en ABS CROMOSOL LTDA. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2010. p 135.

MCANALLY, Stephen; BENEFIELD, Larry y REED, Russell. Nickel Removal from a Synthetic Nickel-Plating Wastewater Using Sulfide and Carbonate for Precipitation and Coprecipitation. *Separation Science and Technology*. [en línea]. 1984, February. 19 (2). p. 191- 217. [Consultado 16 enero de 2019]. DOI: 10.1080/01496398408060655

MÉNDEZ, A, et al. Biochar from pyrolysis of deinking paper sludge and its use in the treatment of a nickel polluted soil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. [en línea]. 2014, May. 107. p 46-52. [Consultado 6 julio 2019]. ISSN 01652370. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.02.001>

MEUNIER, Nathalie, et al. Comparison between electrocoagulation and chemical precipitation for metals removal from acidic soil leachate. *Journal of Hazardous Materials*. [en línea]. 2006, September. 137 (1), p. 581-590. [Consultado 19 enero de 2019]. ISSN 03043894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.050>.

MG FILTRATION TECHNOLOGY. [sitio web]. Filtration technology. [Consulta 4 enero 2019]. Disponible en <http://mgfiltration.com/index.php/es/>.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Metodología para el cálculo de multas por infracción a la normativa ambiental. Bogotá, 2010. En: Autoridad Nacional de licencias ambientales. [Sitio web]. ANLA. [Consulta 01 de mayo 2018]. Archivo pdf. Disponible en: [http://portal.anla.gov.co/documentos/tramites\\_servicios/Metodolog%C3%ADa-c%C3%A1lculo-multas-por-infracci%C3%B3n-a-la%20normativa-ambiental.pdf](http://portal.anla.gov.co/documentos/tramites_servicios/Metodolog%C3%ADa-c%C3%A1lculo-multas-por-infracci%C3%B3n-a-la%20normativa-ambiental.pdf)

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631 del 17 de marzo del 2015. En: MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. [Sitio web]. Minambiente. [Consulta 19 de septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: [https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R\\_MADS\\_0631\\_2015.pdfCalidad%20vertimientos.pdf](https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdfCalidad%20vertimientos.pdf)

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 2086 del 25 de octubre de 2010. En: MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. [Sitio web]. Minambiente. [Consulta 01 de mayo 2018]. Archivo pdf. Disponible en: [http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemas/pdf/Regimen-Sancionatorio-Ambiental/res\\_2086\\_251010.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemas/pdf/Regimen-Sancionatorio-Ambiental/res_2086_251010.pdf)

MOLLAH, Electrocoagulation (EC) —Science and Applications. *Journal of Hazardous Materials*. [en línea]. 2001, June.84 (1), p. 29-41. [Consultado 28 enero de 2019]. ISSN 03043894. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00176-5).

MONTIEL, Adriana. Estudio de la aplicación de tratamientos de conversión de pavonado sellado con cerio sobre acero de refuerzo embebido en concreto como protección anticorrosiva. [en línea]. Trabajo de grado Maestro en Tecnología Avanzada. Instituto Politécnico nacional, centro de investigación en ciencia aplicada y tecnología avanzada unidad Altamira, 2014. [Consultado 11 septiembre 2018]. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/13305/TESIS%20A14-MONTIEL%20GARCIA%20ADRIANA.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.

MORNELL, Horacio y FERNANDEZ, Luis. Manual del galvanotécnico Niquelado, cromado y otras electrodeposiciones. Barcelona, 1953.

MORRAL, Facundo Rolf; JIMENO, Emilio y MOLERA, P. Metalurgia General. [en línea]. Barcelona, España: Reverté, 1985. [citado el 2 de mayo de 2019]. Disponible en: [https://books.google.com.co/books/about/Metalurgia\\_general.html?hl=es&id=mtVwUijNSi4C&redir\\_esc=y](https://books.google.com.co/books/about/Metalurgia_general.html?hl=es&id=mtVwUijNSi4C&redir_esc=y). ISBN: 9788429160710

MORROW, Hugh. Cadmium plating. Metal Finishing. [en línea]. 2002, January .100 (1), p. 199-211. [Consultado 18 diciembre 2018]. ISSN 00260576. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(02\)82021-9](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(02)82021-9)

NAMASIVAYAM, C y DADIRVELU, K. Uptake of mercury (II) from wastewater by activated carbon from unwanted agricultural solid by-product: coirpith. Carbon. [en línea].1999, January. 37 (1). p. 79-84. [Consultado 15 diciembre 2018]. ISSN 00086223. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(98\)00189-4](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(98)00189-4).

NASEEM, R y TAHIR, S.S. Removal of Pb(II) from aqueous solution by using bentonite as an adsorbent. Water Research. [en línea]. 2001, November. 35 (16). p. 3982-3986. [Consultado 15 diciembre 2018]. ISSN 00431354. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00130-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00130-0).

NOGUEROL ARIAS, Joan; VALIENTE MALMAGRO, Manuel y MURAVIEV, Dimitri. Tecnologías Limpias Para La Reducción De Contaminantes y La Recuperación De Solutos De Fuentes Hidrominerales Mediante Resinas De Intercambio Iónico. [en línea]. Tesis doctoral. Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona, 2008. p. 112. [Citado el 26 de enero del 2019]. ISBN 9788469132951. Disponible en: <https://ddd.uab.cat/record/36674/?ln=en>.

NOVATEC FLUID SYSTEMS S.A. [sitio web]. Colombia. Soluciones Confiables. Sistemas y equipos para el manejo, control, dosificación y agitación de fluidos. [Consulta 22 abril 2019]. Disponible en: <https://novatecfs.com/wp-content/uploads/2018/09/novatec-catalogo-novatecfs.pdf>

OJEDA, Luis. Técnicas De Muestreo de Aguas Recolección, manejo y preservación de muestras. En: Hanna Instruments. [sitio web]. [Consulta 8 julio 2019]. Archivo pdf. Disponible en: [http://cdn.hannachile.com/hannacdn/marketing/capacitacion/2015/12/Tecnicas\\_de\\_muestreo\\_de\\_aguas\\_en\\_terrenos.pdf](http://cdn.hannachile.com/hannacdn/marketing/capacitacion/2015/12/Tecnicas_de_muestreo_de_aguas_en_terrenos.pdf)

OSORIO, ESPINEL, Martha. VELASCO SUÁREZ, Sandra. Diseño de la planta de tratamiento para las aguas residuales generadas por el taller de electroquímica de la fuerza aérea colombiana - FAC Madrid, Cundinamarca. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2009. p. 107.

OYARO, N, et al. The contents of Pb, Cu, Zn and Cd in meat in Nairobi, Kenya. *Journal of Food Agriculture and Environment*. [en línea]. 2007, July. 5 (3). p. 119-121. [Consultado 14 diciembre 2018]. ISSN 14590255.

OZTURK, F; EVIS, Z y KILIC, S. 3.12 Hot-Dip Galvanizing Process. En: *Comprehensive Materials Finishing*. p. 178-190. [En línea]. Kidlington, Oxford: Elsevier, 2017 [Citado el 18 de diciembre de 2018].]. ISSN 978-0-12-803249-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09175-X>.

PAUL, Dipak. Research on heavy metal pollution of river Ganga: A review. *Annals of Agrarian Science*. [en línea]. 2017, June. 15 (2). p 278-286. ISSN 15121887. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2017.04.001>

PAULINO, A.T, et al. Novel adsorbent based on silkworm chrysalides for removal of heavy metals from wastewaters. *Journal of Colloid and Interface Science*. [en línea]. 2006, September. 301 (2). p. 479-487. [Consultado 15 diciembre 2018]. ISSN 00219797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.05.032>

PHILIPP, C.T. Wastewater treatment. *Metal Finishing*. [en línea]. 1995, January. 93 (1). p 724- 745. [Consultado 17 enero de 2019]. ISSN 00260576 DOI: [https://doi.org/10.1016/0026-0576\(95\)93417-Z](https://doi.org/10.1016/0026-0576(95)93417-Z).

POON, C.P. Removal of cadmium from wastewaters. *Experientia*. [en línea]. 1984, February. 40 (2). p. 127- 136. [Consultado 15 enero de 2019]. DOI: 10.1007/BF01963575.

QUISPE, Elizabeth. Comparación técnica y económica en el uso del hipoclorito de sodio e hipoclorito de calcio en el tratamiento de efluentes cianurados. [en línea]. Informe de suficiencia para título profesional de ingeniería Química. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Química y Textil. 2010. p. 72. [Citado el 25 de enero del 2019]. Disponible en: [http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/9740/1/quispe\\_se.pdf](http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/9740/1/quispe_se.pdf).

RAMAKRISHNAIAH, C.R y PRATHIMA, B. Hexavalent Chromium Removal by Chemical Precipitation Method: A Comparative Study International Journal of Engineering Research and Applications. [en línea]. 2011, January. 1 (1), p 41-49. ISSN 2493131.

\_\_\_\_\_. Hexavalent chromium removal from industrial wastewater by chemical precipitation method. International Journal of Engineering Research and Applications [en línea]. 2012, April. 2 (2), p 599-603. ISSN 22489622.

RAMALHO, Rubens; BELTRAN, Domingo y DE LORA, Federico. Tratamiento De Aguas Residuales. p. 716. [En línea] España: Reverté, 1990. [Citado el 15 de septiembre de 2018]. ISBN 8429179755. Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=30etGjzPXyWC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>.

RAMÍREZ, Carlos. Capítulo 7 Monitoreo calidad de agua. En: Calidad Del Agua: Evaluación y Diagnóstico. p. 218-233. [En línea]. Colombia: Universidad de Medellín. 2011. [Citado el 11 de septiembre de 2018]. ISBN 9789588692067. Disponible en: [https://www.academia.edu/9511155/Calidad\\_del\\_agua\\_evaluaci%C3%B3n\\_y\\_diagn%C3%B3stico](https://www.academia.edu/9511155/Calidad_del_agua_evaluaci%C3%B3n_y_diagn%C3%B3stico).

RAMÍREZ, Lina y ZORRILLA, Jorge. Ingeniería Básica para el tratamiento de los vertimientos del proceso de Zincado en ASTECNICA LTDA. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2010. p 139.

RAZANAMAHANDRY, Lovasoa, et al. Bioremediation of soil and water polluted by cyanide: A review. African Journal of Environmental Science and Technology. [en línea]. 2017, June. 11 (6). p 272-291. DOI: 10.5897/ajest2016.2264

RESTREPO, Ana; ARANGO, Álvaro y GARCÉS, Luis. La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. Producción Limpia. [en línea]. 2006, Diciembre. 1 (2). p.58-77. [Consultado 26 enero de 2019]. ISSN 19090455

Revisión Bibliográfica. [Anónimo]. p. 12-39. En: UNIVERSIDAD DE LAS AMERICAS PUEBLA. [sitio web]. UDLAP. [Consulta 15 diciembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leia/padilla\\_s\\_mf/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/padilla_s_mf/capitulo2.pdf)

RODRIGUEZ, Juan Pablo. Precipitación química convencional: remoción simultánea de cromo total y plomo de un agua residual proveniente de una industria de galvanizado, en Bogotá, Colombia. 2011, 30 (2). p 147- 153. En: Universidad Tecnológica del Chocó. [sitio web]. Revistas.utch. [Consulta 18 enero de 2019]. Archivo pdf. Disponible en: <https://revistas.utch.edu.co/ojs5/index.php/revinvestigacion/article/viewFile/303/292>

ROMERO LEDEZMA, Karla Pamela. Contaminación por metales pesados. Revista Científica Ciencia Médica. [en línea]. 2009. 12 (1). p 45-46. [Consultado 6 julio 2019]. ISSN 20773323 Disponible en [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1817-74332009000100013&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1817-74332009000100013&lng=es&nrm=iso)

ROMERO ROJAS, Jairo A. Purificación Del Agua. 2ª ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2006. 473 p. ISBN 9588060664

\_\_\_\_\_ Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño. 3ª ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2008. 1248 p. ISBN 9588060133.

ROSALER, Robert y Rice, James. Manual de mantenimiento industrial. México D.F.: Mc Graw- Hill, 1993. Vol. 1. p. 1-33. ISBN 968-451-617-7.

SAĞLAM, Aykut, et al. Chapter 2 - Copper Stress and Responses in Plants. En: Plant Metal Interaction. 2016. p 21-40. [En línea]. Elsevier. [Citado el 6 de julio de 2019]. ISBN 9780128031582. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03536-8>

SAKI, Parastoo; MAFIĞHOLAMI, Roya y TAKDASTAN, Afshin. Removal of cadmium from industrial wastewater by steel slag. Jundishapur Journal of Health Sciences. [en línea]. 2013.5 (1). p .31. . En: Scientific Information Database. [sitio web]. SID. [Consulta 18 enero de 2019]. Archivo pdf. Disponible en: <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=331424>

SANTO, C.E, et al. Optimization of coagulation–flocculation and flotation parameters for the treatment of a petroleum refinery effluent from a Portuguese plant. The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal. [en línea]. 2012, February. 183 (15). p. 117-123. [Consultado 20 diciembre 2018]. ISSN 13858947. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.12.041>

SCHARIO, Mark. Troubleshooting decorative nickel plating solutions (Part II of III installments): The deposition of two layers of nickel on a given substrate has its advantages. However, caution must be taken to ensure adequate adhesion and finish performance. Metal Finishing. [en línea]. 2007, May. 105 (5). p. 41-44. [Consultado 19 diciembre 2018]. ISSN 00260576. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(07\)80550-2](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(07)80550-2)

SHAHALAM, A.M; AL-HARTHY, A y AL-ZAWHRY, A. Feed water pretreatment in RO systems in the Middle East. *Desalination*. [en línea]. 2002, November. 150 (3). p. 235-245. [Consultado 5 enero 2019]. ISSN 00119164. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00979-7](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00979-7)

SHREIE, L.L; JARMAN, R.A y BURSTEIN, G.T. Protection by Metallic Coating. *Corrosion*. p. 3-111. [En línea]. 3<sup>a</sup>. ed. Elsevier, 1994. [Citado el 11 de septiembre de 2018]. ISBN 9780080523514. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCEV00003/corrosion-3rd-edition/corrosion-3rd-edition>.

SILLANPÄÄ, Mika y SHESTAKOVA, Marina. Chapter 2- Electrochemical Water Treatment Methods. En: *Electrochemical Water Treatment Methods: Fundamentals, Methods and Full Scale Applications*. p. 47-130. [En línea]. Finland: Butterworth-Heinemann. [Citado el 20 de diciembre de 2018]. ISBN 9780128114629. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811462-9.00002-5>

SJAHRUL, Muntasir; ZAKIR, Muhammad y RAYA, Indah. Elimination Cyanide with Hydrogen Peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) and Calcium Hypochlorite (Ca(OCl)<sub>2</sub>) on Gold Mine Waste from North Luwu, South Sulawesi. *American Journal of Environmental Protection*. [en línea]. 2016, July. 5 (4). p 97-102. [Consultado 16 enero de 2019]. ISSN 23285699. DOI: 10.11648/j.ajep.20160504.14

SOTO REGALADO, Eduardo, et al. Remoción de metales pesados en aguas residuales mediante agentes químicos. 2004. p. 6 En: UANL Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Químicas. [sitio web]. México: UANL. [Consulta 25 enero de 2019]. Archivo pdf. Disponible en: [www.ingenierias.uanl.mx/23/pdfs/23\\_p46a51\\_soto.pdf](http://www.ingenierias.uanl.mx/23/pdfs/23_p46a51_soto.pdf)

SRIVASTAVA, N.K y MAJUMDER, C.B. Novel biofiltration methods for the treatment of heavy metals from industrial wastewater. *Journal of Hazardous Materials* [en línea]. 2008, February, 151 (1). p. 1-8. [Consultado 14 diciembre 2018]. ISSN 03043894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.101>.

STEFAN, Neumann. Ion Exchange Resins in the Electroplating Industry. *Metal Finishing*. [en línea]. 2012, March. 110 (2), p. 22-26. [Consultado 25 enero de 2019]. DOI: 10.1016/S0026-0576(13)70111-9

SYNERTECH. [sitio web]. Tanques de almacenamiento de agua. [Consulta 21 enero 2019]. Disponible en: <https://www.nyfdecolombia.com/tanques/tanques-de-almacenamiento-de-agua>.

TAPLA, G; BOURGOLS, J y CARRILLO, F. A knowledge base system for the oxidation cyanide process of industrial wastewater treatment. 2007. 7A (1). p.1-9. En: 5<sup>th</sup> International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology. [sitio web]. México: LACCEI. [Consulta 15 enero de 2019]. Archivo pdf. Disponible en: [http://www.laccei.org/LACCEI2007-Mexico/Papers%20PDF/ESE172\\_TapiaTrejo.pdf](http://www.laccei.org/LACCEI2007-Mexico/Papers%20PDF/ESE172_TapiaTrejo.pdf).

TENÓTIO, J.A y ESPINOSA, D.C. Treatment of chromium plating process effluents with ion exchange resins. Waste Management. [en línea]. 2001. 21 (7). p. 637-642. [Consultado 19 diciembre 2018]. ISSN 0956053X. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00118-5](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00118-5).

TEIXEIRA, Luiz Alberto, et al. Oxidation of cyanide in water by singlet oxygen generated by the reaction between hydrogen peroxide and hypochlorite. Minerals Engineering. [en línea]. 2013, September. 50-51. p 57- 63. [Consultado 16 enero de 2019]. ISSN 08926875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.06.007>.

TRIANA NOVOA, María de Pilar. Capítulo 3. Muestreo de Aguas. En: ACADEMIA. EDU. [sitio web]. ACADEMIA. EDU. [Consulta 11 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: [https://www.academia.edu/15697855/UNIVERSIDAD\\_NACIONAL\\_ABIERTA\\_Y\\_A\\_DISTANCIA\\_UNIVERSIDAD\\_NACIONAL\\_ABIERTA\\_Y\\_A\\_DISTANCIA\\_UNAD](https://www.academia.edu/15697855/UNIVERSIDAD_NACIONAL_ABIERTA_Y_A_DISTANCIA_UNIVERSIDAD_NACIONAL_ABIERTA_Y_A_DISTANCIA_UNAD)  
TUNAY, Olcay, et al. Chapter 4: Metal finishing industry. En: Chemical Oxidation Applications for Industrial Wastewaters. IWA Publishing. 2010. p 107-148. [En línea]. London: IWA Publishing. [Citado el 27 de diciembre de 2018]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCOAIW001/chemical-oxidation-applications/chemical-oxidation-applications>.

U.S. Environmental Protection Agency, Office of Superfund Remediation and Technology Innovation. Treatment technologies for mercury in soil, waste, and water. 2007. p 133. En: U.S. Environmental Protection Agency. [sitio web]. EPA. [Consulta 25 enero de 2019]. Archivo pdf. Disponible en: <https://clu-in.org/download/remed/542r07003.pdf>

VELASQUEZ, Johana. Propuesta para el mejoramiento de la PTAR en Inversiones Suarez Ríos LTDA. ZN´S. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. 2010. p. 135.

VIGNESWARAN, S, et al. Physico–chemical treatment processes for water reuse. Physicochemical Treatment Processes. [en línea]. 2004. 3. p. 635-676. [Consultado 19 diciembre 2018]. ISSN 9781592598205. DOI: <https://doi.org/10.1385/1-59259-820-x:635>

WANG, L.K, et al. Chemical precipitation. En: Physicochemical Treatment Processes. p. 141-198. [En línea]. New Jersey: Human Press, 2004 (3). [Citado el 19 de diciembre de 2018]. ISBN 9781592598205. DOI: <https://doi.org/10.1385/1-59259-820-x:141>

\_\_\_\_\_ ; SHAMMAS, Nazih y HUNG, Yung-Tse. Treatment of Wastes from Metal Finishing Industry. En: Advances in Hazardous Industrial Waste Treatment. p 139-175. [En línea]. CRC Press, 2009. [Citado el 26 de enero de 2019]. ISBN 9781420072310. Disponible en: [https://books.google.com.co/books?id=GIzLBQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Advances+in+Hazardous+Industrial+Waste+Treatment&hl=es&sa=X&ved=0ahUK EwjNINKe3OHIAhUnwVkkKHdcFD\\_UQ6AEIKDAA#v=onepage&q=Advances%20in%20Hazardous%20Industrial%20Waste%20Treatment&f=false](https://books.google.com.co/books?id=GIzLBQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Advances+in+Hazardous+Industrial+Waste+Treatment&hl=es&sa=X&ved=0ahUK EwjNINKe3OHIAhUnwVkkKHdcFD_UQ6AEIKDAA#v=onepage&q=Advances%20in%20Hazardous%20Industrial%20Waste%20Treatment&f=false).

\_\_\_\_\_ ; SHAMMAS, Nazih y HUNG, Yung-Tse. Treatment of Metal Finishing Industry Wastes. En: Waste Treatment in the Metal Manufacturing, Forming, Coating, and Finishing Industries. p. 345-381. [En línea]. CRC Press, 2009. [Citado el 25 de enero de 2019]. ISBN 9781420072235. Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=7s-H4q8ddlgC&pg=PA495&lpg=PA495&dq=Waste+Treatment+in+the+Metal+Manufacturing,+Forming,+Coating,+and+Finishing+Industries&source=bl&ots=nRWNaMW6B1&sig=ACfU3U1mFHU3m4HR3JSK2MxM92zCSAFO3g&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiSguOJ1OHIAhWQ1IkKHRNTDKoQ6AEwDHoECAkQAQ#v=onepage&q=Waste%20Treatment%20in%20the%20Metal%20Manufacturing%2C%20Forming%2C%20Coating%2C%20and%20Finishing%20Industries&f=false>

YLI-PENTTI, A. Electroplating and Electroless Plating. Comprehensive. En: Materials Processing. p. 277-306. [En línea]. Amsterdam: Elsevier, 2014. [Citado el 19 de diciembre de 2018]. ISBN 9780080965338. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00413-1>

## **ANEXOS**

**ANEXO A.**  
**HISTÓRICO CARACTERIZACIONES ENTRADA PTAR.**






Laboratorio acreditado  
NTC-650/REG-17025-2005  
mediante Resolución  
número 0076/2014-2017



ACOP1  
Premio Nacional  
PYME  
Producto Innovador  
2008

**REPORTE DE RESULTADOS MUESTRA No. 1106213** REG-REA-094 Versión 4.0

INFORMACION DEL CLIENTE			
Empresa	Comando aereo de Mantenimiento - FAC	Ciudad y Fecha	Bogota D.C., 2017/11/09 10:16
Nit	800.141.641-8	Teléfono	Fax 0
Dirección	MADRID, CUNDINAMARCA	E-mail	

INFORMACION DE LA MUESTRA			
Muestra	Agua residual industrial. Entrada Planta de Tratamiento de recubrimientos electrofílicos.		
Fecha recepción	2017/10/05	Características	Muestra Ambiental
Fecha Elaboración		Temperatura °C	4.2
Fecha Vencimiento		Metodo muestreo	Puntual
Nro Lote		Sitio muestreo	Entrada Planta de Tratamiento .
Proveedor		Tipo Envase	Empaque plastico, vidrio, ambar
		Tamaño Muestra	6250 mL
		Norma	Resolución No.631 de 2015
		Muestreo por:	Empresa
		Muestreo Fecha/hora:	2017/10/04 07:00

RESULTADOS						
Parámetro	Resultado Fecha/Hora	Método	Resultado	Unidades	Especificaciones recomendadas	
					Inferior	superior
Absorción atómica						
Cloruro	2017/06/14 10:06	S.M. 22st Edition 3114 C.	1,22	mg/L		
Bario	2017/06/16 07:06	S.M. 22st Edition 3111 D	0,20	mg/L		
Cadenio	2017/06/07 16:06	S.M. 22st Edition 3113 B.	4,01	mg/L		
Cromo	2017/06/09 12:06	S.M. 22st Edition 3111 B.	5,29	mg/L		
Mercurio	2017/06/13 11:06	S.M. 22st Edition 3112 B.	0,002	mg/L		
Niquel	2017/06/09 11:06	S.M. 22st Edition 3111B	9,02	mg/L		
Plata	2017/06/09 11:06	S.M. 22st Edition 3111B	<0,05	mg/L		
Piomo	2017/06/07 17:06	S.M. 22st Edition 3111 B.	4,45	mg/L		
Selenio	2017/06/14 12:06	S.M. 22st Edition 3114 C.	<0,002	mg/L		
Fisicoquímica						
DBO5	2017/06/07 10:06	SM 5210 B, ASTM D 889-05 C	1203	mgO2/L		
DQO	2017/06/06 09:06	S.M. 5230 C	625	mgO2/L		
Fenoles	2017/06/01 10:06	S.M. 22st Edition 5530B-C	<0,10	mg/L		
Grasas y Aceites	2017/06/01 09:06	SM 22nd Edition 5520 D	100	mg/L		
pH	2017/06/16 07:06	Electrometrico	4,24	Unidades		
Sólidos Sedimentables (SSED)	2017/06/07 14:06	SM 22nd Edition 2540 F	1,9	mg/L		
Sólidos Suspensidos Totales (SST)	2017/06/01 15:06	SM 22nd Edition 2540 D	1253	mg/L		

Los resultados son validos solo para la muestra en referencia y para los ensayos realizados. No se permite la reproducción parcial o total del informe sin previa autorización escrita por parte de Asinal Ltda.  
A Parámetros Acreditados, S Parámetros Subcontrastados



**Belisario Acevedo D. Ph.D.**  
Director técnico

www.asinal.com - Tel: +57(1) 605-3555 Fax: 7202144 - Calle 10 Sur No 41-27 (Ciudad Montes), Bogotá D.C. Colombia  
SERVICIO NACIONAL E INTERNACIONAL (PANAMA, CENTROAMERICA, CARIBE, ECUADOR)

**Fuente:** Resultados laboratorio ASINAL

### 6.2.3 Muestreo Descarga Entrada PTAR electroquímica (1113333).

**Tabla 8.** Resultados de laboratorio, Comparación Normativa con la Resolución 631 de 2015

Parámetros	Unidades Expresadas	Reporte No. 1113333	Resolución 0631 de 2015.	Criterio
Temperatura.	°C	17.0	Ver informe.	Ver informe.
pH.	Unidades pH	6.49	6,00 a 9,00	Cumple
Caudal.	L/s	0,021	Ver informe.	Ver informe.
Solidos Sedimentables (SSED).	mgSSED/L	110	1,00	No Cumple
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5).	mgO2/L	189	50	No Cumple
Demanda Química de Oxígeno (DQO).	mgO2/L	291	150	No Cumple
Solidos Suspendidos Totales (SST).	mgSST/L	5028	50	No Cumple
Grasas y Aceites.	mg/L	93	10	No Cumple
Fenoles Totales.	mgFenol/L	0.51	0.20	No Cumple
Cianuro Total.	mgCN-/L	25,37	0,10	No Cumple
Cadmio.	mg Cd/L	88,10	0.01	No Cumple
Cromo Total.	mg Cr/L	134,22	0.10	No Cumple
Mercurio.	mg Hg/L	< 0,001	0.002	Cumple
Níquel.	mg Ni/L	236,53	0,10	No Cumple
Plata.	mg Ag/L	<0,05	0.5	Cumple
Plomo.	mg Pb/L	16,32	0,10	No Cumple
Bario.	mgBa/L	0,86	1,00	Cumple
Selenio.	mgSe/L	<0,002	0,20	Cumple
Arsénico	mg As/L	0.006	0.10	Cumple

Fuente: Resultados laboratorio ASINAL

## ANEXO B.

### HISTÓRICO CARACTERIZACIÓN AGUA SALIDA PTAR.



**ASINAL**  
Laboratorio



**INNOVA**  
Innovación Empresarial



**IDEAM**  
Instituto Colombiano de Desarrollo Urbano

Laboratorio Acreditado  
NTC-ISO/IEC-17025:2005  
Mediante Resolución  
Número 2456 del 2017



**ACOPH**  
Asociación Nacional  
FPMO  
Productos Saneantes  
2008

REG-REA-094 Versión 4.0

**REPORTE DE RESULTADOS MUESTRA** No. **1113454**

**INFORMACIÓN DEL CLIENTE**

Empresa Bioambiente Ingeniería S.A.S. Ciudad y fecha Bogotá, 2018-08-27  
 NIT 830504411-9 Teléfono 3014495477 Fax 0  
 Dirección Carrera 51 N° 51-08 OF 306 ED Romeral Email bioambienteingenieria@gmail.com

**INFORMACIÓN DE LA MUESTRA**

Muestra	Agua Residual no Doméstica - Salida PTAR electroquímica				
Fecha de recepción	2018-07-31	Características	ARnD	Tipo de Envase	Plástico, Vidrio y Ámbar
Fecha de elaboración	N.A	Temperatura	4,2	Tamaño Muestra	4,250mL
Fecha de vencimiento	N.A	Método de Muestreo	Puntual	Norma	Resolución 0631 de 2015
No. Lote	N.A	Sitio de Muestreo	Vertimientos comando junto canal Sierra uestra colombiana	Muestreo por	Alexander Romero
Proveedor	N.A			Muestreo Fecha/Hora	2018-07-31 12:00 p. m.

**RESULTADOS**

Parámetro	Resultado Fecha	Método	Resultado	Unidades	Especificaciones recomendadas		
					Inferior	Superior	Cualitativo
<b>Fisicoquímica</b>							
Temperatura		SM 2550 B	Ver informe	°C			Análisis y Reprote
pH		SM 4500-H+ B	Ver informe	Unidades pH	Mínimo 6,0	Máximo 9,0	
Caudal		Volumétrica	Ver informe	L/s			Análisis y Reprote
Sólidos Sedimentables (SSSED)		Volumétrico - Cono Imhoff, SM 2540 F	Ver informe	mgSSSED/L		Máximo 1,00	
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	2018-08-03	Gravimétrico - secado a 103°C - 105°C, SM 2540 D	<2,5	mgSST/L		Máximo 50,00	
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	2018-08-01	Incubación a 5 días y Modificación de Azida, SM 5210 B, 4500 - O, C	19	mgO2/L		Máximo 50,00	
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	2018-08-01	Reflujo cerrado y volumétrico, SM 5220 C	30	mgO2/L		Máximo 150,00	
Grasas y Aceites	2018-08-16	Extracción Soxhlet, SM 5520 D	<10	mg/L		Máximo 10,00	
Fenoles Totales	2018,08,09	Destilación - Extracción con cloriformo, SM 5530 B, C	0,24	mg/eno/L		Máximo 6,20	
Cianuro Total	2018,08,21	SM 4500- CN, B, C, E	0,46	mgCN/L		Máximo 0,10	
<b>Absorción Atómica</b>							
Cadmio	2018-08-08	SM 3030 F, SM 3111 B	1,64	mgCd/L		Máximo 0,01	
Cromo Total	2018-08-09	SM 3030 F, SM 3111 B	2,50	mgCr/L		Máximo 0,10	
Mercurio	2018-08-06	Espectrofotometría de absorción atómica - vapor frío, SM 3112 B	<0,001	mgHg/L		Máximo 0,002	
Níquel	2018-08-13	SM 3030 F, SM 3111 B	6,21	mgNi/L		Máximo 0,10	
Plata	2018-08-13	SM 3030 F, SM 3111 B	<0,05	mgAg/L		Máximo 0,20	
Plomo	2018-08-13	SM 3030 F, SM 3111 B	0,15	mgPb/L		Máximo 0,10	
Bario	2018-08-17	SM 3030 F, SM 3111 D	0,05	mgBa/L		Máximo 1,00	
Selenio	2018-08-18	SM 3114 B, C	<0,002	mgSe/L		Máximo 0,20	
Arsénico	2018-08-15	SM 3114 B, C	<0,002	mgAs/L		Máximo 0,10	

Los resultados son válidos sólo para las muestras en referencia y para los ensayos realizados. No se permite la reproducción parcial o total del Informe sin previa autorización escrita por parte de ASINAL S.A.S.  
A. Parámetros Acreditados, S. Parámetros Subacreditados.

\*La resolución 0921 de 2015 no contempla límite para este parámetro

**Laboratorio**  
fisicoquímica

*No Aceptable*

**CLASIFICACIÓN DE LA MUESTRA**

Observaciones

Calidad Fisicoquímica "No Aceptable", Parámetros que superan los límites establecidos por la resolución 0631 de 2015

Fenoles Totales  
Cianuro Total  
Cadmio  
Cromo  
Níquel  
Plomo



**Belisario Acevedo D. Pfl. D.**  
Director Técnico

Fuente: Resultados laboratorio ASINAL

## ANEXO C.

### INFORMES MANTENIMIENTO PTAR-FAC.

MANTENIMIENTO DE PLANTAS PTAR RUBRO: 2-0-4-5-12-10

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD DE MEDIDA	CANT	V/UNIT ANTES DE IVA	IVA	V/UNIT CON IVA	V/TOTAL
<b>PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.</b>							
<b>PETAR. 1 ELECTROQUIMICA</b>							
1	Cambio de bomba sumergible en acero inoxidable, que soporte cambios fuertes de PH, (incluye suministro) Nota: el mantenimiento incluye bomba de respaldo por parte del contratista teniendo en cuenta el continuo retiro de agua.	UND	1	\$1.800.000	\$342.000	\$2.142.000	\$2.142.000
	Mantenimiento preventivo de electrobomba o bomba centrifuga, cambio de sellos, rodamientos mecánicos y cambio de escobillas	UND	1	\$250.000	\$47.500	\$297.500	\$297.500,00

Adecuación de Tanque de fibra de vidrio para almacenar soda caustica con capacidad de 200 lt.	UND	1	\$250.000	\$47.500	\$297.500	\$297.500
Adecuación Tanque de fibra de vidrio para almacenar peróxido de hidrogeno e hipoclorito de calcio con capacidad de 100 lt.	UND	1	\$250.000	\$47.500	\$297.500	\$297.500
Cambio de válvula de paso universal en PVC de dos 2".(incluye suministro)	UND	1	\$150.000	\$28.500	\$178.500	\$178.500
Mantenimiento de la cubierta del tablero de control.	GLOBA L	1	\$150.000	\$28.500	\$178.500	\$178.500
Señalización de la planta e identificación con los pictogramas de seguridad	GLOBA L	1	\$250.000	\$47.500	\$297.500	\$297.500
Cambio de grabas en los lechos filtrantes 1 y 2 con su respectiva ficha técnica Incluye la recolección, cambio y correcta disposición de los desechos retirados.	UND	1	\$1.500.000	\$285.000	\$1.785.000	\$1.785.000
Soda caustica en escama al 98% bulto por 25 kg	UND	10	\$99.000	\$18.810	\$117.810	\$1.178.100
Acido sulfúrico 99% por GL	UND	30	\$40.000	\$7.600	\$47.600	\$1.428.000
Tirillas papel indicador MERCK caja por 100 und.	UND	5	\$12.000	\$2.280	\$14.280	\$71.400

Fuente: Hidroquality S.A.S

**ANEXO - ACEPTACIÓN DE LA OFERTA PROCESO DE SELECCIÓN DE MÍNIMA CUANTÍA No. 045-00-M-CAMAN-GRUAL-2018, CELEBRADO ENTRE EL MINISTERIO DE DEFENSA NACIONAL – FUERZA AÉREA COLOMBIANA – COMANDO AÉREO DE MANTENIMIENTO Y BIOAMBIENTE INGENIERIA S.A.S. con NIT 830.504.411-9.**

**CONTRATANTE:** Ministerio de Defensa Nacional – Fuerza Aérea Colombiana – Comando Aéreo de Mantenimiento, en adelante EL MINISTERIO.

Delgado Contractual	Coronel NELSON ENRIQUE PULIDO MARTINEZ
Cédula de Ciudadanía No.	No. 79.668.245 de Bogotá
Nombramiento	Nombrado como Segundo Comandante y Jefe Estado Mayor mediante Resolución No. 752 del 02 de Noviembre de 2017, toma posesión el 1ero de diciembre de 2017.
Facultad para contratar	Resolución MDN No. 1417 del 08 de Marzo de 2018.
N.I.T. No.	800.141.641-8

**CONTRATISTA:** BIOAMBIENTE INGENIERIA S.A.S. en adelante EL CONTRATISTA.

NIT	830.504.411-9
Representante Legal	PEDRO FERNANDO RODRIGUEZ PAVA
Cédula de Ciudadanía No.	8.430.096 de Itagüí
Domicilio	CR 51 CL 51 08 OF 306 ED ROMERAL GUARNE Celular: 3014495477 Email: bioambienteingenieria@gmail.com

PTAR No.1 ELECTROQUIMICA				
ACTIVIDAD	DESCRIPCION DE ACTIVIDADES	UNIDADES	Cantidad Requerida	Necesidad real
1	Soda caustica en escama al 98%	KG	70	100
2	Acido sulfúrico 99%	KG	150	230
3	Tirillas papel indicador de referencia o similar Merck, caja por 100 und.	UND	1	3
4	Mantenimiento de bombas dosificadoras marca <del>seko</del> referencia <del>teknoEVO</del> # 2 y #4 las cuales se encuentran en funcionamiento, dosificadoras de ácido sulfúrico e hipoclorito de calcio, incluye cambio de componentes que se encuentren desgastados, cambio de sellos, <del>diagrama</del> , se requiere instalación y programación.	UND	2	2
5	Mantenimiento del <del>conductimetro</del> incluye la revisión de la parte eléctrica y electrónica, con cambio de electrodo y calibración son soluciones patrón, incluye todos los accesorios para que quede en perfecto funcionamiento. Entrega de certificado de calibración por organismo acreditado ante la ONAC.	UND	0	1

6	Mantenimiento de 02 bombas centrifugas de lodos y agua potable, marca Barnes, las cuales se encuentran en funcionamiento, en acero inoxidable, incluye cambio de rodamientos sello mecánico de potencia de 1 hp el fluido que maneja la bomba es agua y de lodos con variaciones de ph 2-14	UND	2	2
7	Pintura de los 02 tanques exteriores en fibra de vidrio con capacidad de 5 m3 c/u, que componen la planta de tratamiento, color azul epóxido, incluye la limpieza y remoción de óxido en las escalera y pintura anticorrosiva de color negro, además de la estructura metálica que soporta los tanques reactores	UND	0	2
8	Pintura de 02 tanques regenerante A y B en pintura color azul epoxica, incluyendo las tapas.	UND	0	2
9	Pintura de filtros de gravas color azul epóxido	UND	0	2
11	Pintura de tuberías color gris aceite	METRO	0	80
12	pintura de estructura de soporte de tanques de regenerantes color gris aceite	UND	0	1
13	Pintura de cerramiento de planta de tratamiento color blanca aceite	GLOBAL	0	1
14	Suministro y cambio de sensores de nivel de tanques	UND	8	8
15	Revisión, cambio y ajuste de componentes eléctricos del tablero de control	GLOBAL	0	1
16	Revisión, ajuste del sistema de programación de planta de tratamiento (programa)	GLOBAL	0	1
17	Suministro de planos eléctricos de la planta de tratamiento (fuerza, control y PLC)	GLOBAL	0	1
18	Actualización del manual de procesos con respecto a las guías emitidas por la Jefatura de Apoyo Logístico, y protocolo de respuesta ante emergencias.	GLOBAL	1	1
19	Calibración del turbidímetro marca micro TPI, incluyendo patrones, además del Phmetro WTW, y fotómetro PF-12, para lo cual se requiere la entrega del certificado expedido por la ONAC.	UND	0	3
20	Suministro de los siguientes test: (01) test 0-31 Cyanid 08, (01) kit de tiras reactivas para cianuro, (01) test 5-20 cromo, (01) test 0-74 de índice fenolico.	UND	2	4

Fuente: Bioambiente Ingenieria S.A.S

## ANEXO D.

### CARACTERIZACIÓN TRATAMIENTO ORDEN ACTUAL DE ETAPAS.

**L. Q.**  
**LABORATORIO QUIMICONTROL LTDA.**  
Ambiente e Industria



**INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO**



INFORME 4 OCA 1148-AG  
3 de abril de 2019

**IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE**

Señora  
JESIKA ALEJANDRA PEÑA ANTONIO  
Teléfono: 3115711570  
Dirección: Carrera 7A N° 134B - 50  
E-mail: jalejandra1806@gmail.com  
Bogotá D.C.

**IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA**

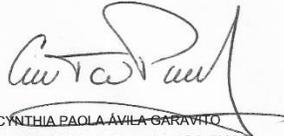
ORDEN DE SERVICIO: 7451  
FECHA RECEPCIÓN MUESTRA: 23 de marzo de 2019  
MATRIZ: AR  
FECHA DE MUESTREO: 21 de marzo de 2019  
TIPO DE MUESTREO: Compuesto  
PUNTO DE MUESTREO: Tratamiento Actual (uso de condiciones adecuadas)  
IDENTIFICACIÓN MUESTRA: 19-AG1248  
OBSERVACIONES: Muestra tomada por el cliente y enviada al laboratorio

Variable	Unidad	Método	Fecha Análisis	Resultados	Incertidumbre
Cadmio total, Cd	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2019-04-01	1,78	±0.1207
Níquel total, Ni	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2019-04-02	3,34	±0.3751

SM: "STANDARD METHODS For The Examination Of Water And Wastewater" 23RD EDITION, 2017. (A.A.): Absorción Atómica. AR: Agua Residual.

NOTA 1: Los resultados que se relacionan en este informe corresponden únicamente a la muestra analizada.  
NOTA 2: La reproducción total o parcial de este informe deberá ser autorizada por el Laboratorio Quimicontrol Ltda.  
NOTA 3: Las muestras serán eliminadas treinta (30) días después de haber sido recibidas.  
NOTA 4: Incertidumbre expandida para un nivel de confianza del 95,45 % con un factor K=2.

Este informe NO es válido para impresión ni almacenamiento sin firma original de las personas autorizadas por el Laboratorio.



CYNTHIA PAOLA ÁVILA GARAVITO  
Química, Matricula Profesional PQ-5002  
Coordinadora Técnica

**FIN DEL INFORME**

Elaboró: Johan David Quiroga Alarcón  
Revisó: Ninfa Yiseth Martínez Arevalo

Página 4 de 4 Teléfono: 493 06 19 - 973 84 57. Email: qcua@laboratorioquimicontrol.com Web site: www.laboratorioquimicontrol.com. Dirección: Carrera 78 J # 40 B 52 sur. Bogotá.

**Fuente:** Resultados laboratorio Quimicontrol

## ANEXO E. TEST KIT CIANURO.

REF 985 031 en  
**Test 0-31 03.15**  
**NANOCOLOR® Cyanide 08**

**Method:**

Cyanide ions react with chloramine T to form cyanogen chloride. Combined with isonicotinic acid and 1,3-dimethylbarbituric acid, this forms a blue polymethine dye. The method identifies free cyanide and cyanide complexes that are decomposed by chlorine.

Range:	Tube test 0.02–0.80 mg/L CN <sup>-</sup>	Semi micro cuvette 50 mm 0.005–0.100 mg/L CN <sup>-</sup>
Factor:	00.49	00.12
Wavelength (HW = 5–12 nm):	585 nm	
Range:	0.01–0.50 mg/L CN <sup>-</sup>	0.002–0.100 mg/L CN <sup>-</sup>
Factor:	00.25	0.065
Wavelength (HW = 5–12 nm):	605 nm	
Reaction time:	10 min	
Reaction temperature:	20–25 °C	

**Contents of reagent set:**

20 test tubes Cyanide 08  
 1 tube NANOFIX Cyanide 08 R2  
 1 test tube with 11 mL Cyanide 08 R3

**Hazard warning:**

Reagent R2 contains chloramine T 10–100%, reagent R3 contains sodium hydroxide solution 0.5–2%.  
 H314, H334 Causes severe skin burns and eye damage. May cause allergy or asthma symptoms or breathing difficulties if inhaled.  
 P280, P281, P280, P301+330+331, P303+361+353, P304+340, P305+351+338, P342+311, P501 Do not breathe vapors. Avoid breathing dust. Wear protective gloves/eye protection. IF SWALLOWED: Rinse mouth. Do NOT induce vomiting. IF ON SKIN (or hair): Take off immediately all contaminated clothing. Rinse skin with water/shower. IF INHALED: Remove person to fresh air and keep comfortable for breathing. IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing. If experiencing respiratory symptoms: Call a POISON CENTER/doctor/... Dispose of contents/ container to regulated waste treatment. For further information ask for a safety data sheet.

**Preliminary tests:**

If the order of magnitude of the concentration in a sample is not known, a preliminary test with QUANTOFIX® Cyanide (1–30 mg/L CN<sup>-</sup>, REF 013 18) rapidly gives this information. From the order of magnitude the required dilution can be calculated and prepared directly.

**Interferences:**

Complexed cyanide is not or not completely detected. Reducing agents interfere since they react with the chlorinating agent. Thiocyanate, sulfide, bromide, iodide and metals like mercury or silver interfere even in low concentrations.

The following ions will not interfere: < 10 g/L Ca<sup>2+</sup>; < 1000 mg/L Al<sup>3+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; < 500 mg/L Cd<sup>2+</sup>; < 200 mg/L Fe<sup>3+</sup>, Ni<sup>2+</sup>; < 100 mg/L NO<sub>2</sub><sup>-</sup>; < 50 mg/L Cr(III), Cr(VI), Cu<sup>2+</sup>; < 5 mg/L Mn<sup>2+</sup>, Mo(VI).

To circumvent interferences cyanide is separated by distillation before determination (see "Note").

The method can be applied also for the analysis of sea water after dilution (1+3).

**Note:**

For the determination of readily liberated cyanide and total cyanide, please contact MACHEREY-NAGEL for special working instructions.

**Procedure:**

Requisite accessories: piston pipette with tips

Open test tube, add 4.0 mL test sample (the pH value of the sample must be between pH 1 and 13) and 1 NANOFIX R2, close and mix. (Close NANOFIX tube immediately after use.) Add 500 µL (= 0.5 mL) R3, close and mix. Clean outside of test tube and measure after 10 min.
--

Lower cyanide concentrations (0.002–0.100 mg/L CN<sup>-</sup>) can be determined by using semi-micro cuvettes 50 mm (REF 919 50):

Test sample	Blank value
Open test tube, add 4.0 mL test sample (the pH value of the sample must be between pH 1 and 13) and 1 NANOFIX R2, close and mix. (Close NANOFIX tube immediately after use.) Add 500 µL (= 0.5 mL) R3, close and mix.	Open test tube, add 4.0 mL distilled water and 1 NANOFIX R2, close and mix. (Close NANOFIX tube immediately after use.) Add 500 µL (= 0.5 mL) R3, close and mix.

Pour the contents of test tubes into semi-micro cuvettes 50 mm and measure after 10 min [method 1311].

**Measurement:**

For NANOCOLOR® photometers and PF-12 see manual, test 0-31.

**Measurement when samples are colored or turbid:**

For all NANOCOLOR® photometers see manual, use key for correction value.

**Photometers of other manufacturers:**

For other photometers check whether measurement of round glass tubes is possible. Verify factor for each type of instrument by measuring standard solutions.

MACHEREY-NAGEL GmbH & Co. KG · Neumann-Neander-Str. 6–8 · 52355 Düren · Germany  
 Tel.: +49 24 21 989-0 · Fax: +49 24 21 989-199 · info@mn-net.com · www.mn-net.com

PD 14122 / A020112 / 985 031 / 0352

**Fuente:** MACHEREY-NAGEL. Test 0-31 Nanocolor® Cyanide 08. En: MACHEREY-NAGEL. [sitio web]. [Consulta 03 mayo 2019]. Archivo pdf. Disponible en: [http://ftp.mn-net.com/english/Instruction\\_leaflets/NANOCOLOR/985031en.PDF](http://ftp.mn-net.com/english/Instruction_leaflets/NANOCOLOR/985031en.PDF)

**ANEXO F.**  
**TEST KIT CROMO.**

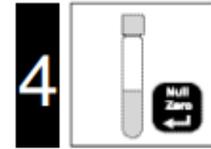
**visicolor® ECO Chrom(VI)**  
**Chromium(VI) / Chrome(VI) / Cromo(VI)**

Art.-Nr. 931 220

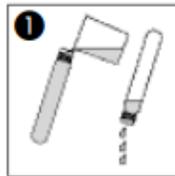
Method(e) / Método

- ECO CHROM(VI)
- ECO CHROMIUM(VI)
- ECO CHROME(VI)
- ECO CROMO(VI)

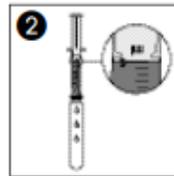
0.02 - 0.50 mg/l Cr(VI)  
0.04 - 1.00 mg/l CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>



4  
Fit. Probe / sample  
échantillon / muestra



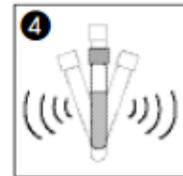
1  
Küvetten spülen  
Rinse test tubes  
Rincer les éprouvettes  
Lavar los tubos



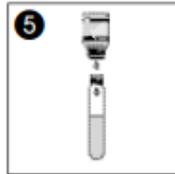
2  
5 ml Probe  
Sample  
Echantillon  
Muestra



3  
5 ml Cr-1



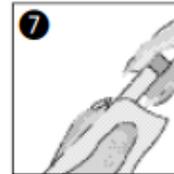
4  
Schütteln  
Shake  
Agiter  
Agitar



5  
5 ml Cr-2



6  
Schütteln  
Shake  
Agiter  
Agitar



7  
Säubern  
Clean  
Nettoyer  
Limpiar



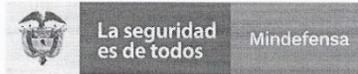
8  
3'00 min



9  
Messung  
Measurement  
Mesure  
Medición

**Fuente:** ANALYSEN VISCOLOR ECO. Test Visicolor® ECO Chrom (VI). [sitio web]. [Consulta 03 mayo 2019]. Archivo pdf. Disponible en: <http://ftp.mn-net.com/english/User%20manuals/Wateranalysis/PF-11%20User%20Manual%20EN/PF-11%20test%20pages%20VISOECO%20EN.pdf>

## ANEXO G. CRITERIOS MATRIZ.



Señores  
Fundación Universidad de América  
Departamento de Ingeniería Química  
Madrid, 27 de marzo de 2019

Asunto: Porcentajes Matriz

Por medio de la presente se estipulan los criterios que se deben tener en cuenta para la selección de la alternativa más favorable para la planta de tratamiento de agua residual del Comando de Mantenimiento Aéreo (CAMAN) en el trabajo de grado "Propuesta para un sistema de tratamiento de aguas residuales generadas en el proceso del taller de electroquímica perteneciente a la Fuerza Aérea Colombiana Madrid – Cundinamarca".

Los criterios que deben ser tenidos en cuenta con sus respectivos porcentajes se muestran a continuación:

Crterios	Valor
Económico (Inversión, costos de operación y mantenimiento, consumo energético)	40%
Técnico (Requerimiento de espacio, vida útil de equipos)	30%
Operativo (Rendimiento, tiempo de operación y peligrosidad de reactivos)	30%
<b>Total</b>	<b>100%</b>

En constancia firman:

Barrera Valbuena Marcela Johana  
Subteniente  
Fuerza Aérea Colombiana  
Directora proyecto de grado

"ASÍ SE VA A LAS ALTURAS"  
Línea Anticorrupción Fuerza Aérea Colombiana 01 8000 110 588  
Carrera 54 No. 26-25 CAN – Conmutador 3159800 Bogotá, Colombia.  
[www.fac.mil.co](http://www.fac.mil.co)



Fuente: Fuerza Aérea Colombiana

## ANEXO H.

### CARACTERIZACIÓN AGUA ANTES DE TRATAMIENTO.



**L. Q. LABORATORIO QUIMICONTROL LTDA.**  
Ambiente e Industria

**INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO**



**IDEAM**  
INSTITUTO DE HIDROLOGÍA,  
METEOROLOGÍA Y  
ESTUDIOS AMBIENTALES

Laboratorio acreditado  
NTC-SO/IEC 17025:  
2005 - Resolución de  
reconocimiento y extensión  
de acreditación N° 0459  
de 2015. Resoluciones  
de extensión de la  
acreditación N° 0097 de  
2016, 0010 y 1503 de  
2017.

INFORME 1 OCA 1148-AG  
22 de marzo de 2019

**IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE**

Señora  
JESIKA ALEJANDRA PEÑA ANTONIO  
Teléfono: 3115711570  
Dirección: Carrera 7A N° 134B - 50  
E-mail: jalejandra1806@gmail.com  
Bogotá D.C.

**IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA**

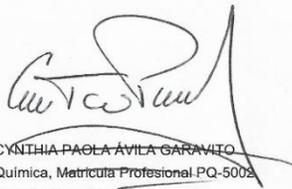
ORDEN DE SERVICIO: 7336  
FECHA RECEPCIÓN MUESTRA: 11 de marzo de 2019  
MATRIZ: AR  
FECHA DE MUESTREO: 26 de febrero de 2019  
TIPO DE MUESTREO: Compuesto  
PUNTO DE MUESTREO: Entrada a la PTAR - Procesos Galvanicos  
IDENTIFICACIÓN MUESTRA: 19-AG1013  
OBSERVACIONES: Muestra tomada por el cliente y enviada al laboratorio

Variable	Unidad	Método	Fecha Análisis	Resultados	Incertidumbre
Cianuro total, CN **	mg/L	SM 4500-CN <sup>-</sup> F, Potenciométrico	2019-03-13	7,53	±0.7398
Fenoles totales	mg/L	SM 5530 B, C, Destilación - Extracción con cloroformo	2019-03-11	< 0,049	±0.0022
Plomo total, Pb	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2019-03-19	0,086	±0.0144
Plata total, Ag	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2019-03-16	0,006	±0.0003
Níquel total, Ni	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2019-03-19	3	±0.3368
Mercurio total, Hg **	mg/L	2. SM 3112 B, A.A. Vapor frío	2019-03-20	< 0,0007	±0.0001
Cromo total, Cr	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2019-03-16	14	±0.8056
Cadmio total, Cd	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2019-03-16	3,57	±0.2428

SM: "STANDARD METHODS For The Examination Of Water And Wastewater" 23RD EDITION, 2017. (A.A.): Absorción Atómica. (\*\*): Variable que no se encuentra acreditada. (<): Menor que límite de cuantificación del método. AR: Agua Residual. Punto Muestreo: Entrada a la PTAR, Proveniente del taller de electro-química de procesos galvánicos.

NOTA 1: Los resultados que se relacionan en este informe corresponden únicamente a la muestra analizada.  
 NOTA 2: La reproducción parcial de este informe será autorizada por el Laboratorio Quimicontrol Ltda.  
 NOTA 3: Las muestras serán eliminadas treinta (30) días después de haber sido recibidas.  
 NOTA 4: Incertidumbre expandida para un nivel de confianza del 95,45 % con un factor K=2.

Este informe NO es válido para impresión ni almacenamiento sin firma original de las personas autorizadas por el Laboratorio.



CYNTHIA PAOLA ÁVILA GARAVITO  
Química, Matriculada Profesional PQ-5003  
Coordinadora Técnica

**FIN DEL INFORME**

Elaboró: Johan David Quiroga Alarcón  
Revisó: Ninfa Yiseth Martínez Arevalo

**Fuente:** Resultados Laboratorio Quimicontrol

## ANEXO I.

### DATOS Y RESULTADOS CARACTERIZACIÓN REALIZADA EN EL LABORATORIO DE LA UNIVERSIDAD MILITAR ANTES Y DESPUÉS DE TRATAMIENTO.

- **Demanda Química de Oxígeno por reflujo cerrado y volumetría** (Figura 57):

Los datos promedio experimentales para determinar DQO se muestran en la Tabla 30.

**Tabla 30.** Datos experimentales para DQO.

	mL de FAS usado (Agua antes de tratamiento)	mL de FAS usado (Agua después de tratamiento)
Blanco (B)	1,98	1,48
Muestra (A)	0,145	1,39

**Fuente:** elaboración propia

Se determina DQO mediante la Ecuación 29.

**Ecuación 29.** Determinación DQO.

$$DQO = \frac{(B - A) \cdot N \cdot 8 \cdot 1000}{V_m}$$

**Fuente:** INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES .Demanda Química de Oxígeno por Reflujo cerrado y volumetría. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>

Donde,

*B*: mL de FAS usado para blanco

*A*: Promedio de mL de FAS utilizado en la muestra

*N*: Normalidad del FAS

*V<sub>m</sub>*: mL de la muestra

8: Peso equivalente del oxígeno

$$DQO_{\text{Antes tratamiento}} = \frac{(1,98 - 0,145) \times 0,1N \times 8 \times 1000}{2,5 \text{ mL}} = 587,2 \text{ mg O}_2/\text{L}$$

$$DQO_{\text{Después tratamiento}} = \frac{(1,48 - 1,39) \times 0,1N \times 8 \times 1000}{2,5 \text{ mL}} = 28,8 \text{ mg} \frac{\text{O}_2}{\text{L}}$$

**Figura 57.** Desarrollo experimental determinación DQO.



**Fuente:** elaboración propia

- **Demanda Bioquímica de oxígeno 5 días, Incubación de 5 días-Modificación azida (Figura 58):**

Los datos promedio experimentales para determinar  $DBO_5$  del agua sin tratamiento se muestran en la Tabla 31.y Tabla 32.

Para antes de tratamiento de agua

**Tabla 31.** Datos experimentales para determinar OD de agua sin tratar.

	Volumen inicial $Na_2S_2O_3$ (mL)	Volumen final (luego de 5 días) $Na_2S_2O_3$ (mL)
Blanco	6,53	5,14
Muestra (1 mL de muestra)	6,52	4,86

**Fuente:** elaboración propia

Se determina el oxígeno disuelto de la muestra con la Ecuación 30.

**Ecuación 30.** Determinación Oxígeno disuelto para  $DBO_5$ .

$$OD \frac{\text{mg OD}}{\text{L}} = \frac{V_{Na_2S_2O_3} * N_{Na_2S_2O_3} * 8 * 1000 * V_B}{V_{i0} * (V_B - 2)}$$

**Fuente:** INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Demanda Bioquímica de Oxígeno - 5 días en aguas. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Bioqu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/ca6e1594-4217-4aa3-9627-d60e5c077dfa>

Donde,

$V_{Na_2S_2O_3}$ : Volumen de tiosulfato de sodio ( $Na_2S_2O_3$ ) (mL)

$N_{Na_2S_2O_3}$ : Normalidad de tiosulfato de sodio ( $Na_2S_2O_3$ ) (0,025)

8: Peso equivalente del oxígeno

$V_B$ : Volumen de la Botella (mL)

$V_{io}$ : Volumen muestra valorada (mL)

$$ODi \frac{mg OD (Blanco)}{L} = \frac{6,53 mL * 0,025 * 8000 * 300 mL}{200 mL * (300 mL - 2)} = 6,5738 mg/L$$

$$ODi \frac{mg OD (Muestra)}{L} = \frac{6,52 mL * 0,025 * 8000 * 300 mL}{200 mL * (300 mL - 2)} = 6,5637 mg/L$$

$$ODf \frac{mg OD (Blanco)}{L} = \frac{5,14 mL * 0,025 * 8000 * 300 mL}{200 mL * (300 mL - 2)} = 5,1744 mg/L$$

$$ODf \frac{mg OD (Muestra)}{L} = \frac{4,86 mL * 0,025 * 8000 * 300 mL}{200 mL * (300 mL - 2)} = 4,8926 mg/L$$

**Tabla 32.** Valores obtenidos para OD de agua sin tratar.

	Oxígeno disuelto inicial (OD <sub>i</sub> ) (mg/L)	Oxígeno disuelto a los 5 días (OD <sub>f</sub> ) (mg/L)
Blanco	6,5738	5,1744
Muestra (1 mL de muestra)	6,5637	4,8926

**Fuente:** elaboración propia

Se determina en DBO<sub>5</sub> mediante la Ecuación 31.

**Ecuación 31.** Determinación DBO<sub>5</sub>.

$$DBO_5 \frac{mg O_2}{L} = \frac{(OD_i - OD_f) * V}{V_m}$$

**Fuente:** INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Demanda Bioquímica de Oxígeno - 5 días en aguas. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Bioqu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/ca6e1594-4217-4aa3-9627-d60e5c077dfa>

Donde,

$OD_i$ : Oxígeno disuelto inicial

$OD_f$ : Oxígeno disuelto a los 5 días

$V_m$ : Volumen de alícuota

$V$ : Volumen botella Winkler

$$DBO_5 \frac{mgO_2}{L} = \frac{(6,5637mg/L - 4,8926 mg/L)}{1 mL} * 300mL = 501,33 \frac{mgO_2}{L}$$

Para después de tratamiento de agua

Los datos promedio experimentales para determinar  $DBO_5$  del agua con tratamiento se muestran en la Tabla 33 y Tabla 34.

**Tabla 33.** Datos experimentales para determinar OD de agua tratada.

	Volumen inicial $Na_2S_2O_3$ (mL)	Volumen final (luego de 5 días) $Na_2S_2O_3$ (mL)
Blanco	6,43	3,96
Muestra 1 (30 mL de muestra)	6,36	2,12
Muestra 2 (35 mL de muestra)	6,12	0,54

**Fuente:** elaboración propia

$$OD_i \frac{mg OD (Blanco)}{L} = \frac{6,43 mL * 0,025 * 8000 * 300 mL}{200 mL * (300 mL - 2)} = 6,4731 mg/L$$

$$OD_i \frac{mg OD (Muestra1)}{L} = \frac{6,36mL * 0,025 * 8000 * 300 mL}{200 mL * (300 mL - 2)} = 6,4026 mg/L$$

$$OD_i \frac{mg OD (Muestra2)}{L} = \frac{6,12 mL * 0,025 * 8000 * 300 mL}{200 mL * (300 mL - 2)} = 6,1610 mg/L$$

$$OD_f \frac{mg OD (Blanco)}{L} = \frac{3,96 mL * 0,025 * 8000 * 300 mL}{200 mL * (300 mL - 2)} = 3,9865 mg/L$$

$$OD_f \frac{mg OD (Muestra1)}{L} = \frac{2,12 mL * 0,025 * 8000 * 300 mL}{200 mL * (300 mL - 2)} = 2,1342mg/L$$

$$OD_f \frac{mg OD (Muestra2)}{L} = \frac{0,54mL * 0,025 * 8000 * 300 mL}{200 mL * (300 mL - 2)} = 0,5436 mg/L$$

**Tabla 34.** Valores obtenidos para OD de agua tratada.

	Oxígeno disuelto inicial (OD <sub>i</sub> ) (mg/L)	Oxígeno disuelto a los 5 días (OD <sub>t</sub> ) (mg/L)
Blanco	6,4731	3,9865
Muestra 1 (30 mL de muestra)	6,4026	2,1342
Muestra 2 (35 mL de muestra)	6,1610	0,5436

**Fuente:** elaboración propia

$$DBO_5 \frac{mgO_2}{L} = \frac{(6,4026 mg/L - 2,1342 mg/L)}{30 mL} * 300 mL = 0,1422 \frac{mgO_2}{L}$$

$$DBO_5 \frac{mgO_2}{L} = \frac{(6,1610 mg/L - 0,5436 mg/L)}{35 mL} * 300 mL = 0,1604 \frac{mgO_2}{L}$$

$$DBO_5 \frac{mgO_2}{L} \text{ Promedio} = \frac{(0,1422 + 0,1604)}{2} \frac{mgO_2}{L} = 0,1513 \frac{mgO_2}{L}$$

**Figura 58.** Desarrollo experimental DBO<sub>5</sub>.



**Fuente:** elaboración propia

- **Determinación de grasas y aceites, método de extracción de cloroformo** (Figura 59):

Los datos promedio experimentales para determinar grasas y aceites del agua antes y después de tratamiento se muestran en la Tabla 35.

**Tabla 35.** Datos experimentales para determinación grasas y aceites.

	Peso inicial balón aforado (g)	Peso final balón aforado (g)
<b>Agua antes de tratamiento</b>	55,6689	55,7723
<b>Agua después de tratamiento</b>	162,2954	162,3051

**Fuente:** elaboración propia

Se determina la concentración de grasas y aceites en la muestra de agua mediante la Ecuación 32.

**Ecuación 32.** Determinación grasas y aceites.

$$GYA, \frac{mg}{L} = \frac{Pf - Pi}{V} * 10^6$$

**Fuente:** INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES .Determinación de grasas y aceites en aguas por el método soxhlet. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Grasas+y+Aceites+en+agua+por+m%C3%A9todo+Soxhlet..pdf/15096580-8833-415f-80dd-ceaa7888123d>

Donde,

*Pf*: Peso final balón aforado (g)

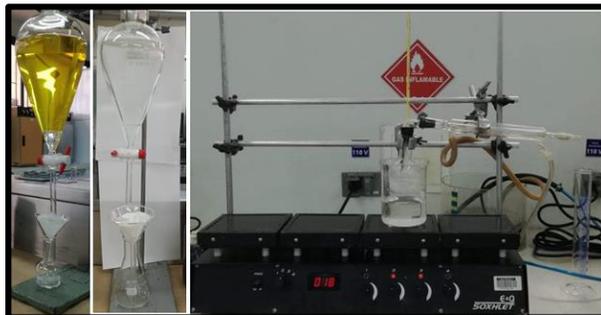
*Pi*: Peso inicial balón aforado (g)

*V*: Volumen de muestra (mL)

$$GYA_{\text{Antes de tratamiento}} \frac{mg}{L} = \frac{55,7723g - 55,6689g}{1000mL} * 10^6 = 103,4 \frac{mg}{L}$$

$$GYA_{\text{Después de tratamiento}} \frac{mg}{L} = \frac{162,3051g - 162,2954g}{1000mL} * 10^6 = 9,7 \frac{mg}{L}$$

**Figura 59.** Desarrollo experimental determinación grasas y aceites.



**Fuente:** elaboración propia

- **pH, por electrometría**

Los datos promedio experimentales para determinar el pH del agua antes y después de tratamiento se muestran en la Tabla 36.

**Tabla 36.** Datos obtenidos para pH.

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>pH antes de tratamiento</b>	12,1	12,12	12,15	12,1
<b>pH después de tratamiento</b>	8,73	8,71	8,65	8,56

**Fuente:** elaboración propia

pH promedio Antes de tratamiento = **12,12**

pH promedio Después de tratamiento = **8,66**

- **Turbiedad por nefelometría** (Figura 60):

Los datos promedio experimentales para determinar la turbiedad del agua antes y después de tratamiento se muestran en la Tabla 37.

**Tabla 37.** Datos obtenidos para turbiedad.

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Antes de tratamiento (NTU)</b>	241	238	210	230
<b>Después de tratamiento (NTU)</b>	0,25	0,23	0,24	0,27

**Fuente:** elaboración propia

Turbiedad promedio Antes de tratamiento = **230 NTU**

Turbiedad promedio Después de tratamiento = **0,25 NTU**

**Figura 60.** Determinación turbiedad.



**Fuente:** elaboración propia

- **Sólidos suspendidos totales secados a 103°C – 105°C**

Los datos promedio experimentales para determinar los sólidos suspendidos del agua antes y después de tratamiento se muestran en la Tabla 38.

**Tabla 38.** Datos experimentales para determinación de sólidos suspendidos totales.

<b>Muestra</b>	<b>Peso inicial capsula (g) (P1)</b>	<b>Peso capsula con residuo seco (g) (P2)</b>
<b>Agua antes de tratamiento</b>	66,0547	66,1763
<b>Agua después de tratamiento</b>	67,8892	67,8894

**Fuente:** elaboración propia

Se determina la cantidad de sólidos sedimentables totales mediante la Ecuación 33.

**Ecuación 33.** Determinación sólidos sedimentables totales.

$$SST = \frac{(P2 - P1) * 1000 * 1000}{V}$$

**Fuente:** INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Sólidos Suspendidos Totales En Agua Secados A 103 – 105 °C. En: IDEAM. [sitio web]. IDEAM. [Consulta 12 septiembre 2018]. Archivo pdf. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Suspendidos+Totales+en+aguas.pdf/f02b4c7f-5b8b-4b0a-803a-1958aac1179c>.

Donde,

*SST*: Sólidos suspendidos totales mg/L

*P2*: Peso final del conjunto (Filtro + cápsula) con el residuo seco, en g.

*P1*: Peso inicial del conjunto (Filtro + cápsula) en g.

*V*: Volumen de muestra filtrada, en mL.

$$SST_{\text{Antes de tratamiento}} = \frac{(66,1763 - 66,0547) * 1000 * 1000}{30} = 4053,33 \text{ ppm}$$

$$SST_{\text{Despues de tratamiento}} = \frac{(67,8894 - 67,8892) * 1000 * 1000}{30} = 6,67 \text{ ppm}$$

- **Sólidos Sedimentables (SSED), Gravimetría**

SSED Agua antes de tratamiento: **9 ppm** (Figura 61)

**Figura 61.** Determinación SSED agua sin tratar.



**Fuente:** elaboración propia

SSED Agua después de tratamiento: **0 ppm** (Figura 62)

**Figura 62.** Determinación SSED agua tratada.



**Fuente:** elaboración propia

- **Densidad de lodo residual** (Figura 63)

Los datos promedio experimentales para determinar la densidad de los lodos obtenidos en el tratamiento se muestran en la Tabla 39.

**Tabla 39.** Datos para determinar la densidad de lodo.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor (g)</b>
Masa 1 picnómetro	38,6022
Masa picnómetro + lodo	38,7947
Masa 2 picnómetro	38,6308
Masa picnómetro + agua	89,4380
Masa picnómetro + agua + lodo	89,4484

**Fuente:** elaboración propia

Para determinar la densidad real del lodo, se utiliza la Ecuación 34.

**Ecuación 34.** Densidad de lodo.

$$D_s = \frac{(M_{pss} - M_{pv_1}) \cdot D_w}{(M_{pw} - M_{pv_2}) - (M_{pssw} - M_{pss})}$$

**Fuente:** GOMEZ, Laura y MERCHÁN, Ángela. Caracterización fisicoquímica de los lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual industrial de una empresa de café del departamento de Caldas .Manizales: Universidad Católica de Manizales. Trabajo de grado Ingeniero Ambiental, 2016. p.101 [Citado el 13 de marzo del 2019]. Disponible en: <http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/handle/10839/1305>

Donde,

$D_s$ : Densidad específica, g/ml

$M_{pss}$ : Masa del picnómetro + lodo seco

$M_{pv}$ : Masa del picnómetro vacío

$D_w$ : Densidad del agua

$M_{pw}$ : Masa del picnómetro + agua

$M_{pssw}$ : Masa del picnómetro + agua + lodo seco

$$D_s = \frac{(38,7947 \text{ g} - 38,6022 \text{ g}) * 1,016 \text{ g/ml}}{(89,4380 \text{ g} - 38,6308 \text{ g}) - (89,4484 \text{ g} - 38,7947 \text{ g})} = 1,27 \text{ g/ml}$$

**Figura 63.** Lodos residuales.



**Fuente:** elaboración propia

## ANEXO J.

### CARACTERIZACIÓN AGUA TRATADA OPCIÓN I Y II.



**L. Q. LABORATORIO QUIMICONTROL LTDA.**  
Ambiente e Industria

**INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO**



**IDEAM**  
INSTITUTO DE HOROLOGIA,  
METEOROLOGIA Y  
ESTUDIOS AMBIENTALES

Laboratorio acreditado  
NTC-ISO/IEC 17025:  
2005. Resolución de  
renovación y extensión  
de acreditación N° 0429  
de 2015. Resoluciones  
de extensión de la  
acreditación N° 0297 de  
2016, 0010 y 1503 de  
2017.

INFORME 3 OCA 1148-AG  
3 de abril de 2019

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE	IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
Señora JESIKA ALEJANDRA PEÑA ANTONIO Teléfono: 3115711570 Dirección: Carrera 7A N° 134B - 50 E-mail: jalejandra1806@gmail.com Bogotá D.C.	ORDEN DE SERVICIO: 7451 FECHA RECEPCIÓN MUESTRA: 23 de marzo de 2019 MATRIZ: AR FECHA DE MUESTREO: 21 de marzo de 2019 TIPO DE MUESTREO: Compuesto PUNTO DE MUESTREO: Alternativa Uso de Hipoclorito IDENTIFICACIÓN MUESTRA: 19-AG1247 OBSERVACIONES: Muestra tomada por el cliente y enviada al laboratorio

Variable	Unidad	Método	Fecha Análisis	Resultados	Incertidumbre
Cadmio total, Cd	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llana	2019-04-01	1,1	±0.0747
Níquel total, Ni	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llana	2019-04-02	0,815	±0.0915

SM: "STANDARD METHODS For The Examination Of Water And Wastewater" 23RD EDITION, 2017. (A.A.): Absorción Atómica. AR: Agua Residual.

NOTA 1: Los resultados que se relacionan en este informe corresponden únicamente a la muestra analizada.  
NOTA 2: La reproducción total o parcial de este informe deberá ser autorizada por el Laboratorio Quimicontrol Ltda.  
NOTA 3: Las muestras serán eliminadas treinta (30) días después de haber sido recibidas.  
NOTA 4: Incertidumbre expandida para un nivel de confianza del 95,45 % con un factor K=2.

Este informe NO es válido para impresión ni almacenamiento sin firma original de las personas autorizadas por el Laboratorio.



**CYNTHIA PAOLA ÁVILA GARAVITO**  
Química, Matricula Profesional PQ-5602  
Coordinadora Técnica

**FIN DEL INFORME**

Elaboró: Johan David Quiroga Alarcón  
Revisó: Nirfa Yiseth Martínez Arevalo

Página 1 de 1 Teléfono: 403 06 13 - 273 84 57. Email: agua@laboratorioquimicontrol.com. Web site: www.laboratorioquimicontrol.com. Dirección: Carrera 78 J # 40 B 52 sur. Bogotá.

**Fuente:** Resultados Laboratorio Quimicontrol



L. Q. LABORATORIO QUIMICONTROL LTDA.  
Ambiente e Industria



INSTITUTO DE HIDROLOGÍA,  
METEOROLOGÍA Y  
ESTUDIOS AMBIENTALES  
Laboratorio acreditado  
NTC-SO/EC 17025:  
2005. Renovación de  
renovación y extensión  
de acreditación N° 0459  
de 2015. Resoluciones  
de extensión de la  
acreditación N° 0057 de  
2016, 0610 y 1503 de  
2017.

**INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO**

INFORME 5 OCA 1148-AG  
3 de abril de 2019

**IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE**

Señora  
JESIKA ALEJANDRA PEÑA ANTONIO  
Teléfono: 3115711570  
Dirección: Carrera 7A N° 134B - 50  
E-mail: jalejandra1806@gmail.com  
Bogotá D.C.

**IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA**

ORDEN DE SERVICIO: 7451  
FECHA RECEPCIÓN MUESTRA: 23 de marzo de 2019  
MATRIZ: AR  
FECHA DE MUESTREO: 21 de marzo de 2019  
TIPO DE MUESTREO: Compuesto  
PUNTO DE MUESTREO: Alternativa Uso de Hipoclorito + Peroxido  
IDENTIFICACIÓN MUESTRA: 19-AG1249  
OBSERVACIONES: Muestra tomada por el cliente y enviada al laboratorio

Variable	Unidad	Método	Fecha Análisis	Resultados	Incertidumbre
Cadmio total, Cd	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2019-04-01	0,277	±0.0188
Niquel total, Ni	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2019-04-02	0,332	±0.0372

SM: "STANDARD METHODS For The Examination Of Water And Wastewater" 23RD EDITION, 2017. (A.A.): Absorción Atómica. AR: Agua Residual.

NOTA 1: Los resultados que se relacionan en este informe corresponden únicamente a la muestra analizada.

NOTA 2: La reproducción total o parcial de este informe deberá ser autorizada por el Laboratorio Quimicontrol Ltda.

NOTA 3: Las muestras serán eliminadas treinta (30) días después de haber sido recibidas.

NOTA 4: Incertidumbre expandida para un nivel de confianza del 95,45 % con un factor K=2.

Este informe NO es válido para impresión ni almacenamiento sin firma original de las personas autorizadas por el Laboratorio.

CYNTHIA PAOLA ÁVILA GARAVITO  
Química, Matricula Profesional PQ-5062  
Coordinadora Técnica

Elaboró: Johan David Quiroga Alarcón  
Revisó: Ninfa Yiseth Martínez Arevalo

**FIN DEL INFORME**

**Fuente: Resultados Laboratorio Quimicontrol**

## ANEXO K.

### PREPARACIÓN DE SOLUCIONES PARA LABORATORIO.

- **Solución de ácido sulfúrico al 5%**

Se determina el volumen de ácido sulfúrico para preparar la solución empleando ácido sulfúrico al 98%, mediante la Ecuación 35.

**Ecuación 35.** Dilución.

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2$$

**Fuente:** elaboración propia

En donde,

- C<sub>1</sub>: Concentración ácido sulfúrico (98%)  
V<sub>1</sub>: Volumen ácido sulfúrico al 98%  
C<sub>2</sub>: Concentración ácido sulfúrico (5%)  
V<sub>2</sub>: Volumen ácido sulfúrico al 5%

$$V_1 = \frac{5\% * 250ml}{98\%} = 12,75 \text{ ml}$$

De tal modo que, se agregan 12,75 ml de ácido sulfúrico (98%) en 250 ml de agua destilada.

- **Solución de hipoclorito de calcio**

Se determina la cantidad de hipoclorito de calcio para preparar una solución al 12,5% de la siguiente manera

$$12,5\% * \frac{50 \text{ g}}{70\%} = 8,93 \text{ g Ca(ClO)}_2$$

Se calcula la cantidad de hipoclorito de calcio al 12,5% p/p que se adiciona a una muestra de 1.000 ml, sabiendo que la relación corresponde a 5kg/ kg CN<sup>-</sup>, además de que la concentración inicial en el agua residual de cianuro es 7,53 ppm, como se muestra a continuación:

$$1L * \frac{7,53 \text{ mg CN}^-}{L} * \frac{1 \text{ g}}{1000\text{mg}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000\text{g}} * \frac{5 \text{ kg Ca(ClO)}_2}{1 \text{ kg CN}^-} * \frac{50 \text{ ml}}{0,00893 \text{ kg Ca(ClO)}_2} = 0,211\text{ml Ca(ClO)}_2$$

Se agrega inicialmente el 75% de la cantidad de hipoclorito de calcio y peróxido de hidrógeno en la oxidación de cianuro, es decir, que para hipoclorito de calcio corresponde a

$$75\% * \frac{0,211 \text{ ml } Ca(ClO)_2}{100\%} = 0,158 \text{ ml } Ca(ClO)_2$$

- **Solución de peróxido de hidrógeno**

Se calcula la cantidad de peróxido de hidrógeno al 30% que se adiciona a una muestra de 1.000 ml, sabiendo que la relación corresponde a 2,5 kg/ kg CN<sup>-</sup>, además de que la concentración inicial en el agua residual de cianuro es 7,53 ppm, como se muestra a continuación:

$$1L * \frac{7,53 \text{ mg } CN^-}{L} * \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} * \frac{2,5 \text{ kg } H_2O_2}{1 \text{ kg } CN^-} * \frac{100 \text{ ml}}{0,03 \text{ kg } H_2O_2} = 0,0627 \text{ ml } H_2O_2$$

Se agrega inicialmente el 75% de la cantidad de hipoclorito de calcio y peróxido de hidrógeno en la oxidación de cianuro, es decir, que para peróxido de hidrógeno corresponde a 0,0225 ml como se expone a continuación.

$$75\% * \frac{0,0627 \text{ ml } H_2O_2}{100\%} = 0,0225 \text{ ml } H_2O_2$$

- **Solución de metabisulfito de sodio al 5%**

Para establecer la cantidad de metabisulfito de sodio para preparar la solución de 250 ml se realiza de la siguiente manera:

$$5\% * \frac{250 \text{ g}}{96\%} = 13 \text{ g } Na_2S_2O_5$$

- **Solución de hidróxido de sodio al 5%**

Se determina la cantidad de hidróxido de sodio que se debe emplear para preparar la solución empleando hidróxido de sodio al 98%.

$$5\% * \frac{250 \text{ g}}{98\%} = 12,75 \text{ g } NaOH$$

- **Preparación de floculante al 0.1% p/p**

Se utiliza floculante polimérico aniónico en solución al 0,1%, para establecer la cantidad requerida para un volumen de 150 ml, se determina de la siguiente manera:

$$0,1\% * \frac{150 \text{ g}}{100\%} = 0,15 \text{ g}$$

## ANEXO L.

### ÍNDICE WILLCOMB Y DATOS OBTENIDOS PARA FLOCULACIÓN.

En la Figura 64 se observa el índice de Willcomb

**Figura 64.** Índice de floculación Willcomb.

Número del índice	Descripción
0	Flóculo coloidal. Ningún signo de aglutinación
2	Visible. Flóculo muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado.
4	Disperso. Flóculo bien formado pero uniformemente distribuido. (Sedimenta muy lentamente o no sedimenta)
6	Claro. Flóculo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.
8	Bueno. Flóculo que se deposita fácil pero no completamente.
10	Excelente. Flóculo que se deposita completamente, dejando el agua cristalina.

**Fuente:** PACHECO, Rosario. Determinación de la dosificación óptima de coagulantes y floculante aplicados a un sistema continuo por flotación en el tratamiento de efluentes pesqueros. Perú: Universidad nacional de San Agustín. Título de Ingeniería Química, 2014. p.58. [Citado el 20 de abril del 2019]. Disponible en: <https://docplayer.es/91583903-Universidad-nacional-de-san-agustin-facultad-de-ingenieria-de-procesos.html>

En la Tabla 40 se muestra la turbidez del agua con la adición del floculante en diferentes tiempos de dosificación, estos datos permiten determinar el % del floc removido mediante la Ecuación 36.

**Tabla 40.** Turbidez promedio en tiempos de sedimentación para diferentes dosificaciones de floculante.

Turbidez NTU				
Tiempo sedimentación (min)	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4
5	1,22	0,88	0,48	0,97
15	0,96	0,8	0,46	0,92
30	0,91	0,73	0,42	0,84
45	0,88	0,71	0,41	0,82
60	0,85	0,7	0,37	0,82

**Fuente:** elaboración propia

**Ecuación 36.** % de floc removido.

$$\% \text{ Floc removido} = \left(1 - \frac{N_t}{N_0}\right) * 100$$

**Fuente:** ARBOLEDA, Jorge. Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación de agua. [En línea].CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente), 1972. [Citado el 11 de abril de 2019]. Disponible en: <https://www.ircwash.org/sites/default/files/250-73TE.pdf>

$N_t$ : Turbiedad del agua en el momento  $t$

$N_0$ : Turbiedad del agua cruda

## ANEXO M. CARACTERIZACIÓN AGUA TRATADA.



**L. Q. LABORATORIO QUIMICONTROL LTDA.**  
Ambiente e Industria

**INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO**



**IDEAM**  
INSTITUTO DE HIDROLOGÍA,  
METEOROLOGÍA Y  
ESTUDIOS AMBIENTALES  
Laboratorio acreditado  
NTC-ISO/IEC 17025:  
2005 Resolución de  
renovación y extensión  
de acreditación N° 0459  
de 2015 Resoluciones  
de extensión de la  
acreditación N° 0097 de  
2016, 0010 y 1503 de  
2017.

INFORME 2 OCA 1148-AG  
4 de abril de 2019

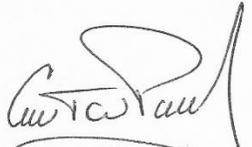
IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE	IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA
Señora	ORDEN DE SERVICIO: 7451
JESIKA ALEJANDRA PEÑA ANTONIO	FECHA RECEPCIÓN MUESTRA: 23 de marzo de 2019
Teléfono: 3115711570	MATRIZ: AR
Dirección: Carrera 7A N° 134B - 50	FECHA DE MUESTREO: 21 de marzo de 2019
E-mail: jalejandra1806@gmail.com	TIPO DE MUESTREO: Compuesto
Bogotá D.C.	PUNTO DE MUESTREO: Alternativa de Tratamiento Seleccionada
	IDENTIFICACIÓN MUESTRA: 19-AG1246
	OBSERVACIONES: Muestra tomada por el cliente y enviada al laboratorio

Variable	Unidad	Método	Fecha Análisis	Resultados	Incertidumbre
Cadmio total, Cd	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2019-04-01	0,017	±0.0011
Fenoles	mg/L	SM 5530 B, C, Destilación - Extracción con cloroformo	2019-03-30	< 0,049	±0.0022
Cianuro total, CN <sup>-</sup>	mg/L	SM 4500-CN <sup>-</sup> C, F, Electrodo selectivo de cianuro	2019-03-26	< 0,427	±0.042
Mercurio total, Hg	mg/L	2. SM 3112 B, A.A. Vapor frío	2019-04-03	0,0024	±0.0003
Plata total, Ag	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2019-04-03	0,029	±0.0016
Niquel total, Ni	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2019-04-02	0,063	±0.0071
Plomo total, Pb	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2019-04-01	0,046	±0.0077
Cromo total, Cr	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2019-04-01	0,064	±0.0037

SM: "STANDARD METHODS For The Examination Of Water And Wastewater" 23RD EDITION, 2017. (A.A.): Absorción Atómica. (<): Menor que límite de cuantificación del método. AR: Agua Residual.

NOTA 1: Los resultados que se relacionan en este informe corresponden únicamente a la muestra analizada.  
 NOTA 2: La reproducción total o parcial de este informe deberá ser autorizada por el Laboratorio Quimicontrol Ltda.  
 NOTA 3: Las muestras serán eliminadas treinta (30) días después de haber sido recibidas.  
 NOTA 4: Incertidumbre expandida para un nivel de confianza del 95,45 % con un factor K=2.

Este informe NO es válido para impresión ni almacenamiento sin firma original de las personas autorizadas por el Laboratorio.



**CYNTHIA PAOLA ÁVILA GARAVITO**  
Química, Matricula Profesional PQ-5002  
Coordinadora Técnica

**FIN DEL INFORME**

Elaboró: Johan David Quiroga Alarcón  
Revisó: Ninfa Yiseth Martínez Arevalo

Página 1 de 1 Teléfonos: 403 06 13 - 273 84 57. Email: agua@laboratorioquimicontrol.com. Web site: www.laboratorioquimicontrol.com. Dirección: Carrera 78 J # 40 B 52 sur. Bogotá.

**Fuente:** Resultados Laboratorio Quimicontrol

## ANEXO N.

### CANTIDAD DE PRODUCTOS QUÍMICOS EN PLANTA.

#### Cantidad de ácido sulfúrico al 98%

Se determina la cantidad de ácido sulfúrico necesario para el tratamiento de 5.000 L, por lo cual se establece la concentración inicial de este en la muestra de agua de 1.000 ml mediante la Ecuación 35.

- **Ajuste de pH para oxidación de cianuro**

En el desarrollo experimental se adiciono 5 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 5% v/v (50.000 ppm) a una muestra del 1.000 ml

$$C_2 = \frac{50.000 \text{ ppm} * 5 \text{ ml}}{1.000 \text{ ml}} = 250 \text{ ppm} = 250 \text{ mg/L}$$

Por tanto, la cantidad de ácido sulfúrico al 98% (980.000 ppm) necesario para ajustar el pH para la oxidación de cianuro, se muestra a continuación

$$V_1 = \frac{250 \text{ ppm} * 5.000 \text{ L}}{980.000 \text{ ppm}} = 1,28 \text{ L de H}_2\text{SO}_4(98\%)$$

- **Ajuste de pH para reducción de cromo**

Dado que en el desarrollo experimental se agregó 8,5 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 5% v/v (50.000 ppm) a una muestra de 1.000 ml

$$C_2 = \frac{50.000 \text{ ppm} * 8,5 \text{ ml}}{1.000 \text{ ml}} = 425 \text{ ppm} = 425 \text{ mg/L}$$

Por tanto, la cantidad de ácido sulfúrico al 98% (980.000 ppm) necesario para ajustar el pH para la reducción de cromo, se muestra a continuación

$$V_1 = \frac{425 \text{ ppm} * 5.000 \text{ L}}{980.000 \text{ ppm}} = 2,17 \text{ L de H}_2\text{SO}_4(98\%)$$

- **Ajuste de pH para cumplimiento de norma**

Teniendo en cuenta que en el desarrollo experimental se agregó 0,3 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 5% v/v (50.000 ppm) a una muestra de 1.000 ml.

$$C_2 = \frac{50.000 \text{ ppm} * 0,3 \text{ ml}}{1.000 \text{ ml}} = 15 \text{ ppm} = 15 \text{ mg/L}$$

Por tanto, la cantidad de ácido sulfúrico al 98% (980.000 ppm) necesario para ajustar el pH para cumplimiento de norma, se muestra a continuación

$$V_1 = \frac{15 \text{ ppm} * 5.000 \text{ L}}{980.000 \text{ ppm}} = 0,077 \text{ L de } H_2SO_4(98\%)$$

Es decir que la cantidad total de ácido sulfúrico requerida para el tratamiento corresponde a 3,527 L.

### **Cantidad de hidróxido de sodio al 98%**

Se calcula la cantidad de hidróxido de sodio necesario para 5.000 L de agua a tratar, por lo cual se establece la concentración inicial de este en la muestra de agua de 1.000 ml mediante la Ecuación 35.

- **Ajuste de pH para precipitación de cromo**

En el desarrollo experimental se adiciono 7,8 ml de NaOH al 5% p/p (50.000 ppm) a una muestra de 1.000 ml

$$C_2 = \frac{50.000 \text{ ppm} * 7,8 \text{ ml}}{1.000 \text{ ml}} = 390 \text{ ppm} = 390 \text{ mg/L}$$

Por tanto, la cantidad de NaOH al 98% (980.000 ppm) necesario para ajustar el pH para la precipitación de cromo, se muestra a continuación

$$5.000 \text{ L} * 390 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1 \text{ g}}{1.000 \text{ mg}} * \frac{1 \text{ kg}}{1.000 \text{ g}} = 1,95 \text{ kg de NaOH (98\%)}$$

- **Ajuste de pH para precipitación de metales pesados**

Teniendo en cuenta el desarrollo experimental se adiciono 1,5 ml de NaOH al 5% v/v (50.000 ppm) a una muestra de 1.000 ml

$$C_2 = \frac{50.000 \text{ ppm} * 1,5 \text{ ml}}{1.000 \text{ ml}} = 75 \text{ ppm} = 75 \text{ mg/L}$$

Por tanto, la cantidad de NaOH al 98% (980.000 ppm) necesario para ajustar el pH para la precipitación de metales pesados, se muestra a continuación

$$5.000 \text{ L} * 75 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1 \text{ g}}{1.000 \text{ mg}} * \frac{1 \text{ kg}}{1.000 \text{ g}} = 0,375 \text{ kg de NaOH (98\%)}$$

Es decir que la cantidad total de hidróxido de sodio requerida para el tratamiento corresponde a 2,325 kg.

### Cantidad de hipoclorito de calcio al 12,5%

Se determina la cantidad de  $\text{Ca}(\text{ClO})_2$  necesario para 5.000 L de agua a tratar de la siguiente manera

$$5.000L * \frac{7,53 \text{ mg } \text{CN}^-}{L} * \frac{1 \text{ g}}{1.000 \text{ mg}} * \frac{5 \text{ g } \text{Ca}(\text{ClO})_2}{1 \text{ g } \text{CN}^-} * \frac{50 \text{ ml}}{8,93 \text{ g } \text{Ca}(\text{ClO})_2} * \frac{1 \text{ L}}{1.000 \text{ ml}} \\ = 1,054 \text{ L } \text{Ca}(\text{ClO})_2$$

Como el  $\text{Ca}(\text{ClO})_2$  se encuentra comercialmente por kilogramos al 70%, se determina la cantidad necesaria de este para preparar una solución de 1,054 L al 12,5%, como se observa a continuación

$$12,5\% * \frac{1,054 \text{ kg}}{70\%} = 0,188 \text{ kg}$$

Es decir que se requieren de 0,188 kg de  $\text{Ca}(\text{ClO})_2$  al 70% para el tratamiento de agua.

### Cantidad de peróxido de hidrógeno al 50%

Se calcula el volumen de  $\text{H}_2\text{O}_2$  necesario para 5.000 L de agua a tratar de la siguiente manera

$$5.000L * \frac{7,53 \text{ mg } \text{CN}^-}{L} * \frac{1 \text{ g}}{1.000 \text{ mg}} * \frac{2,5 \text{ g } \text{H}_2\text{O}_2}{1 \text{ g } \text{CN}^-} * \frac{100 \text{ ml}}{50 \text{ g } \text{H}_2\text{O}_2} * \frac{1L}{1.000 \text{ ml}} = 0,188 \text{ L } \text{H}_2\text{O}_2$$

Es decir que se requieren de 0,188 L de  $\text{H}_2\text{O}_2$  para el tratamiento de agua.

### Cantidad de metabisulfito de sodio al 50%

Se determina la cantidad de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  necesario para 5.000 L de agua a tratar, por lo cual se establece la concentración inicial de este en la muestra de agua de 1.000 ml mediante la Ecuación 35. Dado que en el desarrollo experimental se adiciono 4 ml de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 5% p/p (50.000 ppm) a una muestra de 1.000 ml

$$C_2 = \frac{50.000 \text{ ppm} * 4 \text{ ml}}{1.000 \text{ ml}} = 200 \text{ ppm} = 200 \text{ mg/L}$$

Por tanto, la cantidad de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  al 96% (960.000 ppm) necesario para ajustar el pH para la reducción de cromo hexavalente a cromo trivalente, se muestra a continuación

$$5.000 \text{ L} * 200 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1 \text{ g}}{1.000 \text{ mg}} * \frac{1 \text{ kg}}{1.000 \text{ g}} = 1 \text{ kg de } \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5 \text{ (98\%)}$$

Es decir que se requieren de 1 kg de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  para el tratamiento de agua.

### **Cantidad de polímero aniónico al 0,1%**

Se calcula la cantidad del polímero aniónico necesario para 5.000 L de agua a tratar, por lo cual se establece la concentración inicial de este en la muestra de agua de 1.000 ml mediante la Ecuación 35. Dado que en el desarrollo experimental se adiciono 5 ml de polímero aniónico al 0,1% p/p (1.000 ppm) a una muestra de 1.000 ml

$$C_2 = \frac{1.000 \text{ ppm} * 5 \text{ ml}}{1.000 \text{ ml}} = 5 \text{ ppm} = 5 \text{ mg/L}$$

Por tanto, la cantidad de polímero aniónico, necesario para ajustar el pH para la reducción de cromo hexavalente a cromo trivalente, se muestra a continuación

$$5.000 \text{ L} * 5 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1 \text{ g}}{1.000 \text{ mg}} * \frac{1 \text{ kg}}{1.000 \text{ g}} = 0,025 \text{ kg de polimero anionico}$$

Es decir que se requieren de 0,025 kg de polímero aniónico para el tratamiento de agua.

### **Cantidad de agua para soluciones**

Se determina la cantidad de agua destilada requerida para las soluciones de los reactivos, de la siguiente manera

- **Hipoclorito de calcio**

Para realizar una solución de 1,054 L de hipoclorito de calcio (12,5%), se requiere de 1,054 L de agua destilada.

- **Polímero aniónico**

Para realizar una solución de polímero aniónico (0,1%), con 0,025 kg del mismo, se determinar la cantidad de agua destilada de la siguiente forma

$$100\% * \frac{0,025 \text{ kg}}{0,1\%} = 25 \text{ L de agua destilada}$$

Por tanto, el total de agua destilada que se requiere para preparar las soluciones por tratamiento es de 26,054 L.

- **Metabisulfito de sodio**

Para realizar una solución de metabisulfito de sodio al 50%, se determina la cantidad de agua destilada de la siguiente forma.

$$96\% * \frac{1 \text{ kg}}{50\%} = 1,92 \text{ L de agua destilada}$$

- **Hidróxido de sodio**

Para realizar una solución de hidróxido de sodio al 98%, se determina la cantidad de agua destilada de la siguiente forma.

$$98\% * \frac{2,325 \text{ kg}}{98\%} = 2,325 \text{ L de agua destilada}$$

### **Cantidad de arena y grava para filtros**

- **Arena**

Para determinar la cantidad de arena para el filtro se tiene en cuenta la densidad de la arena ( $\rho=1576 \text{ kg/m}^3$ ) y la Ecuación 37.

**Ecuación 37.** Densidad.

$$m = \rho * V$$

**Fuente:** elaboración propia

Donde,

$m$ : Masa de arena

$\rho$ : Densidad de arena

$V$ : Volumen del medio filtrante

$$m = 1576 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,119\text{m}^3 = 187,54 \text{ kg}$$

- **Grava**

Para determinar la cantidad de grava para el filtro se tiene en cuenta la densidad de la grava ( $\rho=1500 \text{ kg/m}^3$ ) y la Ecuación 37.

Donde,

$m$ : Masa de grava

$\rho$ : Densidad de grava

$V$ : Volumen del medio filtrante

$$m = 1500 \frac{kg}{m^3} * 0,119m^3 = 178,5 kg$$

## ANEXO O.

### COTIZACIONES DE EQUIPOS, MATERIAS PRIMAS, SERVICIOS PÚBLICOS Y TRATAMIENTO DE LODOS.



Bogotá, D.C., Abril 03 de 2019

Señores  
**JESIKA ALEJANDRA PEÑA ANTONIO**  
Ciudad

REF N.00253-19

Respetados Señores:

Por medio de la presente nos permitimos cotizar que los siguientes productos:

PRODUCTO	PRESENTACIÓN	PRECIO X KILO
SODA CAUSTICA EN ESCAMAS	Saco x 25 kilos	\$ 4.100.00
PEROXIDO DE HIDROGENO 50 %	Garrafa x 35 kilos	\$ 3.800.00
HIPOCLORITO DE CALCIO 70 %	Tambor x 40 / 45 Kilos	\$ 8.200.00
FLOCULANTE ANIONICO	Saco x 25 kilos	\$ 35.000.00
GRAVA PARA FILTROS	Saco x 25 kilos	\$ 900.00
ARENA PARA FILTROS	Saco x 25 kilos	\$ 500.00

Los anteriores productos causan 19 % de IVA

**Nota: para el despacho de la soda requerimos el permiso del ministerio de Justicia y del Derecho, según resolución 001 del 2015**

Forma de pago: Transferencia anticipada.

Cuenta corriente número 2392-258523-5 Bancolombia a nombre de DISTRIBUIDORA ALIADOS LTDA.

Esperamos que las condiciones comerciales les sean favorables y nos permitan contar con ustedes como uno de nuestros mejores clientes.

Cordialmente,

**HELENA DE QUEVEDO**

**Fuente:** Distribuidora Aliados LTDA.



Bogotá, Abril 11 de 2.019

Señores

COTIZACIÓN ·113 0419

**Paula Andrea Martinez**

Ciudad

**MOTOBOMBA DOSIFICADORA CHEM FEED** Caudal: 8 Ltsl/H y 45 PSI  
Calibracion mecánica-Voltaje 110 voltios. Succion y descarga 1/4"

**BOMBA**

<b>Tipo</b> : DOSIFICADORA	<b>Tipo</b> : Diafragma
<b>Marca</b> : BLUE WHITE-	<b>Regulación</b> : MECANICA
<b>Modelo</b> : CP-63	<b>Fases</b> : Monofasico
<b>Construcción</b> : Polipropileno-Teflon	<b>Voltaje</b> : 110 Voltios V
<b>Caudal</b> : 8 Lts/Hora	<b>Líquido</b> :Clarificante y/o
<b>Presión</b> : 45 PSI ( 3 Bar)	<b>Floculante,Cloro</b>
<b>Diám. Succión</b> : 1/4 " rosca NPT	<b>Diám Desc</b> :1/4 NPT
<b>Incluye</b> : Accesorios de succion	

**Precio Unitario \$ 1.100.000** Mas IVA 19%

**COMERCIALIZADORA AGROINDUSTRIAL GOMEZ & CIA LTDA**

**NIT; 830.062.689-0 Calle 13 N° 30-90 tel 2776709/ 2775593**

**CUENTA CORRIENTE BANCO DE BOGOTA N° 028283315**

**Fuente: Distribuidora Aliados LTDA.**



**COLEMPAQUES S.A.S**  
NIT. 860.037.111:  
KM. 13 VIA MOSQUERA  
TELS.: 631 2222 - 326 4111  
**MOSQUERA - CUNDINAMARCA**

RÉGIMEN COMÚN  
ACTIVIDAD ECONÓMICA 2229  
NO SOMOS GRANDES  
CONTRIBUYENTES

**COTIZACIÓN: 14344**

Fecha  
Cotización  
29-Apr-2019

Respetados Señores(as):

SOMOS AUTORRETENEDORES EN RENTA,  
según Resolución DIAN 3040 de 4-may-2018

**PAULA ANDREA MARTINEZ**

Atn Sr.(a)

**PAULA ANDREA MARTINEZ**

**TELÉFONO:**

**NIT:**

**DIRECCIÓN DE DESPACHO - CIUDAD -  
DEPARTAMENTO:**

**Bogotá**

En atención a su amable solicitud, COLEMPAQUES SAS, tiene el gusto de cotizar lo siguiente:

No	Cod. Ref	Descripción	Cantidad	Precio Unidad	Valor Dctos	SubTotal	Valor Iva	Precio Total
1	3103	TQ.AG C CN 250 L Tp.AC N	2	\$ 122,600	\$ 36,780	\$ 208,420	\$ 39,600	\$ 248,019
2	3105	TQ.AG C CN 500 L Tp.AC N	1	\$ 219,400	\$ 32,910	\$ 186,490	\$ 35,433	\$ 221,923

**OBSERVACIONES**

1. Validez de la oferta 20 días
2. Entrega: Bogotá
3. Tiempo de entrega: 4 - 8 días hábiles.

**SUBTOTAL** \$ 394,910

**TOTAL FLETES**

**IVA** \$ 75,033

**TOTAL** \$ 469,943

Favor Girar cheque cruzado a nombre de **COLEMPAQUES SAS**. Consignar y/o realizar transferencia en la Cuenta Corriente (Convenio Empresarial) No. 4701-6998-5962 de **DAVIVIENDA** a nombre de **COLEMPAQUES SAS**. En la Referencia 1 escribir el NIT del **CLIENTE**, (o Cédula cuando es persona natural).

**POR FAVOR NO EFECTUAR RETENCION SOBRE ICA** debido a que la empresa está dedicada a una Actividad Industrial en el Municipio de **MOSQUERA** (Cundinamarca), en concordancia con la **LEY 48 de Dic.1990 (CONGRESO DE COLOMBIA, CAPITULO XII FISCOS REGIONALES, Art. 77).**

Cordialmente:  
**MURCIA CASTANEDA JUAN GABRIEL**

**CONDICIÓN DE PAGO  
CONTADO ANTICIPADO**

**DESCUENTO**

Identificación: 79790009

\* El IVA en este formato es informativo.  
Los impuestos se causarán únicamente cuando se haga la correspondiente Factura.

**Fuente: Colempaques.**

Para: FUERZA AREA DE COLOMBIA

COTIZACION No. CA-106-19

Atn.: Ing. Jesika Peña

Ciudad: Bogotá

Tel: +

Cel: 3115711570

Fecha: Mayo 02 de 2019

Email: [jesika.pena@estudiantes.uamerica.edu.co](mailto:jesika.pena@estudiantes.uamerica.edu.co)

Ref.:

ASUNTO: COTIZACIÓN POR PROPELAS PARA AGITADORES MECÁNICOS MARCA NOVATEC FS ®

CANT	DESCRIPCION	VR UNIT.	VR TOTAL
1	<p><b>AGITADOR MECÁNICO VERTICAL</b>  <b>Marca:</b> NOVATEC FS  <b>MODELO:</b> V3BK-26H120V                      Tipo de montaje: Vertical Central                      Propelas: Dos (2) Curva Tripala 1000 mm                      Longitud máx. del eje: 2600 mm</p> <p><b>Motor:</b>                      Tipo de motor: Motoreductor Eléctrico, 3F, 440V, 60Hz, IP55, Clase F                      Potencia del motor: 3.0 kW</p> <p><b>Caja reductora:</b>                      Tipo: Engranajes Helicoidales                      Factor de Servicio: Mayor 2</p> <p><b>Otros:</b>                      Material partes: Eje y propela: 304 SS                      Conexión: Platina cuadrada 300 mm                      Material pletina: Acero Galvanizado                      Linterna: NO                      Caudal: 3050 m<sup>3</sup>/h                      Índice de agitación: global 7.6</p>	\$18.760.000.00	\$18.760.000.00
			Precios EXWORK Cali- Colombia.
1	<p><b>PULSADOR CON VARIADOR DE VELOCIDAD</b>                      Para cambiar la velocidad del agitador entre 40 y 120 rpm</p>	\$2.120.000.00	\$2.120.000.00

Cordialmente

**Oscar Goyes**

Ingeniero de proyectos

E-mail: [ogoyes@novatecfs.com](mailto:ogoyes@novatecfs.com)

FILE: VENTAS 2019 / COTIZACIONES 2019 / CA-106-2019

TE INVITAMOS A VISITAR NUESTRA WEBSITE: [www.novatecfs.com](http://www.novatecfs.com)



[www.novatecfs.com](http://www.novatecfs.com) • [novatec@novatecfs.com](mailto:novatec@novatecfs.com)

Sigue a @NovatecFS   

Cali, Colombia. • Of. Principal: Calle 69 No. 7D-Bis 15 - PBX: (57-2) 418 4006 - Fax: (57-2) 656 0052.  
 Bogotá D.C., Colombia Cra. 14 No. 76-25 Edificio Centro Ejecutivo 76 Oficina 501 - PBX: (57-1) 743 2303

Fuente: Novatec

EMPRESAS MUNICIPALES DE CALI E.I.C.E. E.S.P. Nit: 890.399.003-4  
 MINISTERIO DE DEFENSA NACIONAL SEDE FUERZA AEREA MADRID  
 C.C.Nit: 899999003-1  
 CR 9 1-21 CASA 01  
 MADRID

Esta es tu factura

CONTRATO **1458587**  
**TOTAL A PAGAR \$55,047,124**  
 FECHA DE VENCIMIENTO **Abril 30 - 2019**  
 FECHA DE EXPEDICION

Ruta 64002 790  
 Ciclo 54  
 Mes Cuenta Abril. 2019  
 Período Facturación MAR 01 a MAR 31  
 Días Facturados 31  
 Estado de Cuenta No. 262430430

No. Pago  
 Electrónico  
**221081962**

ENERGIA		Consumos Anteriores (MWh)		CONCEPTOS	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total	Subsid/Contrib	Total a Pagar
Dir Instalación	CR 9 1-21 CASA 01	SEP	131.3						
Uso	OFICIAL	OCT	146.7	Comercialización	148,769.46	7.38	1,098,050.16		1,098,050.16
Período Facturación	MAR 01 a MAR 31	NOV	146.7	Uso STN	148,769.46	35.55	5,288,801.47		5,288,801.47
Días Facturados	31	DIC	136.1	Uso SDL	148,769.46	65.58	9,755,839.65		9,755,839.65
Consumo de energía activa		ENE	134.2	Pérdidas Generación	148,769.46	10.93	1,625,931.94		1,625,931.94
No. Medidor M1		FEB	133.2	Pérdidas STN	148,769.46	1.18	175,400.90		175,400.90
MEDI_MEM_ELGAMA_488905		PROM	141	Restricciones	148,769.46	11.53	1,715,743.31		1,715,743.31
Consumo Actual	148,769 KWH			CND	148,769.46	.90	133,311.70		133,311.70
				ASIS	148,769.46	.30	44,385.70		44,385.70
				SSPD	148,769.46	.27	40,637.00		40,637.00
				CREG	148,769.46	.21	31,395.15		31,395.15
				VRL ENERGIA REACTIVA					
				(-)Ajuste al Peso	78.76	65.58	5,164.71		5,164.71
									.56
				<b>TOTAL</b>					<b>\$55,047,124.00</b>
Consumo de energía reactiva		Consumos Anteriores (Kvr)							
No. Medidor M2		SEP	377.3						
MEDI_MEM_ELGAMA_488905		OCT	310.2						
Reactiva a Facturar	79 KVR	NOV	2119.6						
		DIC	4402.5						
		ENE	2292.7						
		FEB	134.0						
		PROM	1748						
Propiedad Transformador									
Capacidad Instalada	0								
Nivel Tensión	3								
Operador de Red	EMCALI EICE ESP								
Teléfono Operador de Red	177								
Círculo									
Grupo									
NIU									
				INDICADORES TRIMESTRE 2 - 2019					
				Mes 1 Mes 2 Mes 3 Trimestre					
				Duración Interrupciones (Hrs)					
				0.00 0.00 0.00 0.00					
				CRO-m1 (\$/KWh)					
				0.00					
				CMP (KWh)					
				0.00					
				Valor a Compensar (\$)					
				0.00					

**ULTIMO PAGO**  
 Realizado el 2019-03-30  
 Por valor de \$50,095,749.00  
 Recibido en Banco de bogotás  
 Interés de mora 2.15 %

**TOTAL A PAGAR ESTE MES**  
 Total Servicios Emcali 55,047,124.00  
 + IVA .00  
 Valor Total 55,047,124.00  
**TOTAL A PAGAR \$55,047,124**

Fuente: Empresas Municipales de Cali.



AMBIENTE & SOLUCIONES S.A.S.

Bogotá, octubre 18 de 2018

SEÑORES  
 MINISTERIO DE DEFENSA NACIONAL-FUERZA AEREA COLOMBIANA- COMANDO AEREO  
 DE MANTENIMIENTO  
 Carrera 5 N° 2-91 Sur  
 Madrid, Cundinamarca

Ref: Solicitud de cotización para la prestación del servicio de recolección de residuos para el Comando Aéreo de Mantenimiento

A continuación, Ambiente y Soluciones S.A.S presenta cotización para el objeto a contratar, de acuerdo a solicitud:

**COSTOS DE TRANSPORTE + GESTIÓN REALIZADA**

DESCRIPCIÓN	UND.	CANT	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Lodos contaminados	Kg	1	\$3.500	\$3.500

Cordial Saludo,

  
**FREDY ANDRES BULLA ORJUELA**  
 Director de Operaciones

Bogotá, D.C. - Colombia Carrera 67 N° 10 - 82 oficina 301 / Teléfono 3002766 - 3002767 / Comercial1@ambientesoluciones.com.co  
[www.ambientesoluciones.com.co](http://www.ambientesoluciones.com.co)

Fuente: Ambiente & Soluciones S.A.S.



FACTURA  
1338785

DATOS USUARIO		FECHA DE EXPEDICIÓN:	
NOMBRE:	AEREO DE MANTENIMIENTO CAMAN COMANDO	21/12/2018	
DIRECCIÓN:	CR 5 2 91 SUR	PERIODO FACTURADO:	Entre 16-Oct-2018 y 10-Dic-2018
COD RUTA:	0214211000000	PERIODOS ATRASO:	0
USO:	OFICIAL GP	No MEDIDOR:	05019305
ESTRATO:	UNICO	FECHA DE INSTALACIÓN:	23/01/2006

LIQUIDACIÓN ACUEDUCTO					
Concepto	Consumo	Costo Ref	Tarifa aplicada	Sub/Contrib	% VALOR A PAGAR
Consumo básico	22	2,890	58,518	0	0
Consumo complement	22	2,890	58,518	0	0
Consumo sanitario	92	2,890	244,714	0	0
Carga fija					244,714
-DICAPES		0,204		0	0
-DESCONL					0
-DISRES, al					0
<b>SUBTOTAL ACUEDUCTO:</b>					<b>374,044</b>

LIQUIDACIÓN ALCANTARILLADO					
Concepto	Consumo	Costo Ref	Tarifa aplicada	Sub/Contrib	% VALOR A PAGAR
Vertimiento básico	22	1,118	24,567	0	0
Vertimiento complem	22	1,118	24,567	0	0
Vertimiento sanitario	92	1,118	102,891	0	0
Carga fija					102,891
-DIORe, al					0
<b>SUBTOTAL ALCANTARILLADO:</b>					<b>158,193</b>

LIQUIDACIÓN ASEO		
Costo Eje Total CFT:	Costo Variable No Aprovechable CVM:	Valor Base Aprovechamiento VBA:
133900	133900	133900
Contribución	Recolecta y transporte	Aprovechamiento
Limpiadora	Limpiadora	Valor Aseo
851	248940	248940
Servicio y limpieza	Tratamiento de residuos	Subsidio - Contribución
V. CONTRAL	VSB:	0% CFT
D. TOPRU	0	SUBTOTAL ASEO:
0	Historico de Vigencias Cobradas	7,683,550
Revisión y limpieza	Tarifadas por Suscriptor	Rechazo del Aprovechamiento
Exoneración	Limpiadora (VSB)	No aprovechables Alforjas
0	No Aprovechables	No aprovechables Alforjas

CONCEPTOS	CONSUMO	CONSUMO DIA	VALOR DIA
ACUEDUCTO	237		6,164.07
ALCANTARILLADO	237		2,656.55
ASEO			128.68
<b>SUBTOTAL CONSUMO DIARIO:</b>			<b>134,860</b>

OTROS COBROS		
349	AJUSTE AL PESO	3
		3

COD USUARIO:  
**1096871**  
USE ESTE NÚMERO PARA CUALQUIER TRAMITE

Tasa de Uso	Valor por M3
Tasa Retributiva	48.15
	43.14



LECTURA	LECT. ANTERIOR	CONSUMO M	PROMEDIO
375897	379751	108	2323

AHORRO M3: **8117**

HISTORICO DE FACTURAS	
Vlr Factura Aca.	21,969,690
Consumo M3	8,253
Vlr Factura Aca.	6,233,404
Vertimiento M3	8,253
Total Factura Aseo	6,536,981

RESUMEN DE LA FACTURA	
ACUEDUCTO	374,044
ALCANTARILLADO	158,193
ASEO	7,683,550
OTROS CONCEPTOS	3
TOTAL PERIODO	8,212,790

**TOTAL A PAGAR**  
**8,212,790**

FECHA PAGO SIN RECARGO: 04/01/2019  
FECHA CORTE O SUSPENSIÓN: 14/01/2019

Fuente: Ambiente & Soluciones S.A.S.