

# Universidad de Costa Rica

CIUDAD UNIVERSITARIA RODRIGO FACIO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

*INFORME DE LA PRÁCTICA DIRIGIDA DE GRADUACIÓN SOMETIDA  
A CONSIDERACIÓN DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
COMO REQUISITO FINAL PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA*

---

## Práctica dirigida de graduación

*PROPUESTA DE MODIFICACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES PARA AUMENTAR LA CAPACIDAD DE  
REUTILIZACIÓN DEL AGUA EN EL ÁREA DE PLATING DE UNA  
EMPRESA QUE FABRICA CONECTORES ELÉCTRICOS.*

---

Marco Andrés Ramírez Mejías

*San José, 2023.*



**Propuesta de modificación del proceso de tratamiento de aguas residuales para aumentar la capacidad de reutilización del agua en el área de Plating de una empresa que fabrica conectores eléctricos.**

Informe de la práctica dirigida de graduación presentada ante la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica como requisito final para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Química.

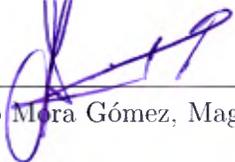
**Sustentante:**

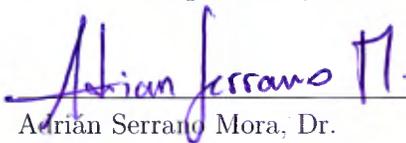
Marco Andrés Ramírez Mejías

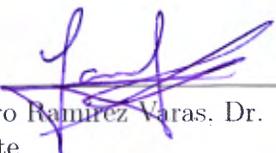
**Tribunal examinador:**

  
\_\_\_\_\_  
Adolfo Ulate Brenes, Mag.  
Director  
Escuela de Ingeniería Química  
Presidente del tribunal

  
\_\_\_\_\_  
René Mora Casal, Dr.  
Docente  
Escuela de Ingeniería Química  
Director del proyecto

  
\_\_\_\_\_  
Bernardo Mora Gómez, Mag.  
Docente  
Escuela de Ingeniería Química  
Miembro lector

  
\_\_\_\_\_  
Adrián Serrano Mora, Dr.  
Docente  
Escuela de Ingeniería Química  
Miembro lector

  
\_\_\_\_\_  
Lautaro Ramírez Varas, Dr.  
Docente  
Escuela de Ingeniería Química  
Miembro lector



# DEDICATORIA

A Dios, por ser mi motor de vida.

A mis padres, Ana y Marconi, por ser mi apoyo incondicional, por ser los pilares que me sostuvieron cuando más lo necesitaba. A mi hermana Natalia, por sus consejos, por apoyarme siempre, por motivarme y por ser mi alma gemela. A ellos tres por ser mi todo en esta vida.

A mi tía Ida, por su ayuda en este proceso, por sus consejos y sabiduría.

A mis amigos y compañeros, Mónica, Vigot, Ariel y Farid, por todo lo vivido en la universidad, por ser el mejor grupo de trabajo y por estar siempre para uno.

A cada uno de ustedes los amo con todo mi corazón.



## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres y hermana, gracias por ser mi apoyo en todo momento, por ser mis mayores tesoros.

A mis familiares y amigos, gracias por estar siempre apoyándome y motivándome para seguir adelante.

A Reyneri Arroyo y Andrés Rodríguez, gracias por permitirme desarrollar el proyecto, por ayudarme y por confiar en mí.

A Gustavo Castro y Anderson Vargas, gracias por la ayuda brindada en la planta de tratamientos y en el laboratorio, su guía fue fundamental para mí.

Al profesor René Mora, gracias por su paciencia y dedicación. Estaré siempre agradecido por su ayuda.



## RESUMEN

El objetivo del presente proyecto fue realizar una propuesta de modificación del proceso de tratamiento de aguas residuales para aumentar la capacidad de reutilización del agua en el área de *plating* de una empresa que fabrica conectores eléctricos.

Actualmente, la empresa requiere de mejoras en la planta de tratamiento de aguas residuales, principalmente en las etapas del proceso donde se descarga más agua, ya que éstas no son recuperadas. En conjunto, las tres principales fuentes de descarga tienen un flujo que alcanza los 76 m<sup>3</sup>/día aproximadamente.

El primer sistema analizado fue el sistema que trata el agua de ciudad antes de que esta entre al proceso productivo de recubrimiento metálico. Este primer efluente en promedio descargó 37 m<sup>3</sup>/día aproximadamente y representó un 49 % del total que se desea recuperar. Para el análisis de caracterización físico-química se obtuvo un valor de conductividad mayor a los 1  $\mu$ S/cm y una concentración de sílice entre 160 y 240 mg/L.

El segundo sistema estudiado fue el sistema que recupera el agua de los enjuagues del proceso productivo. Este segundo efluente en promedio descargó 18 m<sup>3</sup>/día aproximadamente y representó un 24 % del total que se desea recuperar. Para el análisis de caracterización físico-química se obtuvieron valores de conductividad mayor a los 1  $\mu$ S/cm y DBO mayor a 50 mg/L O<sub>2</sub> mg/L.

El tercer y último efluente de estudio fue el tren actual de reacción química. Este tercer efluente en promedio descargó 21 m<sup>3</sup>/día aproximadamente y representó un 27 % del total que se desea recuperar. Para el análisis de caracterización físico-química se obtuvieron valores de conductividad mayor a los 1  $\mu$ S/cm, DBO mayor a 50 mg/L O<sub>2</sub>, DQO mayor a 150 mg/L, pH mayor a 9, dureza entre 180 y 460 mg/L, concentraciones de cobre mayores a 0.5 mg/L y concentraciones de níquel mayores a 1.0 mg/L.

Posteriormente se realizó una breve investigación de las tecnologías más comunes utilizadas en los sistemas de tratamiento de aguas residuales para la remoción de metales pesados. Con base en esta información, así como del conocimiento que se tiene en la empresa sobre el uso de algunas de ellas, se realizó la siguiente propuesta de modificación del proceso de tratamiento de aguas residuales: tanque equalizador para regular el pH, desinfección del sistema mediante cloración para la reducción del DBO, tanque de carbón activado para la reducción del DBO y DQO, tanques de resinas de intercambio iónico catiónicas para reducir la dureza del agua residual y aniónicas para reducir concentración del sílice y un sistema de ósmosis inversa para reducir la concentración de metales pesados y para reducir la conductividad del agua residual.

Por último, se comparó dicha propuesta con la propuesta de tres empresas oferentes y se analizaron las ventajas y desventajas de cada una de ellas hasta que se eligió a la empresa C como candidata para continuar con el proyecto de estudio. Asimismo se le realizó un análisis de costo-beneficio a la propuesta de dicha empresa seleccionada de la cual se obtuvo un valor de ROI de 1.87 años para el escenario de la propuesta.

completa y de 1.62 años para el escenario de la propuesta sin la NRO. Para esta última se recomienda replantear el uso del equipo de ultrafiltración mediante estudios en una planta piloto.

# Índice

	<i>Página</i>
<b>HOJA TRIBUNAL EXAMINADOR</b>	<b>I</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>V</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b>	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>XV</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>PROCESO PRODUCTIVO DE LA INDUSTRIA DE     RECUBRIMIENTO METÁLICO Y MEDIO AMBIEN-     TE</b>	<b>5</b>
2.1 Descripción de los procesos de recubrimiento metálico . . . . .	5
2.2 Tratamientos de superficie aplicados . . . . .	7
2.3 Contaminación de las aguas del proceso . . . . .	9
2.4 Problemática de los Metales Pesados . . . . .	10
<b>CAPÍTULO 3</b>	
<b>PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA Y TI-     POS DE REUSO DE AGUAS RESIDUALES</b>	<b>13</b>
3.1 Parámetros de calidad del agua . . . . .	13
3.1.1 Parámetros físicos . . . . .	13
3.1.2 Parámetros químicos . . . . .	15
3.2 Conservación del agua y su reuso . . . . .	16

3.3	Tipos de reuso de agua . . . . .	17
3.3.1	Clasificación del agua purificada . . . . .	18
3.3.2	Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales No. 33601 . . . . .	19

## CAPÍTULO 4

	<b>SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA EMPRESA DE ESTUDIO</b>	<b>23</b>
4.1	Antecedentes . . . . .	23
4.2	Sistema actual de tratamiento del agua potable . . . . .	27
4.3	Sistema actual de recuperación de agua del proceso productivo . . . . .	28
4.4	Tren actual de reacción química . . . . .	29
4.4.1	Proceso Batch . . . . .	31

## CAPÍTULO 5

	<b>CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES</b>	<b>33</b>
5.1	Información de las principales fuentes de descarga . . . . .	33
5.1.1	Sistema de tratamiento del agua de ciudad . . . . .	33
5.1.2	Sistema de recuperación de agua del proceso productivo . . . . .	36
5.1.3	Sistema del tren de reacción . . . . .	37
5.2	Metodología y muestreo del análisis de caracterización de aguas residuales a lo largo del tiempo . . . . .	39
5.2.1	Conductividad . . . . .	41
5.2.2	Dureza . . . . .	42
5.2.3	Cloro . . . . .	43
5.2.4	Temperatura . . . . .	44
5.2.5	pH . . . . .	44
5.2.6	Sílice . . . . .	46
5.2.7	Metales pesados . . . . .	47

**CAPÍTULO 6**

**PROPUESTA PARA EL REUSO DE LAS AGUAS RESIDUALES 53**

6.1 Tecnologías utilizadas en el tratamiento de las aguas residuales . . . . 53

    6.1.1 Sedimentación . . . . . 53

    6.1.2 Oxidación Química . . . . . 55

    6.1.3 Carbón activado . . . . . 56

    6.1.4 Electrocoagulación . . . . . 56

    6.1.5 Desinfección . . . . . 57

    6.1.6 Intercambio iónico . . . . . 58

    6.1.7 Electrodesionización . . . . . 58

    6.1.8 Microfiltración . . . . . 59

    6.1.9 Ultrafiltración . . . . . 60

    6.1.10 Ósmosis Inversa . . . . . 61

    6.1.11 Electrodialisis . . . . . 62

    6.1.12 Pervaporación . . . . . 63

    6.1.13 Cristalización . . . . . 64

6.2 Ventajas y desventajas de las tecnologías empleadas para el trata-  
    miento y el reuso de aguas residuales . . . . . 65

6.3 Propuesta para el reuso de aguas residuales . . . . . 70

6.4 Propuestas de las empresas oferentes para el reuso de aguas residuales 71

**CAPÍTULO 7**

**ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO 75**

7.1 Conceptos . . . . . 75

7.2 Costos Operativos . . . . . 76

    7.2.1 Costos operativos actuales . . . . . 76

    7.2.2 Costos operativos de la propuesta elegida . . . . . 76

7.3 Ahorro del agua a tratar . . . . . 77

7.4 Retorno sobre la inversión . . . . . 78

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 79**

<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>81</b>
<b>APÉNDICES</b>	<b>89</b>
A RESULTADOS CARACTERIZACIÓN A LO LARGO DEL TIEMPO	89
B MUESTRA DE CÁLCULO . . . . .	94
B.1 Cálculos para el Retorno sobre la inversión . . . . .	94
<b>ANEXOS</b>	<b>97</b>
A Equipos y procedimientos utilizados para la caracterización a lo largo del tiempo . . . . .	97
A.1 Procedimientos de medición . . . . .	97
B Curva de calibración de los metales pesados analizados en la caracte- rización de aguas residuales . . . . .	102

# Índice de cuadros

<b>Cuadro 3.1</b>	Límites máximos para el reuso de aguas residuales especiales (Fuente). . . . .	21
<b>Cuadro 5.1</b>	Resultados obtenidos por medio de un laboratorio certificado del rechazo de la ósmosis inversa NRO. Elaboración propia.	35
<b>Cuadro 5.2</b>	Resultados obtenidos por medio de un laboratorio certificado del rechazo de la ósmosis inversa RO Recuperación. Elaboración propia. . . . .	38
<b>Cuadro 5.3</b>	Resultados obtenidos por medio de un laboratorio certificado del permeado de microfiltración. Elaboración propia. . . . .	40
<b>Cuadro 6.1</b>	Clasificación de los procesos con membranas. . . . .	63
<b>Cuadro 6.2</b>	Ventajas y desventajas de la electrocoagulación. Fuente: Ruiz (2005) . . . . .	66
<b>Cuadro 6.3</b>	Ventajas y desventajas de la electrodesionización. Fuente: Carrillo (2020), Contreras (2017) y Serra (2007) . . . . .	66
<b>Cuadro 6.4</b>	Ventajas y desventajas de la microfiltración. Fuente: Picho (2006), Puritec de México (2019) . . . . .	67
<b>Cuadro 6.5</b>	Ventajas y desventajas de la ultrafiltración. Fuente: Martos y Area (2000), Carrillo (2020) . . . . .	67
<b>Cuadro 6.6</b>	Ventajas y desventajas de la ósmosis inversa. Fuente: Carrillo (2020), Puritec de México (2019), Martínez Guijarro (2021b)	68
<b>Cuadro 6.7</b>	Ventajas y desventajas de la electrodiálisis. Fuente: Contreras (2017), Martínez Guijarro (2021b) . . . . .	68
<b>Cuadro 6.8</b>	Ventajas y desventajas de la pervaporación. Fuente: Novo (2018), Gutiérrez (2007) . . . . .	69
<b>Cuadro 6.9</b>	Ventajas y desventajas de la cristalización. Fuente: Melo y Ochoa (2021) . . . . .	69
<b>Cuadro 6.10</b>	Ventajas y desventajas de las propuestas de las empresas oferentes. . . . .	73
<b>Cuadro A.1</b>	Valores de conductividad en $\mu S/cm$ . . . . .	89

<b>Cuadro A.2</b>	Valores de dureza en mg/L. . . . .	89
<b>Cuadro A.3</b>	Valores de cloro en mg/L . . . . .	90
<b>Cuadro A.4</b>	Valores de temperatura en °C. . . . .	90
<b>Cuadro A.5</b>	Valores de pH, unidades adim. . . . .	90
<b>Cuadro A.6</b>	Valores de sílice en mg/L. . . . .	91
<b>Cuadro A.7</b>	Valores de cobalto en mg/L. . . . .	91
<b>Cuadro A.8</b>	Valores de cobre en mg/L. . . . .	91
<b>Cuadro A.9</b>	Valores de hierro en mg/L. . . . .	92
<b>Cuadro A.10</b>	Valores de níquel en mg/L. . . . .	92
<b>Cuadro A.11</b>	Valores de oro en mg/L. . . . .	92
<b>Cuadro A.12</b>	Valores de zinc en mg/L. . . . .	93
<b>Cuadro A.13</b>	Equipo utilizado en el análisis de caracterización de aguas residuales a lo largo del tiempo. . . . .	97

## Índice de figuras

<b>Figura 4.1</b>	Sistema de reacción química de la planta de tratamiento de aguas residuales en sus inicios. Elaboración propia. . . . .	24
<b>Figura 4.2</b>	Sistema de recuperación del agua del proceso productivo de la empresa de estudio en sus inicios. Elaboración propia. . . . .	24
<b>Figura 4.3</b>	Variación de presión de la ósmosis inversa de recuperación. Tomado de la empresa de estudio. . . . .	25
<b>Figura 4.4</b>	Variación del flujo de permeado de la ósmosis inversa de recuperación. Tomado de la empresa de estudio. . . . .	25
<b>Figura 4.5</b>	Variación de conductividad de la ósmosis inversa de recuperación. Tomado de la empresa de estudio. . . . .	25
<b>Figura 4.6</b>	Sistema actual de tratamiento del agua potable de la empresa de estudio. Elaboración propia. . . . .	28
<b>Figura 4.7</b>	Sistema actual de recuperación de agua del proceso productivo de la empresa de estudio. Elaboración propia. . . . .	29
<b>Figura 4.8</b>	Tren actual de reacción química de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa de estudio. Elaboración propia. . . . .	30
<b>Figura 4.9</b>	Solubilidad de hidróxidos metálicos en función del pH (Kaifer, 2006) . . . . .	32
<b>Figura 5.10</b>	Variación de distintos parámetros del agua de ciudad que entra a la planta de tratamiento de aguas residuales, de mayo del 2017 a enero del 2020. . . . .	36
<b>Figura 5.11</b>	Variación de la conductividad por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia. . . . .	41
<b>Figura 5.12</b>	Variación de la dureza por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia. . . . .	42
<b>Figura 5.13</b>	Variación del cloro residual por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia. . . . .	43

<b>Figura 5.14</b>	Variación de la temperatura por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia. . . . .	45
<b>Figura 5.15</b>	Variación del pH por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia. . . . .	45
<b>Figura 5.16</b>	Variación de la concentración de sílice por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia. . . . .	46
<b>Figura 5.17</b>	Variación de la concentración de cobalto por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia. . . . .	47
<b>Figura 5.18</b>	Variación de la concentración de cobre por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia. . . . .	48
<b>Figura 5.19</b>	Variación de la concentración de hierro por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia. . . . .	49
<b>Figura 5.20</b>	Variación de la concentración de níquel por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia. . . . .	50
<b>Figura 5.21</b>	Variación de la concentración de oro por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia. . . . .	51
<b>Figura 5.22</b>	Variación de la concentración de zinc por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia. . . . .	52
<b>Figura 6.23</b>	Esquema general de un tanque tipo Dortmund. Fuente: Durán y Díaz (2008) . . . . .	55
<b>Figura 6.24</b>	Procesos involucrados en un equipo de electrocoagulación. Fuente: Martínez (2007) . . . . .	57
<b>Figura 6.25</b>	Vista de un sistema modular de electrodesionización en continuo. Fuente: Sanz <i>et al.</i> (2006) . . . . .	59
<b>Figura 6.26</b>	Filtración convencional o perpendicular (a) y tangencial o paralela (b). Fuente: Coronel (2012) . . . . .	60
<b>Figura 6.27</b>	Esquema de la separación con membranas. Fuente: Solís <i>et al.</i> (2017) . . . . .	61
<b>Figura 6.28</b>	Proceso de ósmosis inversa. Fuente: Velásquez (2019) . . .	62
<b>Figura 6.29</b>	Diagrama conceptual del proceso de electrodiálisis. Fuente: Asano <i>et al.</i> (2007) . . . . .	63

<b>Figura 6.30</b>	Diagrama de pervaporación a través de una membrana. Fuente: García <i>et al.</i> (2015) . . . . .	64
<b>Figura 6.31</b>	Sistema propuesto para el reuso de las aguas residuales provenientes del proceso productivo. . . . .	71
<b>Figura 6.32</b>	Sistemas propuestos por las empresas oferentes para el reuso de las aguas residuales provenientes del proceso productivo. . . . .	73
<b>Figura 10.33</b>	Curva de calibración del Cobalto mediante el uso de un equipo de absorción atómica. (Elaboración propia) . . . . .	102
<b>Figura 10.34</b>	Curva de calibración del Cobre mediante el uso de un equipo de absorción atómica. (Elaboración propia) . . . . .	102
<b>Figura 10.35</b>	Curva de calibración del Hierro mediante el uso de un equipo de absorción atómica. (Elaboración propia) . . . . .	103
<b>Figura 10.36</b>	Curva de calibración del Níquel mediante el uso de un equipo de absorción atómica. (Elaboración propia) . . . . .	103
<b>Figura 10.37</b>	Curva de calibración del Oro mediante el uso de un equipo de absorción atómica. (Elaboración propia) . . . . .	104
<b>Figura 10.38</b>	Curva de calibración del Zinc mediante el uso de un equipo de absorción atómica. (Elaboración propia) . . . . .	104



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

Dentro del proceso de evolución del ser humano, actualmente se ha llegado a una fase en la que la rápida aceleración del desarrollo científico y tecnológico han permitido al hombre transformar su propio medio a una escala sin precedentes.

Sin embargo, el bienestar de la humanidad va a depender del disfrute de los derechos básicos incluido desde luego el derecho a la vida, el protegerse y mejorar el medio sin que afecte el bienestar de los pueblos y el desarrollo económico del mundo.

De ahí que cobre importancia, para efecto de esta propuesta lo que Chávez *et al.* (2009) en la revista titulada “Una alternativa limpia para el tratamiento de las aguas residuales galvánicas: revisión bibliográfica” plantean: “toda actividad humana tiene un impacto dentro y fuera de su entorno, las que producen contaminación no sólo alteran el equilibrio ecológico y causan la muerte de algunas especies animales y vegetales, sino que pueden destruir en forma definitiva la vida” (párr.1).

En este sentido las industrias en el país tienen como principal preocupación el mantener la competitividad; uno de los aspectos importantes que les permite ser competitivas es el comportamiento medioambiental. No obstante, para mantener esta competitividad muchas veces no se contempla el abastecimiento de energía y agua en cantidades suficientes para su bienestar y desarrollo.

Por su parte, el Ministerio de Ambiente y Energía (2016) apunta al respecto: “En el mundo una de cada tres personas no tiene acceso a instalaciones de saneamiento adecuadas; se estima que al menos el 20 % de los acuíferos mundiales se encuentran sobreexplotados y que para el 2030 habrá un déficit de agua dulce del 40 %. Por lo que, se requiere tomar decisiones oportunas y planificar a largo plazo” (p.10).

De igual manera, Asano *et al.* (2007) mencionan que, debido al impacto social, económico y ambiental, una nueva idea de desarrollo y gestión de los recursos hídricos ha ido evolucionando, basada en los principios de sostenibilidad y ética ambiental, ante una posible escasez de agua y cuyo objetivo es satisfacer las necesidades de

agua de manera confiable y equitativa para las generaciones actuales y futuras.

Todo esto es posible mediante el diseño de sistemas integrados y adaptables, la optimización de la eficiencia del uso del agua y los esfuerzos continuos para la preservación y restauración de los ecosistemas naturales. Esta transición hacia una sociedad sostenible plantea una serie de desafíos tecnológicos y sociales, donde las innovaciones tecnológicas pueden ayudar a mejorar lo que se denomina ecoeficiencia de las actividades humanas (Asano *et al.*, 2007).

Por tanto, Costa Rica no se ha hecho esperar, y está dispuesto a hacerse notar, por sus avances importantes en el subsector de agua potable; sin embargo, existe una gran cantidad de aguas residuales que son vertidas a los ríos y mares con deficiente o sin ningún tratamiento. Es por ello que se desea redoblar esfuerzos a nivel país para poder replantear mejores estrategias de manejo seguro de las aguas residuales, según el Ministerio de Ambiente y Energía (2016).

Es desde esta perspectiva que se realiza la propuesta en la empresa interesada, la cual es una transnacional cuya principal actividad es el tratamiento de superficies para fabricar conectores electrónicos y cuyo nombre no se podrá mencionar debido a un acuerdo de confidencialidad.

El proceso consiste en un recubrimiento con estaño, oro y níquel de los pines a utilizar posteriormente en sus conectores. Esto genera efluentes inorgánicos y tóxicos, los cuales resultan nocivos para el ser humano y su entorno. Debido a esto, la empresa realiza un tratamiento adecuado de los efluentes líquidos producidos.

Actualmente, la empresa requiere de mejoras en la planta de tratamiento de aguas residuales, principalmente en las etapas del proceso donde se descarga más agua, ya que éstas no son recuperadas. En conjunto, las tres principales fuentes de descarga tienen un flujo que alcanza los 76 m<sup>3</sup>/día aproximadamente. Cabe mencionar que esta descarga es analizada mes a mes, con el fin de asegurar que se cumpla con los parámetros de vertido de aguas residuales.

A raíz de esto, se hace necesario e importante el presente trabajo de investigación, el cual tiene como propósito aplicar el conocimiento adquirido en la carrera de Inge-

nería Química, la cual proporciona herramientas importantes como conocimientos en Química y Física, Análisis de Sistemas, Balances de Masa y Fenómenos de Transporte.

Todo esto acompañado por un pensamiento ecológico, donde se busca reducir el consumo de agua en los procesos de producción y también realizar propuestas adecuadas para el tratamiento de aguas residuales. A la vez que al reutilizar el agua se ven beneficiadas tanto la empresa al reducir el consumo de agua potable como la población cercana.



## CAPÍTULO 2

### PROCESO PRODUCTIVO DE LA INDUSTRIA DE RECUBRIMIENTO METÁLICO Y MEDIO AMBIENTE

En este capítulo se describe el proceso electroquímico de la galvanoplastia. El objetivo principal es conocer de manera general cada una de las etapas de dicho proceso, así como los tratamientos que se aplican en la empresa de estudio con el fin de determinar los tipos de efluentes líquidos generados y la problemática ambiental ocasionada por los metales pesados presentes en estos efluentes.

#### 2.1. Descripción de los procesos de recubrimiento metálico

La galvanoplastia es una técnica que consiste en la electrodeposición de un recubrimiento metálico sobre una superficie que puede ser o no metálica. Esto con el fin de modificar las características del material base, principalmente la resistencia a la corrosión, dureza, apariencia, conductividad eléctrica y rozamiento (Chávez *et al.*, 2009).

El proceso de recubrimiento se realiza por inmersión en un baño electrolítico, de manera que los iones metálicos presentes en soluciones ácidas, alcalinas o neutras, se reducen en las piezas a recubrir. Las propiedades específicas de los recubrimientos dependen de los componentes del electrolito utilizado, y se pueden aplicar cubiertas de cromo, cobre, zinc, níquel, cadmio, plomo, plata, estaño u oro, así como aleaciones de latones, bronces, zinc aleado y oro aleado. A los distintos tipos de recubrimientos electrolíticos le siguen una serie de tratamientos, para mejorar las propiedades anticorrosivas y funcionales del revestimiento correspondiente, como son el cromatizado o pasivado crómico, el sellado y el lacado. Entre cada operación se tienen tanques con agua para lavar las piezas, así se evita contaminar la solución de la siguiente etapa. Las aguas al contener metales pesados, ácidos, álcalis y otras sustancias peligrosas, deben ser tratadas antes de ser descartadas o vertidas al alcantarillado (De Lima *et al.*, 2007).

En este sentido un recubrimiento consta de diferentes etapas de preparación por lo que a continuación, se describen las etapas del proceso de galvanoplastia según el Ministerio del Ambiente de Ecuador (2011):

- **Desengrase:** esta etapa consiste en la eliminación de las grasas y aceites de la superficie de las piezas metálicas, para ello se utilizan tres tipos de desengrase considerando el tipo de grasa adherida en el material:
  - Limpieza con álcalis por inmersión o rociado: consiste en la eliminación de grasa de la superficie del material mediante el uso de soluciones acuosas de álcalis fuerte.
  - Desengrase con solventes orgánicos: en esta forma de desengrasado se utilizan hidrocarburos clorados no inflamables, los cuales tienen la ventaja de disolver igualmente bien todas las grasas y aceites presentes en los materiales.
  - Desengrasado electrolítico con álcalis: es el procedimiento más efectivo de desengrase. Las piezas son desengrasadas en un electrolito alcalino con la ayuda de la corriente eléctrica, ejerciendo la función de cátodo y rara vez la de ánodo.
- **Lavado de desengrase:** consiste en el lavado de las piezas con agua, con el fin de eliminar los residuos de la etapa anterior. En esta etapa se generan aguas residuales contaminadas con los químicos utilizados en el desengrase.
- **Decapado o desoxidación:** consiste en eliminar las capas de óxido formadas en las superficies de las piezas. Se realiza sumergiendo las piezas en una solución que puede ser ácida o alcalina. Las soluciones alcalinas utilizadas pueden ser hidróxidos y carbonatos, las soluciones ácidas pueden ser ácido sulfúrico, clorhídrico o fluorhídrico.
- **Lavado de decapado:** consiste en el enjuague de las piezas metálicas o plásticas en un tanque con agua para evitar el arrastre de ácido a las siguientes etapas del proceso. En esta etapa se utiliza agua para el enjuague, generando aguas residuales contaminadas con las soluciones aplicadas en el decapado.

- **Electrólisis:** es la etapa de recubrimiento de las piezas metálicas o plásticas. Consiste en la conservación de la materia, donde una sustancia cede electrones (se oxida) y otra los acepta (se reduce). Se puede hacer que las reacciones de oxidación y reducción sucedan en recipientes separados, unidos por un conductor metálico que transporta electrones. Para el desarrollo de esta actividad se utilizan materiales metálicos de recubrimiento tales como: sulfatos, cloruros, cianuros de níquel, cromo y estaño. Los desechos que se originan principalmente son desechos líquidos de las soluciones de níquel, cromo o estaño, y de recipientes vacíos de los químicos usados.
- **Lavado en caliente:** se retira la totalidad de las impurezas presentes en la pieza, debido al contacto con el baño electrolítico. Puede realizarse por inmersión de las piezas en un tanque de lavado con solución. Se utiliza principalmente una solución diluida de ácido clorhídrico y agua, generándose agua residual con ácido clorhídrico residual.
- **Secado:** las piezas metálicas deben secarse, lo más rápido posible después del galvanizado y del lavado final para evitar la aparición de manchas sobre los depósitos metálicos. El secado se puede realizar en mesas de secado, hornos de secado o por medio del rociado con aire caliente. Como resultado de este proceso se generan principalmente vapores.

## 2.2. Tratamientos de superficie aplicados

Aunado a lo anteriormente, y según el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España (2009), los procesos electrolíticos pueden modificar la superficie por deposición de un metal, con el fin de aumentar las propiedades anticorrosivas, decorativas o funcionales del material. También, la fuente citada indica que “El mecanismo de recubrimiento electrolítico consiste en sumergir la superficie en un electrolito que posee los iones del metal a depositar, donde la pieza a recubrir constituye el cátodo de la cubeta electrolítica. El ánodo está formado por piezas de gran pureza del metal de deposición, cuya misión es mantener constante la concentración

de los iones metálicos en el electrolito” (p.46).

Al mismo tiempo, el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España (2009), cita algunos de los procesos electrolíticos utilizados tales como:

- **Niquelado:** aplicar una subcapa de níquel favorece la resistencia a la corrosión y la posterior electrodeposición del metal que ofrecerá el acabado final. Se utiliza normalmente como subcapa para tratar hierro, aluminio y sus aleaciones, cobre, zinc y sus aleaciones.
  
- **Cobreado:** se pueden encontrar varios tipos de cobreado, entre los que destacan el cobre cianurado, el cual consiste en baños a bajas temperaturas con una obtención de grosores de entre 2-3  $\mu\text{m}$ ; el cobre alcalino exento de cianuros, que sirve como una subcapa de níquel brillante y cromo; cobre ácido, actualmente el más utilizado debido a su capacidad de homogeneización (nivel de espesor); y cobreado con pirofosfato, cuya composición del baño consiste en 21 % de pirofosfato de cobre, 76 % de pirofosfato de potasio, 2 % de ácido cítrico y 1 % de amonio.
  
- **Estañado:** se utiliza en muchas aplicaciones debido a sus propiedades. Este tipo de recubrimiento no es tóxico, es dúctil, resistente a la corrosión y de fácil recubrimiento. Lo que hace posible que piezas con formas complejas puedan ser perfectamente recubiertas. La principal aplicación se encuentra en la industria de fabricación de envases para alimentación, bebidas y aerosoles, así como en los circuitos impresos, componentes electrónicos y aparatos eléctricos.
  
- **Oro:** se utiliza en la fabricación de conectores, circuitos impresos, joyería, etc. En ocasiones contienen agentes tamponadores que mantienen el pH y otros metales como cobalto, níquel o hierro que incrementan la resistencia y brillo del recubrimiento. Usualmente este proceso incorpora un prebaño de oro que es usado para dar una primera capa que mejorará la adhesión de las posteriores.

### 2.3. Contaminación de las aguas del proceso

Las aguas residuales provienen de varias fuentes diferentes en las instalaciones industriales, incluidos los procesos de limpieza, preparación, producción y enjuague, así como del lavado de equipos e instalaciones de producción. Estos procesos producen varios tipos de desechos industriales, tales como solventes orgánicos tóxicos utilizados como agentes desengrasantes y limpiadores; soluciones altamente ácidas o básicas utilizadas para limpieza, recubrimiento y ajuste de pH; cianuro de procesos de recubrimiento; y metales tóxicos de soluciones básicas de recubrimiento (Kerri, 2013).

Desde esta perspectiva, Chávez *et al.* (2009) expresan que la actividad de tratamiento de superficies produce fundamentalmente efluentes líquidos de dos tipos: por un lado, aparecen cargas contaminantes altas en volúmenes relativamente pequeños, provenientes de los efluentes generados en los baños de proceso; por el otro, efluentes con cargas contaminantes diluidas en grandes volúmenes de agua, de los efluentes procedentes de los enjuagues o lavados (p.44).

Por su parte, Sun Kou (2004) destaca que las características tóxicas se deben a las concentraciones normalmente elevadas en cianuro y metales pesados, además, de la elevada acidez o alcalinidad, provocando que los desechos sean altamente corrosivos. Asimismo, el riesgo de contaminación depende de las sustancias químicas presentes, así como de su concentración y volumen, de las posibilidades de contacto humano y de su comportamiento en el medio ambiente después de su disposición (párr. 4). En este sentido se puede decir que, los tipos de vertimiento que se pueden dar en una instalación son:

- **Vertidos discontinuos diluidos:** son los procedentes de sumergir las piezas en cubas de agua estancada con el fin de diluir al máximo la película de baño que las piezas llevan adherida en todo momento (Hibbitt y Kamp-Roelands, 2002).
- **Vertidos discontinuos concentrados:** son los procedentes de los baños de desengrases, neutralizados y pasivados agotados (Corbett y Pan, 2002).

- **Vertidos continuos:** se generan en el proceso. Utiliza una entrada de agua limpia constante a los enjuagues corrientes. Es la mayor fuente de consumo de agua de una empresa de recubrimiento metálico (Corbett y Pan, 2002).

## 2.4. Problemática de los Metales Pesados

Actualmente una de las problemáticas de los metales pesados presentes en el agua residual radica principalmente en que no son degradados fácilmente de forma natural o biológica, ya que no tienen funciones metabólicas específicas para los seres vivos (Mancilla-Villa *et al.*, 2012).

Por su parte, Blais *et al.* (2008) agregan que otro problema asociado con esta contaminación es la toxicidad contra todos los organismos vivos, en particular los humanos. Los riesgos asociados con la presencia de metales potencialmente tóxicos en suelos y agua son bastante conocidos, por lo tanto, los autores indican que es esencial eliminar o reducir la presencia de estos contaminantes inorgánicos para disminuir la posibilidad de absorción por plantas, animales y humanos, la eventual acumulación en la cadena alimentaria, y para evitar que contaminen las aguas superficiales y subterráneas por disolución o dispersión.

Sin embargo, Kabata-Pendias (2010) destaca que ciertos metales tóxicos normalmente están presentes en el medio ambiente en concentraciones elevadas, los cuales han sido objeto de investigaciones realizadas por parte de autoridades de salud pública y protección animal. A la vez, cita algunos ejemplos de estos metales, de los cuales destacan: arsénico, berilio, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo, níquel, plata y zinc.

A continuación, se describen algunos de los principales problemas de toxicidad humana asociados con estos contaminantes citado por Blais *et al.* (2008), tomando en consideración solo aquellos de interés para el estudio realizado:

- **Cobre:** provoca debilidad, letargo y anorexia, dolor abdominal, calambres, náuseas, diarrea, vómitos, cirrosis hepática, enfermedad de Wilson, daño a los túbulos renales, necrosis hepática, colapso vascular.

- **Níquel:** provoca dolor de cabeza, náuseas, dermatitis alérgica, asma crónica, tos, fibrosis pulmonar, enfermedades cardiovasculares y renales, cáncer de pulmón y nasal.
- **Zinc:** provoca depresión, letargo, signos neurológicos como convulsiones y ataxia y aumento de la sed, irritación gastrointestinal y vómitos.



## CAPÍTULO 3

### PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA Y TIPOS DE REUSO DE AGUAS RESIDUALES

En el presente capítulo se destacan los principios básicos y fundamentales de la calidad de agua, donde se determinan los parámetros físicos, químicos y biológicos que sirven como punto de partida para poder conseguir un producto que sea capaz de ser reutilizado en el proceso productivo de la empresa de estudio.

Aunque el enfoque principal de éste proyecto reside en el reuso del agua residual en el proceso productivo, se recomienda tanto el reuso tipo 1 como el reuso tipo 8 según el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales No. 33601, lo cual se detallará más adelante en este capítulo.

#### 3.1. Parámetros de calidad del agua

La calidad de agua se puede definir según el uso al que esté destinada y a las características que se requieran. Los parámetros de calidad tienen distintos valores dependiendo del uso que se le vaya a dar, y se pueden clasificar en: químicos, físicos o biológicos (Muñoz, 2008).

##### 3.1.1. Parámetros físicos

Estos parámetros son respuesta de los sentidos (vista, olfato, entre otros), los cuales repercuten sobre las condiciones estéticas del agua. Entre ellos, Muñoz (2008) destaca los siguientes:

- **Turbiedad:** puede ser causada por una gran variedad de materiales en suspensión, que varían en tamaño y van desde dispersiones coloidales hasta partículas gruesas como: arcillas, limo, materia orgánica e inorgánica suspendida, microorganismos, entre otros.
- **Color:** el agua pura es incolora, pero las sustancias naturales presentes en ella

le pueden proporcionar ciertas tonalidades. Los desechos industriales dan a las aguas ciertos colores característicos, donde es común la presencia de hierro y manganeso coloidal o en solución, así como la presencia de taninos, ácido húmico y algunos residuos industriales.

- **Olor y sabor:** frecuentemente ocurren juntos y muchas pueden ser las causas, entre las más comunes se encuentran: materia orgánica en solución, ácido sulfúrico, cloruro de sodio, sulfato de sodio y magnesio, hierro y manganeso, fenoles, aceites, productos de cloro, entre otros. Este aspecto puede servir para determinar en muchos casos la fuente de una posible contaminación.
- **Temperatura:** la determinación de la temperatura es importante para diferentes procesos de tratamientos ya que, el grado de saturación de oxígeno disuelto, la actividad biológica y el valor de saturación con carbonato de calcio se relacionan con la temperatura.
- **Sólidos totales:** corresponde a la suma de todos los sólidos, los cuales incluye material disuelto y no disuelto.
- **Sólidos disueltos:** se pueden determinar directamente o por diferencia entre los sólidos totales y los sólidos suspendidos. En el caso que sea directa, la muestra se filtra a través de un filtro de asbesto o de fibra de vidrio, luego se evapora en una cápsula de peso conocido y, por último, se determinan los sólidos disueltos debido a un aumento en el peso de dicha cápsula.
- **Sólidos suspendidos:** son las partículas orgánicas como las fibras de plantas y bacterias, y partículas inorgánicas como la arcilla, que se encuentran en el agua. Afectan las aguas superficiales debido a que generan una acumulación de sedimentos, obstruyendo el interior de las tuberías.
- **Sólidos sedimentables:** son los sólidos en suspensión que se sedimentaran, bajo condiciones tranquilas, por acción de la gravedad.
- **Conductividad:** es una expresión numérica que relaciona la habilidad del agua para transportar una corriente eléctrica. Depende de la concentración

total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se haga la determinación. El valor de conductividad es muy usado en análisis de aguas para obtener un estimado rápido del contenido de sólidos disueltos.

### 3.1.2. Parámetros químicos

Están relacionados con la capacidad de solvencia del agua, por lo que no resultan tan fáciles de determinar como los parámetros físicos. Para esto es necesario de un laboratorio que realice pruebas específicas (Campos, 2000). La autora menciona que dentro de los parámetros químicos más importantes se pueden destacar los siguientes:

- **Alcalinidad:** es una medida de la cantidad de iones que se encuentran presentes en el agua, los cuales reaccionan para neutralizar los iones hidrógeno. Los efectos más notorios son el sabor amargo en el agua, las reacciones con algunos cationes del agua, lo cual produce obstrucciones en las tuberías o accesorios.
- **pH:** es una propiedad química que mide el grado de acidez o alcalinidad de las soluciones acuosas. El pH usa una escala de medición cuyo rango de fluctuación es de 0 a 14 (Osorio, 2012). El rango de pH para aguas naturales oscila entre 4 y 9 y la mayoría son ligeramente básicas debido a la presencia de bicarbonatos y carbonatos de metales alcalinos y alcalinotérreos. El pH del agua pura a 25 °C es de 7 (Garay *et al.*, 2003).
- **Dureza:** representa la concentración de cationes metálicos multivalentes en solución. En condiciones de saturación, los cationes reaccionarán con aniones en el agua para formar un sólido. Existen dos tipos de dureza, conocidos como carbonatada o no carbonatada, las cuales deben su nombre al tipo de anión con el cual reaccionan.
- **Metales:** son elementos que se encuentran en el agua, los cuales se clasifican, según su efecto sobre el ser humano, en tóxicos y no tóxicos. Los no tóxicos son el sodio, el hierro, el manganeso (en cantidades excesivas se pueden convertir en tóxicos). Los metales tóxicos más conocidos son el plomo, mercurio, cadmio, arsénico y zinc.

- **Elementos orgánicos:** se clasifican según su degradación, en biodegradables o no. Las sustancias biodegradables son aquellas utilizadas como alimento por los microorganismos en cierto tiempo. Los más comunes son azúcares, grasas, proteínas, alcoholes, ácidos y aldehídos. La degradación de las sustancias orgánicas es realizada a través de los procesos bioquímicos de oxidación o reducción, y para que dichos procesos ocurran se necesita oxígeno; de allí surge el parámetro Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Otro parámetro utilizado es la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la cual representa la cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente el carbono orgánico a dióxido de carbono.
- **Nutrientes:** los dos nutrientes más importantes en la descripción de calidad de agua son el nitrógeno y el fósforo. El nitrógeno es un componente más de las proteínas, clorofila y otros compuestos biológicos. El exceso de nitrógeno provoca superpoblaciones de algas y plantas verdes. El fósforo aparece en los ecosistemas acuáticos como fosfato, y es un nutriente que también se asocia con las superpoblaciones de algas y plantas verdes.

### 3.2. Conservación del agua y su reuso

Históricamente, la industria del agua ha considerado la conservación del agua como una medida de reserva o temporal que se utiliza solo en épocas de sequía u otras situaciones de escasez de agua de emergencia. Con los años, esta visión ha ido cambiando y se ha demostrado que puede ser una opción de suministro viable a largo plazo. Entre los beneficios se destacan la reducción de la energía y los insumos químicos para el tratamiento del agua, la reducción o el aplazamiento de las instalaciones de agua y la reducción de los costos y el impacto de la gestión de las aguas residuales (Vickers, 1999).

Por otro lado, en el documento descrito por Asano *et al.* (2007) se menciona que la recuperación de agua es el tratamiento de aguas residuales para hacerlas reutilizables con una confiabilidad de tratamiento definible que cumple con los criterios de calidad

del agua. Al igual que la conservación del agua, su reuso trae consigo múltiples beneficios, ya sea para riego agrícola, refrigeración industrial o como lo es en este caso de estudio, para volver a formar parte del proceso.

El reuso del agua es atractivo especialmente en situaciones en las que el suministro de agua disponible ya está comprometido en exceso y no puede satisfacer la creciente demanda de agua en una comunidad en crecimiento. Es importante tomar en cuenta que la sociedad ya no puede darse el lujo de usar el agua una sola vez, por eso al reutilizar el agua se está generando un suministro alternativo el cual está constantemente disponible, incluso durante los años de sequía (Asano *et al.*, 2007).

Considerando este punto de vista, Simpson (2006) y Mantovani *et al.* (2001) añaden al respecto que existen otros potenciales beneficios del reuso del agua tales como:

- Conservación de suministros de agua dulce.
- Manejo de nutrientes que pueden conducir a la degradación ambiental.
- Ventajas económicas al reducir la necesidad de fuentes de agua suplementarias e infraestructura asociada.
- Los nutrientes en el agua recuperada pueden compensar la necesidad de fertilizantes suplementarios, conservando así los recursos. El agua recuperada procedente de efluentes tratados contiene nutrientes; si esta agua se usa para regar tierras agrícolas, se requiere menos fertilizante para el crecimiento de los cultivos.

### **3.3. Tipos de reuso de agua**

Para el presente proyecto se considerarán únicamente el reuso de aguas para obtener una calidad de agua Tipo II, según la Norma ASTM D1193-06, y cuya finalidad es retornar al proceso productivo, y el reuso de aguas según el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales No. 33601, como una solución alternativa.

### 3.3.1. Clasificación del agua purificada

El agua al ser una molécula dipolar, hace que sea conocida como el disolvente universal, logrando disolver compuestos como las sales y provocando que se vea alterada fácilmente, sobretodo el agua pura. Valdivia-Medina *et al.* (2010) mencionan algunos compuestos que se encuentran comúnmente en el agua tales como sales de calcio y magnesio, las cuales aportan dureza, también contiene otras sustancias como hierro, sílice, manganeso, cloruros, sulfatos, sodio y otros materiales en suspensión.

De manera más general Valdivia-Medina *et al.* (2010) dividen en tres grandes grupos los compuestos o impurezas presentes en el ciclo natural del agua: iónicas disueltas (inorgánicos), no iónicas insolubles (orgánicos, microorganismos, pirógenos, partículas) y gaseosas.

Martínez Guijarro (2021a) resume la clasificación del agua, según la ASTM D1193-06, de la siguiente manera:

- **Tipo I:** usada para procedimientos que requieren de máxima exactitud y precisión, tales como: absorción atómica, HPLC, PCR, cultivos celulares, etcétera. Se prepara mediante destilación seguido de un afinado final con un lecho mixto de intercambiadores iónicos y un filtro de membrana de 0,2  $\mu\text{m}$ .
- **Tipo II:** recomendada para la mayoría de las pruebas analíticas y generales de laboratorio, tales como: análisis microbiológico, cámaras de niebla salina, cultivos hidropónicos, limpieza de material (lavavajillas), autoclaves, etcétera. Se obtiene por destilación con un tratamiento previo de ósmosis inversa, intercambio iónico y adsorción orgánica.
- **Tipo III:** apropiada para pruebas generales de laboratorio, para la mayoría de los análisis cualitativos y para el lavado y el enjuague del material de laboratorio. Se puede preparar mediante destilación, intercambio iónico, electrodesionización, ósmosis inversa o una combinación de ellos, utilizando un filtro de membrana de 0,45  $\mu\text{m}$  al final.
- **Tipo IV:** sirve para la preparación de soluciones y para el lavado o enjuague.

gue del material de laboratorio. Se obtiene mediante destilación, intercambio iónico, electrodesionización, ósmosis inversa o una combinación de ellos.

Para el nivel de pureza de agua tipo II, se pueden definir los siguientes parámetros fisicoquímicos:

- *Conductividad eléctrica máxima:* 1,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 25 °C.
- *Resistividad mínima:* 1,0  $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$  a 25 °C.
- *Carbono Orgánico Total:* 50 mg/L, valor máximo.
- *Sodio:* 5  $\mu\text{g}/\text{L}$ , valor máximo.
- *Cloruros:* 5 mg/L, valor máximo.
- *Sílice Total:* 3  $\mu\text{g}/\text{L}$ , valor máximo.

### 3.3.2. Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales No. 33601

El Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales No. 33601, cuyo objetivo es la protección de la salud pública y del ambiente mediante la gestión adecuada de las aguas residuales, detalla en el Artículo 27 que “Se permitirá el reuso de aguas residuales tratadas de acuerdo con lo establecido en el Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales vigente. En ningún caso se podrán utilizar estas aguas para el consumo humano” y clasifica los tipos de reuso en los siguientes (SCIJ, 2006):

- **Tipo 1: Reuso urbano.** Riego de zonas en donde haya acceso del público (por ejemplo en zonas verdes), lavado de automóviles, inodoros, combate de incendios y otros usos con similar acceso o exposición al agua.
- **Tipo 2: Riego con acceso restringido.** Cultivo de césped, silvicultura y otras áreas donde el acceso del público es prohibido o restringido.

- **Tipo 3: Reuso agrícola en cultivos de alimentos que no se procesan previo a su venta.** Riego superficial o por aspersión, de cualquier cultivo comestible que no se procese previo a su venta, incluyendo aquellos que se consumen crudos.
- **Tipo 4: Reuso agrícola en cultivos de alimentos que se procesan previo a su venta.** Riego de cultivos que, previo a su venta al público, han recibido el procesamiento físico o químico necesario para la destrucción de los organismos patógenos que pudieran contener.
- **Tipo 5: Reuso agrícola en cultivos no alimenticios.** Riego de pastos de piso, forrajes, cultivos de fibras y semillas, y otros cultivos no alimenticios.
- **Tipo 6: Reuso recreativo.** Reuso en cuerpos de agua artificiales donde pueda existir un contacto ocasional (por ejemplo: pesca, canotaje y navegación).
- **Tipo 7: Reuso paisajístico.** Aprovechamientos estéticos donde el contacto con el público no es permitido, y dicha prohibición esté claramente rotulada.
- **Tipo 8: Reuso en la construcción.** Compactación de suelos, control del polvo, lavado de materiales, producción de concreto.

De estas se propone solo tomar en cuenta como una alternativa de reuso de aguas residuales a los Tipos de Reuso 1 y 8, ya que en el caso de que la empresa decida ampliar sus instalaciones, ésta podría contar con agua para lavar materiales de construcción, para producir concreto y controlar el polvo, además de diseñar una red de tubería que aproveche el agua de reuso para utilizarla en los inodoros. Aunado a esto, la empresa también podría aprovechar el agua de reuso para llenar el tanque de combate de incendios, así como para el riego de las zonas verdes que estén dentro de los límites del terreno.

El Reglamento también menciona en su Artículo 31 los parámetros de análisis obligatorio para el reuso de aguas residuales especiales, siendo estos los siguientes: caudal, demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_{5,20}$ ), demanda química de oxígeno (DQO), potencial de hidrógeno (pH), grasas y aceites (GyA), sólidos sedimentables (SSed),

sólidos suspendidos totales (SST), temperatura (T), coliformes fecales (CF), nemátodos intestinales (NI), además también se agrega un análisis de metales pesados, esto según la Tabla 1 del Reglamento mediante el código CIU-32100. Además, los límites máximos para el reuso de aguas residuales especiales se establecen con base en las Tablas 4, 5, 6 y 8 del Reglamento y se resumen en el Cuadro 3.1.

**Cuadro 3.1.** Límites máximos para el reuso de aguas residuales especiales (Fuente).

<b>Parámetro</b>	<b>Límite Máximo</b>
DBO <sub>5,20</sub>	50 mg/L
DQO	150 mg/L
Potencial de hidrógeno (pH)	5 a 9
Grasas y aceites	30 mg/L
Sólidos sedimentables	1 mL/L
Sólidos suspendidos totales	50 mg/L
Temperatura	15 °C a 40 °C
Coliformes fecales*	1000 NMP/100 mL
Nemátodos intestinales*	1 huevo por litro
Cobre	0,5 mg/L
Estaño	2 mg/L
Níquel	1 mg/L

\*Límites máximos para el reuso de aguas residuales Tipo 1 y 8

Por último, el Reglamento en su Artículo 36 especifica que las frecuencias mínimas de muestreo y análisis para el reuso de aguas residuales de las mediciones rutinarias del caudal, pH, sólidos sedimentables y la temperatura según el reuso Tipo 1 serían de manera quincenal, mientras que para el reuso Tipo 8 serían trimestrales y que, el análisis periódico del caudal, pH, sólidos sedimentables, temperatura, DBO, DQO, grasas y aceites, sólidos suspendidos totales, coliformes fecales, nemátodos intestinales y metales pesados se deben realizar de acuerdo a la frecuencia definida para el reporte operacional tanto para reuso Tipo 1 como para el Tipo 8.



## **CAPÍTULO 4**

### **SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA EMPRESA DE ESTUDIO**

La empresa de estudio cuenta con diferentes etapas de un sistema de tratamiento de aguas residuales que es capaz de purificar agua de ciudad, recuperar metales preciosos, reutilizar los enjuagues del proceso de recubrimiento metálico y tratar los efluentes ácidos, cáusticos y con presencia de metales pesados para que la descarga de dicha planta cumpla con los parámetros de calidad nacionales, la cual es enviada hacia la planta de tratamiento de la zona Franca.

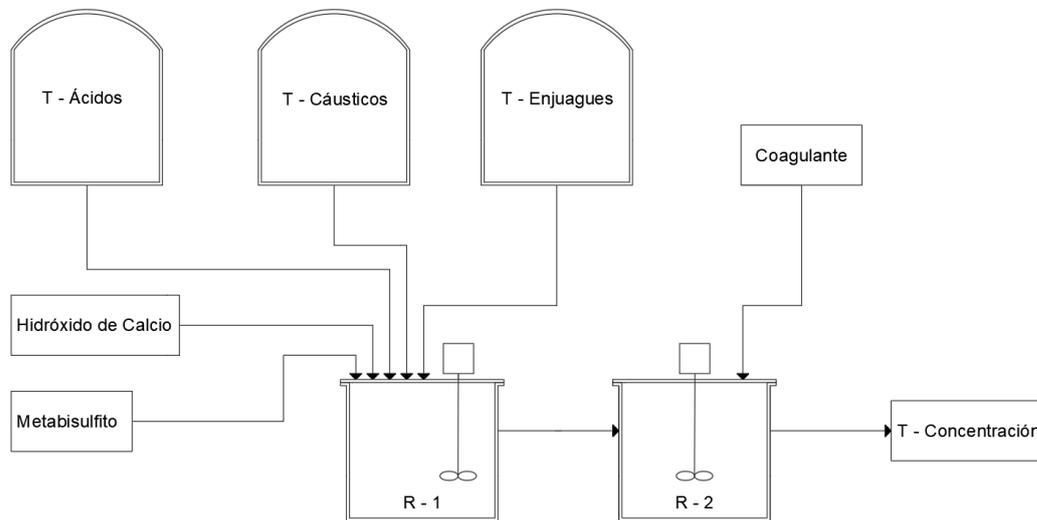
El presente trabajo buscó proponer una mejora al proceso de reutilización que ya se tiene en la empresa, sin descuidar el cumplimiento de los parámetros de calidad nacionales. Por lo tanto, como primer paso fue importante conocer dicha planta desde sus inicios hasta la actualidad.

#### **4.1. Antecedentes**

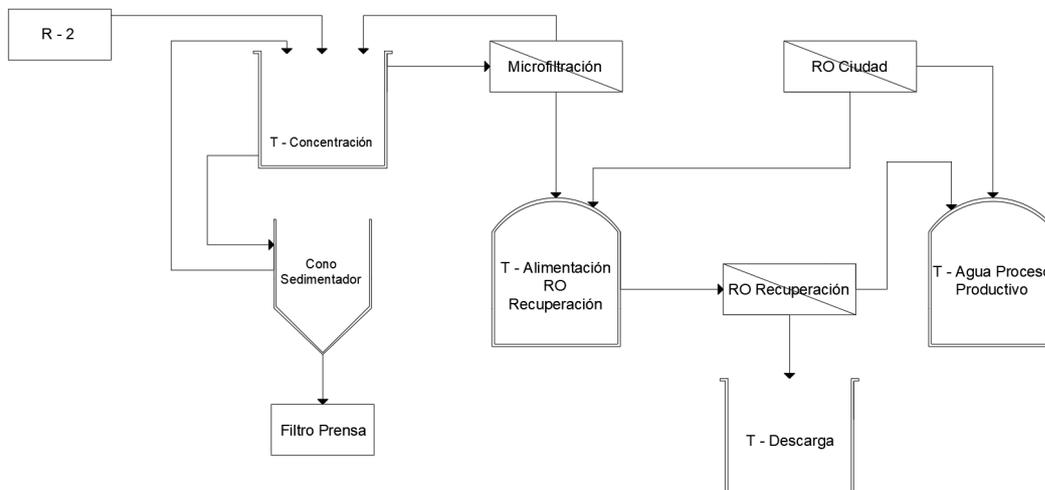
En un inicio la planta contaba con sistema para tratar el agua de ciudad, otro para recuperar metales preciosos y un tren de equipos para reutilizar el agua proveniente del proceso. Actualmente, el primer sistema tuvo mejoras y el último se dividió en dos procesos distintos como se mostrará más adelante en este capítulo.

Lo importante a destacar en el diseño original es que el tren de recuperación no solo recuperaba los enjuagues del proceso productivo, sino que también intentaba recuperar los demás efluentes provenientes del proceso de recubrimiento metálico. Como se muestra en las Figuras 4.1 y 4.2, el sistema de recuperación consistía en un proceso de reacción química el cual tenía como flujos de entrada los tanques T-Ácidos, T-Cáusticos y T-Enjuagues; un tanque de concentración o T-Concentración para sedimentar metales pesados; un sistema de membranas de microfiltración, cuyo rechazo se dirigía al T-Concentración y el permeado alimentaba el T-Alimentación de la ósmosis inversa (RO) de Recuperación, junto con el rechazo de la ósmosis

inversa del agua de ciudad; y por último, un equipo de ósmosis inversa o RO Recuperación, que enviaba el rechazo al T-Descarga y el permeado al T-Agua del Proceso Productivo, junto con el permeado de la RO del agua de ciudad.



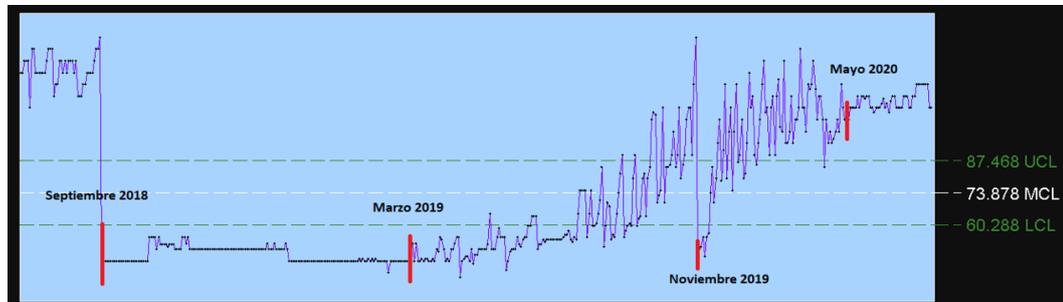
**Figura 4.1.** Sistema de reacción química de la planta de tratamiento de aguas residuales en sus inicios. Elaboración propia.



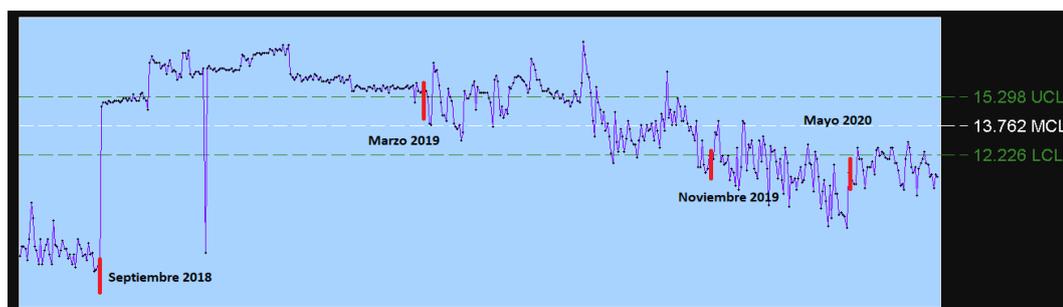
**Figura 4.2.** Sistema de recuperación del agua del proceso productivo de la empresa de estudio en sus inicios. Elaboración propia.

Esto generó muchos problemas en el desempeño de la planta, ya que el agua residual con presencia de una mayor cantidad de metales pesados, ácidos y cáusticos cargaban consigo moléculas con un tamaño lo suficientemente grandes como para obstruir las membranas del equipo de ósmosis inversa utilizado para recuperar el agua residual.

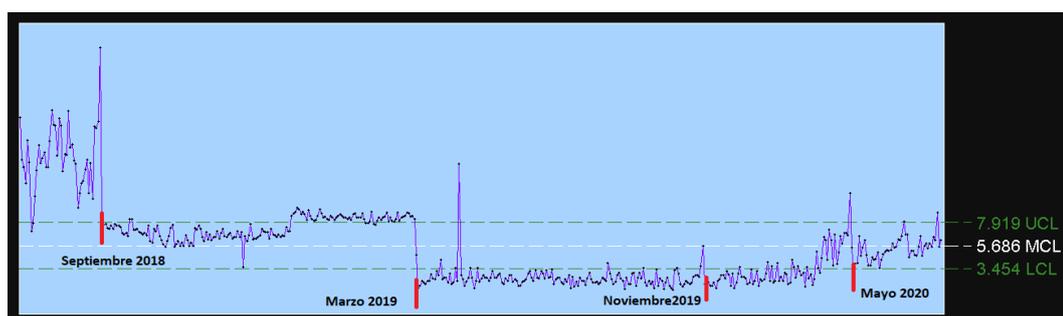
Al observar estas dificultades, los encargados de la planta realizaron varias pruebas para poder determinar un camino más adecuado para los efluentes mencionados.



**Figura 4.3.** Variación de presión de la ósmosis inversa de recuperación. Tomado de la empresa de estudio.



**Figura 4.4.** Variación del flujo de permeado de la ósmosis inversa de recuperación. Tomado de la empresa de estudio.



**Figura 4.5.** Variación de conductividad de la ósmosis inversa de recuperación. Tomado de la empresa de estudio.

Como se muestra en el gráfico de control de la Figura 4.3, anterior a la fecha de setiembre de 2018, el parámetro de presión se encontraba por encima del límite superior de las especificaciones requeridas y como se mencionó anteriormente, esto se

pudo deber a la entrada de un efluente que contenía partículas sólidas que obstruían las membranas de la ósmosis inversa de recuperación. Esta condición provocó una disminución en el flujo de permeado de recuperación de dicho equipo, tal y como se observa en la Figura 4.4, y a su vez, también estos sólidos disueltos repercuten en los valores de conductividad que están por encima de especificación, Figura 4.5.

Debido a esta condición, en setiembre de 2018 la ósmosis inversa de recuperación se empezó a alimentar con agua de ciudad, y aunque en ese momento no se recuperó agua del proceso, se logró observar una disminución en los valores de presión y conductividad, y un aumento en el flujo del permeado. Con esto, se pudo concluir que el sistema de recuperación trabaja de forma más eficiente con un efluente bajo en sólidos disueltos y que debía ser más robusto para no permitir la entrada de partículas que obstruyeran las membranas.

A partir de marzo de 2019, el sistema de recuperación que ya contaba con un flujo de entrada proveniente de las aguas del proceso, más específico, solo los enjuagues del proceso productivo, tuvo una leve mejoría sobretodo en el parámetro de conductividad. En dicha fecha se corrigió un problema microbiológico que estaba afectando a las tuberías y las membranas de éste sistema, se colocaron lámparas UV y se empezó a dosificar biocida en el tanque de pretratamiento, el cual se mencionará mas adelante. Aún así, el flujo de permeado no aumentó de manera significativa y la presión tampoco disminuyó, con lo que se pudo concluir que el sistema todavía contaba con una gran cantidad de sólidos disueltos.

En noviembre de 2019 se cambiaron las membranas de la ósmosis inversa, lo que generó una disminución tanto en la presión como en la conductividad, y por último, se observó un aumento en el flujo del permeado. Aunque se dieron las condiciones anteriores con el cambio de membranas, esto no tuvo un mayor impacto en el sistema de recuperación mas que el de mantener la conductividad dentro de especificación.

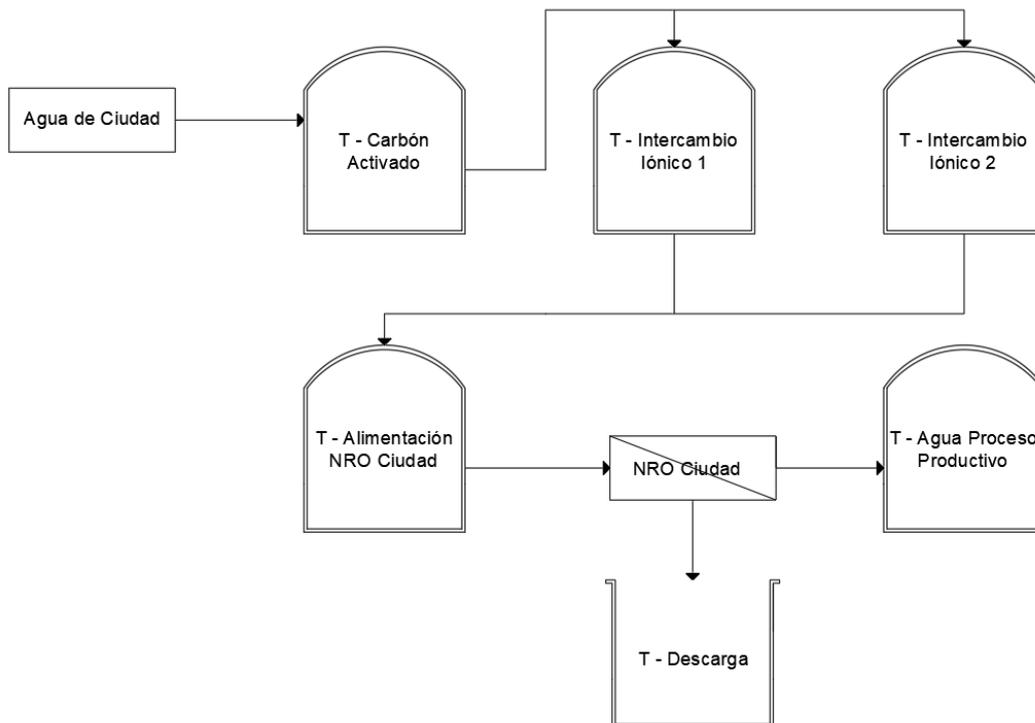
Por último, los gráficos de control muestran que a partir de mayo de 2020 la conductividad disminuyó y se suavizaron más los valores de la caída del flujo de permeado y el aumento de presión. Estos cambios se dieron gracias a la implementación de tanques de carbón activado en el sistema de recuperación.

Como se observó en los gráficos de control, el sistema de recuperación de la empresa se ha ido modificando a lo largo del tiempo y han ocurrido acontecimientos puntuales que han tenido efecto directo en los parámetros de interés, pero aún así no ha sido suficiente para tener un mayor flujo de recuperación del agua del proceso productivo. Es por esto que la empresa ha hecho esfuerzos por mejorar este sistema, con bases sólidas que fundamenten de manera adecuada cualquier modificación que se requiera hacer, y de ahí la necesidad de un proyecto que abarque más aspectos de los que se han estudiado con anterioridad.

## 4.2. Sistema actual de tratamiento del agua potable

Como se mencionó anteriormente, el sistema para tratar agua de ciudad tuvo mejoras sustanciales con respecto a los inicios de la planta de tratamiento, ya que se adquirieron equipos nuevos y el sistema viejo actualmente es utilizado como un respaldo cuando alguno de los equipos de membranas está en mantenimiento preventivo o correctivo. Como se observa en la Figura 4.6, el agua de ciudad pasa primero por un tanque de carbón activado, el cual ayuda a eliminar el cloro residual que posee el agua potable y que puede dañar las membranas de la nueva ósmosis inversa; luego se dirige a dos tanques de resina de intercambio iónico que funcionan en paralelo y reducen la dureza al agua potable, para evitar que se den incrustaciones en el equipo de membranas; por último, el flujo alimenta al equipo de ósmosis inversa, el cual se utiliza como método de purificación del agua que se dirige al proceso productivo de *plating* y disminuye de manera considerable la conductividad de la misma, con el fin de cumplir con los parámetros de pureza de agua tipo II mencionados en el capítulo anterior.

Luego que el flujo pasa por el equipo de ósmosis inversa *New Reverse Osmosis* (NRO) de ciudad, se divide en dos, el permeado es enviado al tanque T-Agua de proceso productivo mencionado en la Figura 4.1 y el rechazo se envía al tanque T-Descarga. Este último flujo es uno de los efluentes que se analizarán en este proyecto, ya que en promedio se descargan  $37 \text{ m}^3/\text{día}$  aproximadamente y de los tres efluentes a analizar, este representa un 49% del total que se desea recuperar.



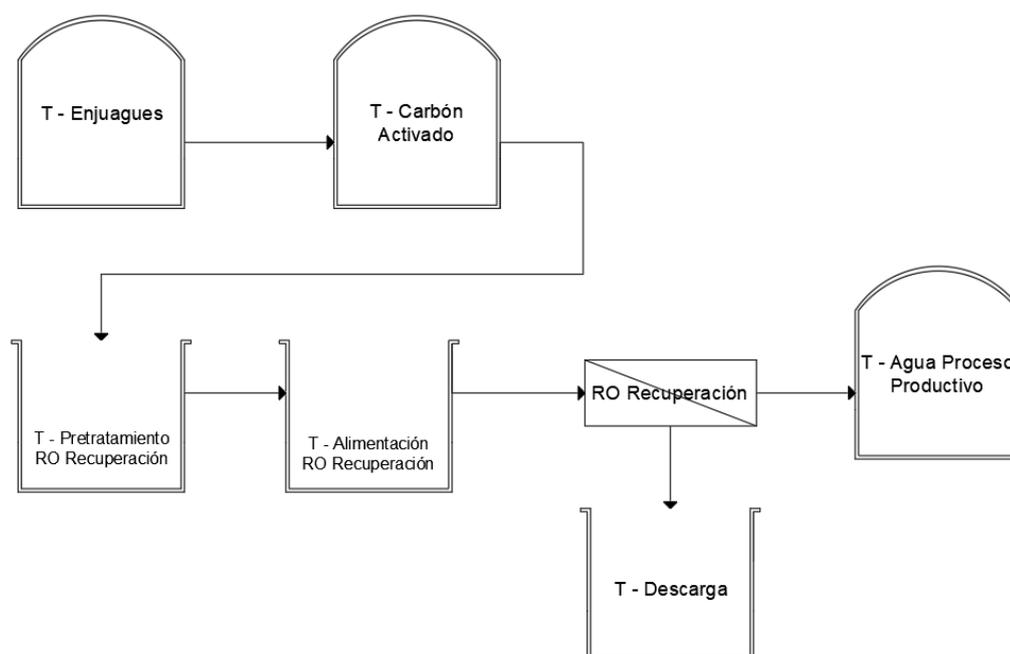
**Figura 4.6.** Sistema actual de tratamiento del agua potable de la empresa de estudio. Elaboración propia.

### 4.3. Sistema actual de recuperación de agua del proceso productivo

La segunda sección que fue objeto de estudio, consistió en el sistema que recupera el agua de los enjuagues del proceso productivo. Como se mencionó en los antecedentes de este capítulo el sistema de recuperación se dividió en dos procesos, lo cual se puede observar al comparar las Figuras 4.2 y 4.7. Dicho proceso consta de un tanque de almacenamiento de enjuagues o T-Enjuagues; unos filtros de carbón activado, que eliminan materia orgánica, grasas y aceites provenientes del proceso de *plating*; un tanque de pretratamiento, donde se realiza el ajuste del pH, se adiciona antiincrustante para proteger a las membranas de incrustaciones, además el tanque posee lámparas UV y se le adiciona biocida de manera intermitente, con el fin de eliminar algas o cualquier otro microorganismo que pueda dañar las membranas de la RO de recuperación; a su vez, el sistema cuenta con un tanque para almacenar el agua proveniente del T-Pretratamiento y por último, se encuentra la ósmosis inversa de

recuperación, cuyo permeado se envía al T-Agua de proceso productivo y el rechazo al T-Descarga.

El rechazo de dicho sistema fue el segundo efluente a analizar en este proyecto, en promedio se descargan 18 m<sup>3</sup>/día aproximadamente y de los tres efluentes a analizar, éste representa un 24 % del total que se desea recuperar.

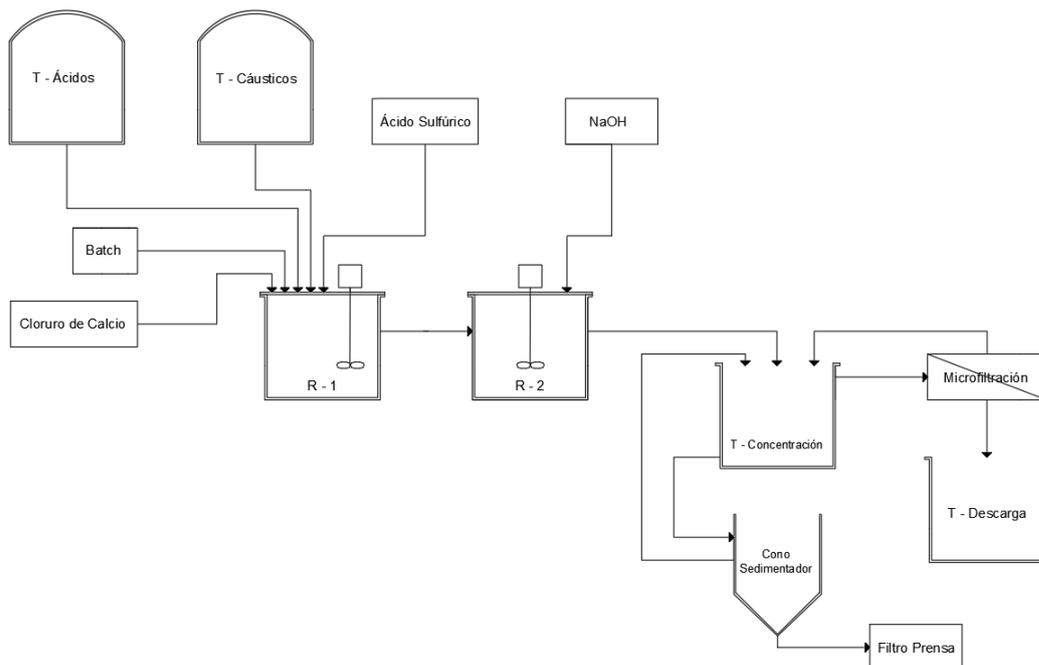


**Figura 4.7.** Sistema actual de recuperación de agua del proceso productivo de la empresa de estudio. Elaboración propia.

#### 4.4. Tren actual de reacción química

El tercer y último efluente de estudio fue el tren actual de reacción química, el cual tuvo varias modificaciones a lo largo del tiempo y se pueden observar al comparar las Figuras 4.1 y 4.8. Dicho sistema está compuesto por un primer tanque de reacción química o R-1, el cual se alimenta de las aguas residuales ácidas (T-Ácidos), cáusticas (T-Cáusticos), del proceso discontinuo utilizado para precipitar metales de las aguas que caen en la trinchera del piso, de una disolución de cloruro de calcio que bajo condiciones ácidas reacciona con los metales debido a la solvatación del cloruro de calcio en agua y cuyo fin es evitar la formación de quelatos, y de una disolución

de ácido sulfúrico para obtener las condiciones ácidas necesarias para la reacción mencionada anteriormente. El segundo tanque de reacción o R-2 proporciona las condiciones adecuadas de pH para que los metales pesados precipiten en su forma de hidróxido, como se observa en la Figura 4.9, y es por esto que dicho tanque se alimenta de una disolución de hidróxido de sodio; al igual que el sistema viejo (sección 4.1.), luego del segundo tanque de reacción el flujo es enviado a un tanque de concentración o T-Concentración, cuyo propósito es concentrar el agua de R-2 para separar los hidróxidos formados y que estos puedan sedimentar adecuadamente y ser enviados al cono sedimentador; por último, el equipo de microfiltración es alimentado por el tanque T-Concentración, donde el rechazo se redirige al T-Concentración y el permeado es enviado al T-Descarga.



**Figura 4.8.** Tren actual de reacción química de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa de estudio. Elaboración propia.

El permeado de éste sistema de reacción fue el tercer efluente a analizar en este proyecto, en promedio se descargan  $21 \text{ m}^3/\text{día}$  aproximadamente y de los tres efluentes a analizar, éste representa un 27% del total que se desea recuperar.

#### 4.4.1. Proceso Batch

El proceso batch o proceso discontinuo es un tratamiento manual aplicado a las aguas provenientes de la trinchera del piso de producción, la cual tiene altas concentraciones de níquel, estaño y cobre. El proceso es muy similar al citado en la sección anterior del tren de reacción, primero se ajusta el pH a condiciones ácidas y se agregan manualmente cloruro de calcio y sulfato de hierro heptahidrato, para estabilizar las cargas de los metales con el ion cloruro y para romper los quelatos que se formen, en especial los quelatos de cobre que son separados gracias a la adición del sulfato de hierro; luego se aumenta el pH con una disolución de hidróxido de sodio hasta alcanzar el pH adecuado para la precipitación de los metales en los hidróxidos correspondientes, tal y como se observa en la Figura 4.9. Una vez alcanzado el pH alcalino, se agrega floculante como acelerador de la sedimentación, ya que el floculante aglomera las moléculas formando flóculos de mayor tamaño y peso, los cuales precipitan de manera más sencilla. Por último, los lodos son enviados al filtro prensa y el clarificado se envía al tren de reacción. Cabe destacar que este es un proceso manual que no es constante en el tiempo; por lo tanto, su incidencia se ve reflejada en el efluente final del proceso del tren actual de reacción química.

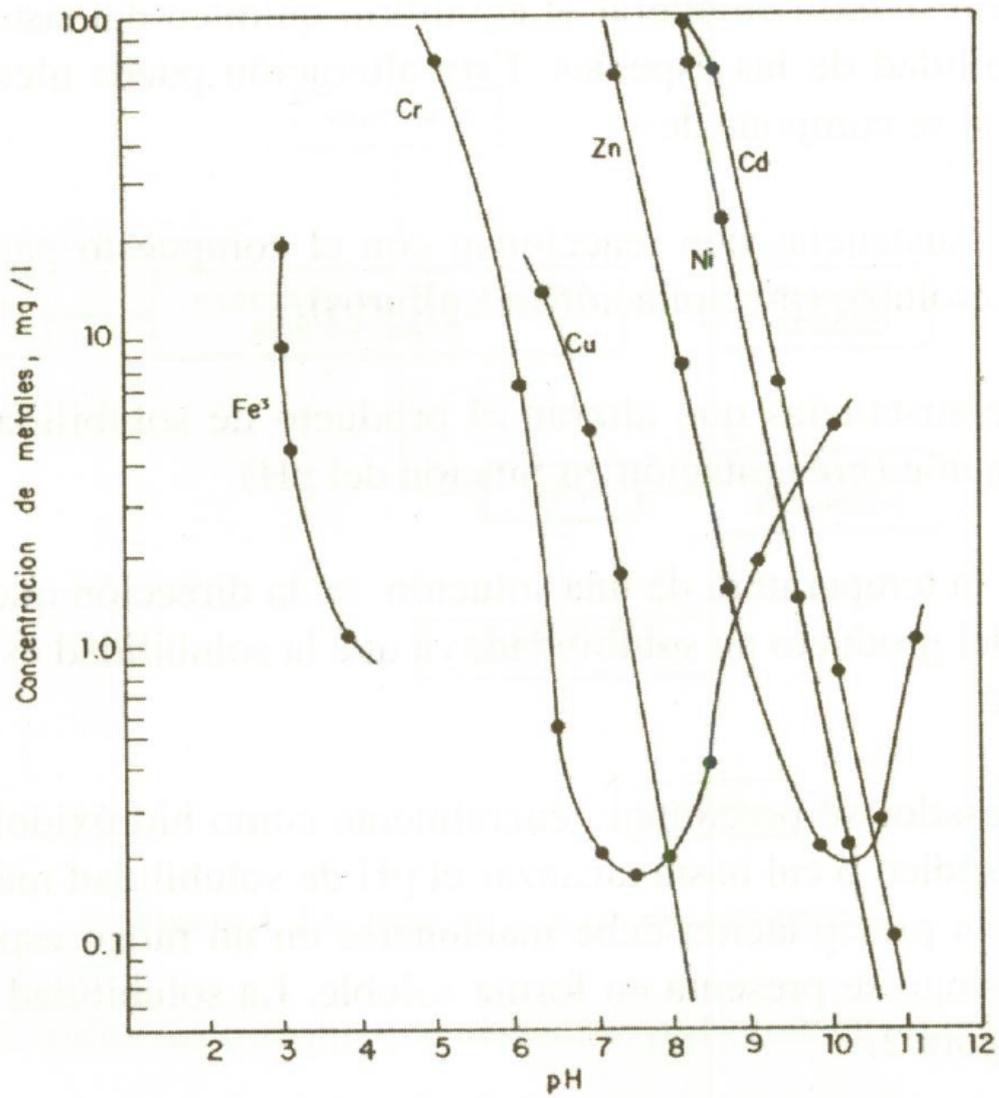


Figura 4.9. Solubilidad de hidróxidos metálicos en función del pH (Kaifer, 2006)

## **CAPÍTULO 5**

### **CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES**

En este capítulo se describirá el muestreo y la preparación de la información que fue entregada a un laboratorio externo certificado, con el fin de que este realizara un análisis de caracterización de aguas residuales de las principales fuentes de descarga de la planta de estudio, descritas en el capítulo anterior.

Aunado a esto, se detallarán los resultados obtenidos en la segunda etapa de análisis de caracterización de aguas, la cual a diferencia de la primera, consiste en la variación de los parámetros a lo largo del tiempo.

#### **5.1. Información de las principales fuentes de descarga**

Con el fin de entregar una propuesta de análisis de caracterización de aguas, se debe conocer en primera instancia las principales fuentes de descarga a las cuales se les desea realizar dicho análisis. A continuación, se detallan cada una de las fuentes de descarga que son de interés para éste estudio.

##### **5.1.1. Sistema de tratamiento del agua de ciudad**

Como primer fuente de descarga, se determinó el sistema que trata el agua de ciudad que fue descrito en el capítulo anterior. El último equipo del sistema, nombrado como NRO Ciudad en la Figura 4.6, posee una entrada y dos salidas, la entrada es el afluente que pasó por el carbón activado y las resinas de intercambio iónico y las dos salidas son el permeado y el rechazo del equipo. En este caso, el efluente de interés es el rechazo, ya que éste es direccionado hacia el tanque de descarga. Dicho rechazo se compone de dos elementos principales, el agua de arrastre del sistema que contiene las sales que fueron separadas por las membranas y el retrolavado del equipo.

Como se logra apreciar, en este sistema no existe entrada de metales pesados del proceso productivo o de cualquier otro elemento que no sea el agua de ciudad.

Es por esto que, para este sistema solo se determinarán los parámetros básicos en la caracterización de aguas residuales industriales, detallados en el Capítulo 3 del presente documento. Asimismo, ampliando lo mencionado en la Sección 3.1.2, la alcalinidad del agua se debe a distintos elementos presentes en ella, entre los cuales Muñoz (2008) destaca la presencia de tres clases de iones principalmente: bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos. Muñoz (2008) en su texto también enumera otras clases de iones que se encuentran en aguas naturales, aunque su concentración puede llegar a variar dependiendo de la zona: cloruros, fluoruros, fosfatos, nitratos y sulfatos.

Por lo tanto, la propuesta de análisis de caracterización de aguas para el primer sistema es el siguiente: pH, temperatura, conductividad eléctrica, DBO, DQO, dureza total, grasas y aceites, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, sólidos totales disueltos, sustancias activas al azul de metileno, turbidez, calcio, potasio, bicarbonatos, cloruros, fluoruros, fosfatos, nitratos, sulfatos, hierro, magnesio, manganeso, sílice, silicio, sodio, coliformes fecales y nematodos intestinales. El laboratorio externo encargado de realizar dicho análisis tomó la muestra de manera puntual.

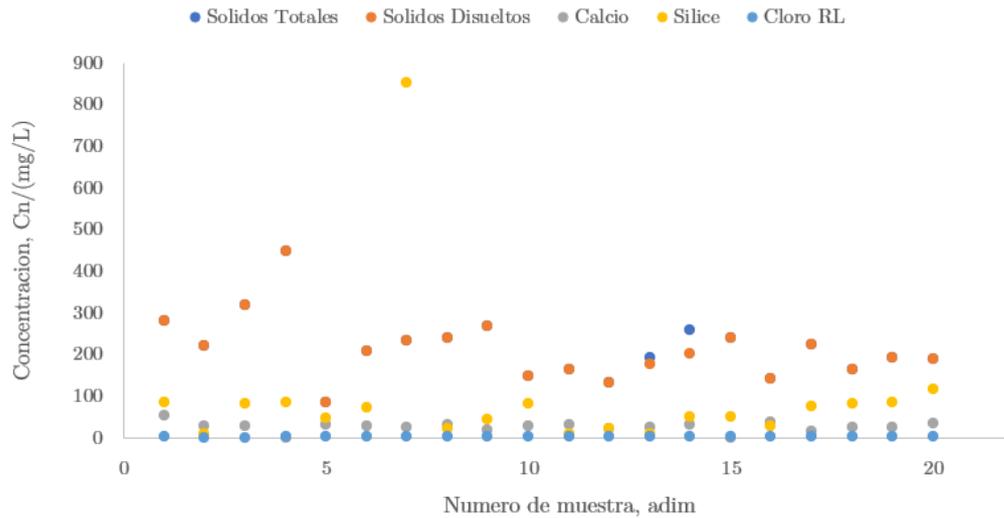
Los resultados obtenidos se observan en el Cuadro 5.1. Uno de los criterios más importantes a la hora de utilizar el agua en el proceso productivo es el valor de la conductividad, de la cual se obtuvo un valor de  $905 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Este valor difiere con respecto al valor requerido para el agua purificada de  $1 \mu\text{S}/\text{cm}$ , según lo mencionado en la Sección 3.3.1, por lo cual dicho efluente no cumple con las características para ser reutilizado en el proceso productivo. Bajo el mismo principio, los valores del sodio, cloruros y sílice, también difieren con los parámetros fisicoquímicos del agua purificada tipo II, con valores obtenidos de  $193 \text{ mg}/\text{L}$ ,  $36 \text{ mg}/\text{L}$  y  $174 \text{ mg}/\text{L}$  versus los valores requeridos de  $5 \mu\text{g}/\text{L}$ ,  $5 \text{ mg}/\text{L}$  y  $3 \mu\text{g}/\text{L}$ , respectivamente.

Asimismo, la empresa de estudio proporcionó datos de varios muestreos realizados al agua de ciudad que entra en la planta (Figura 5.10). En dicha figura se observan valores de sólidos totales, sólidos disueltos y sílice por encima de los  $100 \text{ mg}/\text{L}$ . Con estos datos se corroboran los resultados obtenidos del rechazo de la ósmosis inversa en el Cuadro 5.1, específicamente, los valores de sólidos totales disueltos y sílice.

**Cuadro 5.1.** Resultados obtenidos por medio de un laboratorio certificado del rechazo de la ósmosis inversa NRO. Elaboración propia.

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>
Caudal*	37 m <sup>3</sup> /día
DBO <sub>5,20</sub>	6,4 mg/L O <sub>2</sub>
DQO	72 mg/L
Potencial de hidrógeno (pH)	8,06
Grasas y aceites	<3,0 mg/L
Sólidos sedimentables	<0,1 mL/L
Sólidos suspendidos totales	<5,0 mg/L
Sólidos totales disueltos	896 mg/L
Temperatura	25,9 °C
Sustancias activas al azul de metileno	<0,05 mg/L
Conductividad	905 μS/cm
Dureza total	0,1 mg/L CaCO <sub>3</sub>
Turbidez	0,38 NTU
Coliformes fecales	<0,1 NMP/100 mL
Nemátodos intestinales	<0,1 huevo por litro
<b>Metales Totales</b>	
Hierro	<0,015 mg/L
Magnesio	0,061 mg/L
Manganeso	<0,003 mg/L
Sílice	174 mg/L
Silicio	81,5 mg/L
Sodio	193 mg/L
<b>Cationes +</b>	
Calcio	0,2100 mg/L
Potasio	5,3 mg/L
<b>Aniones -</b>	
Bicarbonatos	240 mg/L CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup>
Cloruros	36 mg/L
Fluoruros	2,0 mg/L
Fosfatos	6,29 mg/L
Nitratos	10 mg/L
Sulfatos	19 mg/L

\*El valor obtenido para el caudal fue proporcionado por la empresa en estudio



**Figura 5.10.** Variación de distintos parámetros del agua de ciudad que entra a la planta de tratamiento de aguas residuales, de mayo del 2017 a enero del 2020.

### 5.1.2. Sistema de recuperación de agua del proceso productivo

Se determinó como segunda fuente de descarga al sistema de recuperación de agua del proceso productivo, descrito en el capítulo anterior y que se puede observar en la Figura 4.7. En dicha figura se detallan los dos efluentes del último equipo del sistema llamado RO Recuperación, donde el permeado se dirige al tanque T-Agua de Proceso Productivo y el rechazo se envía al tanque de descarga. El efluente de interés es este último y al igual que el sistema anterior, este rechazo está constituido principalmente por el agua de arrastre del sistema y el retrolavado del equipo.

Aunque los primeros dos sistemas tienen una etapa final de ósmosis inversa, su diferencia radica en el agua que las mismas tratan, donde la primera trata agua de ciudad y la segunda agua del proceso productivo. Esto último conlleva a un análisis diferente sobre la calidad del afluente, ya que en el proceso productivo se utilizan las celdas electrolíticas de los distintos metales que recubren las piezas producidas. Como se mencionó en la Sección 2.1, cada etapa del proceso de galvanoplastia tiene un lavado o enjuague de las piezas, con el fin de eliminar cualquier residuo que pueda contaminar la etapa posterior. Estos enjuagues se dirigen al tanque T-Enjuagues y se detallan de la siguiente manera:

- Enjuague posterior a la celda de *cleaner*: efluente compuesto de grasas, aceites, elementos alcalinos (hidróxido de sodio), pero en su mayoría agua.
- Enjuague posterior a la celda de ácido activador: efluente con presencia de compuestos ácidos (ácido sulfúrico), cobre (material base), impurezas como hierro y zinc, pero en su mayoría agua.
- Enjuague posterior a la celda de níquel: efluente compuesto en su mayoría por níquel y agua.
- Enjuague posterior a la celda de oro: para este efluente en especial solo se determinará cobalto, utilizado como compuesto para endurecer al oro, ya que el metal precioso conlleva otro proceso de recuperación que no se detallará en este documento.
- Enjuague posterior a la celda de estaño: efluente compuesto en su mayoría por estaño y agua.

Por lo tanto, para este segundo sistema se propuso realizar el análisis de caracterización de los mismos parámetros de la sección anterior, agregando los siguientes: cobalto, cobre, estaño, níquel y zinc. Dichos resultados se pueden observar en el Cuadro 5.2.

### 5.1.3. Sistema del tren de reacción

Como última fuente de descarga, se estableció el sistema del tren de reacción química descrito en el capítulo anterior y que se observa en la Figura 4.8. En dicha figura se observa que el tercer efluente en estudio es el permeado del equipo de microfiltración. Por lo tanto, para determinar los parámetros de análisis, se segregaron las entradas del sistema en lo siguiente:

- T-Ácidos: efluente compuesto por los *Drag-out* o baños de níquel y estaño, celdas de los ácidos activadores (ácido sulfúrico), lavados de los ánodos de níquel y estaño, celda de la estación de ácido nítrico (lavados de placas) y agua en concentraciones más bajas que lo detallado en la sección anterior.

**Cuadro 5.2.** Resultados obtenidos por medio de un laboratorio certificado del rechazo de la ósmosis inversa RO Recuperación. Elaboración propia.

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>
Caudal*	18 m <sup>3</sup> /día
DBO <sub>5,20</sub>	52,3 mg/L O <sub>2</sub>
DQO	113 mg/L
Potencial de hidrógeno (pH)	7,57
Grasas y aceites	<3,0 mg/L
Sólidos sedimentables	<0,1 mL/L
Sólidos suspendidos totales	<5,0 mg/L
Sólidos totales disueltos	36,0 mg/L
Temperatura	28,1 °C
Sustancias activas al azul de metileno	<0,045 mg/L
Conductividad	164 μS/cm
Dureza total	0,1 mg/L CaCO <sub>3</sub>
Turbidez	0,68 NTU
Coliformes fecales	<0,1 NMP/100 mL
Nemátodos intestinales	<0,1 huevo por litro
<b>Metales Totales</b>	
Cobalto	0,240 mg/L
Cobre	0,24 mg/L
Estaño	0,922 mg/L
Hierro	0,041 mg/L
Magnesio	<0,0015 mg/L
Manganeso	<0,003 mg/L
Níquel	0,277 mg/L
Sílice	0,92 mg/L
Silicio	0,43 mg/L
Sodio	24 mg/L
Zinc	0,007 mg/L
<b>Cationes +</b>	
Calcio	0,0720 mg/L
Potasio	4,3 mg/L
<b>Aniones -</b>	
Bicarbonatos	32,9 mg/L CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup>
Cloruros	2,3 mg/L
Fluoruros	0,11 mg/L
Fosfatos	<0,44 mg/L
Nitratos	0,67 mg/L
Sulfatos	25 mg/L

\*El valor obtenido para el caudal fue proporcionado por la empresa en estudio

- T-Cáusticos: efluente compuesto por los *cleaners* de las líneas y por los lavados del *tooling* utilizado en las líneas de producción.
- Proceso Batch: efluente compuesto por níquel, estaño, cobre, cloruro de calcio, sulfato de hierro e hidróxido de sodio.
- Cloruro de calcio.
- Ácido sulfúrico.
- Hidróxido de sodio.

Con esta información, se determinó que para este tercer sistema el análisis de caracterización propuesto es el mismo que el de la sección anterior, ya que, como se puede observar, en el sistema de reacción entran prácticamente los mismos compuestos que ya se han ido mencionando en este capítulo. Dichos resultados se pueden observar en el Cuadro 5.3.

## **5.2. Metodología y muestreo del análisis de caracterización de aguas residuales a lo largo del tiempo**

A diferencia del análisis de caracterización de la sección anterior (puntual), en esta sección se detallará el análisis realizado a lo largo del tiempo, utilizando los diferentes equipos disponibles en la empresa. Dicho análisis se realizó con el fin de verificar el comportamiento de los distintos efluentes y generar una idea más robusta sobre los posibles métodos a utilizar para poder cumplir con el reuso de las aguas residuales de estudio.

Para la caracterización de las tres fuentes de descarga se extrajeron muestras representativas de las siguientes secciones: entrada y rechazo de la unidad NRO ciudad, entrada y rechazo RO recuperación, y por último, entrada y permeado de microfiltración. Esto se realizó una vez por semana durante un período de 7 semanas.

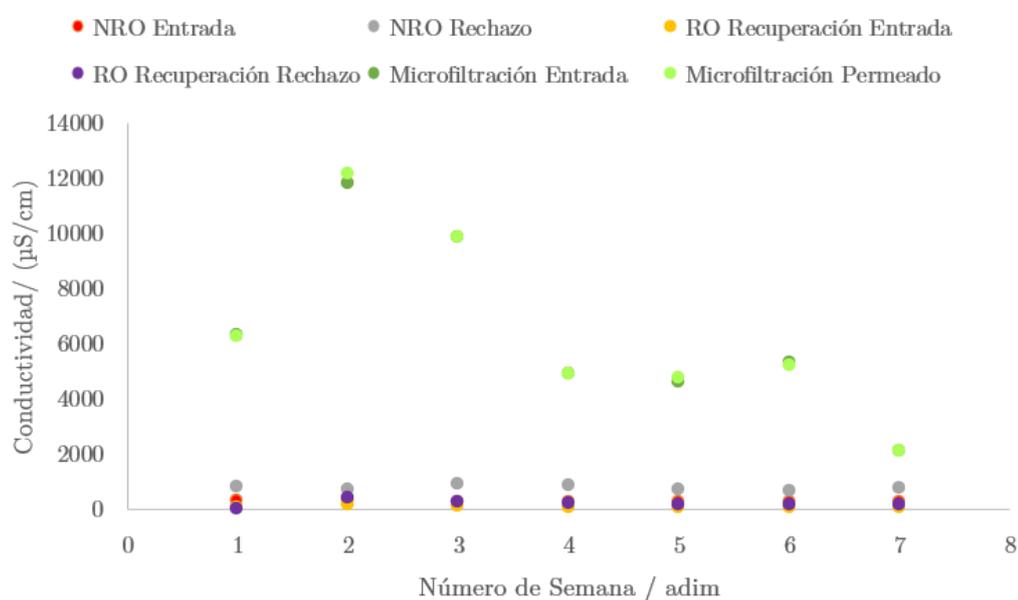
**Cuadro 5.3.** Resultados obtenidos por medio de un laboratorio certificado del permeado de microfiltración. Elaboración propia.

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>
Caudal*	21 m <sup>3</sup> /día
DBO <sub>5,20</sub>	138 mg/L O <sub>2</sub>
DQO	359 mg/L
Potencial de hidrógeno (pH)	10,2
Grasas y aceites	<3,0 mg/L
Sólidos sedimentables	<0,1 mL/L
Sólidos suspendidos totales	9 mg/L
Sólidos totales disueltos	3860 mg/L
Temperatura	26,1 °C
Sustancias activas al azul de metileno	<0,9 mg/L
Conductividad	5440 µS/cm
Dureza total	374 mg/L CaCO <sub>3</sub>
Turbidez	6,87 NTU
Coliformes fecales	1 NMP/100 mL
Nemátodos intestinales	<0,1 huevo por litro
<b>Metales Totales</b>	
Cobalto	0,248 mg/L
Cobre	0,25 mg/L
Estaño	0,466 mg/L
Hierro	<0,015 mg/L
Magnesio	0,6350 mg/L
Manganeso	<0,003 mg/L
Níquel	1,28 mg/L
Sílice	6,6 mg/L
Silicio	3,07 mg/L
Sodio	9,7 mg/L
Zinc	0,025 mg/L
<b>Cationes +</b>	
Calcio	148,5 mg/L
Potasio	76 mg/L
<b>Aniones -</b>	
Bicarbonatos	115 mg/L CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup>
Cloruros	6,8 mg/L
Fluoruros	1,8 mg/L
Fosfatos	<0,44 mg/L
Nitratos	1,5 mg/L
Sulfatos	43 mg/L

\*El valor obtenido para el caudal fue proporcionado por la empresa en estudio

### 5.2.1. Conductividad

Como primer parámetro, se midió la conductividad para cada una de las muestras mencionadas anteriormente. La conductividad, como se explicó en los Capítulos 3 y 4, es uno de los parámetros utilizados como valor referente para que el agua se dirija al proceso productivo o se dirija al tanque de descarga. Es por esto, que dicho parámetro es monitorizado constantemente tanto en las líneas de producción como en la planta de tratamiento de aguas residuales.



**Figura 5.11.** Variación de la conductividad por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia.

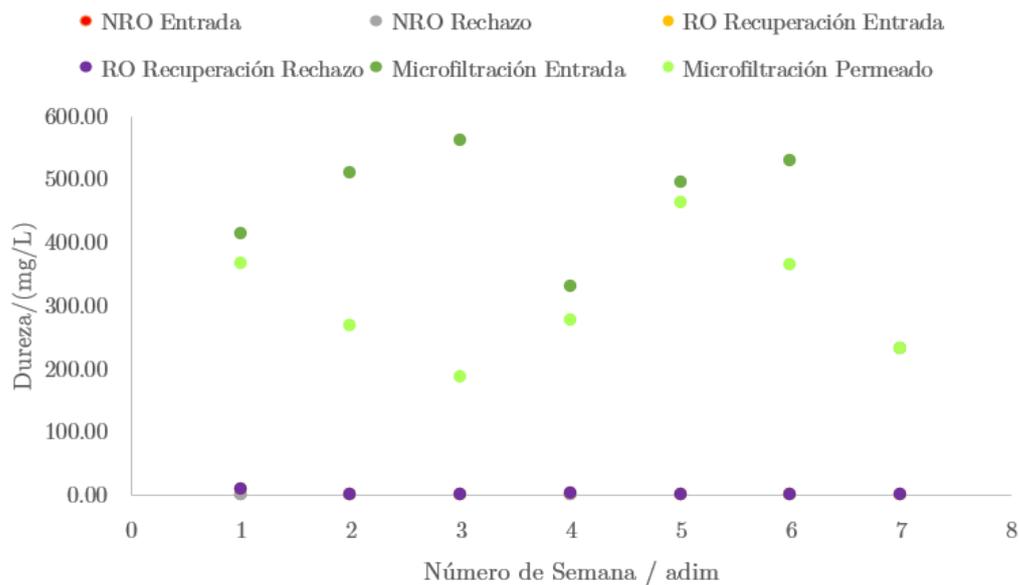
Para este análisis se utilizó un conductímetro marca Oakton y los valores obtenidos se presentan en la Figura 5.11. En dicha figura se pueden observar valores mayores a los  $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$  para el tren de reacción, lo que concuerda con el análisis entregado por el laboratorio certificado (Cuadro 5.3), y valores menores a los  $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$  tanto para el sistema de tratamiento del agua de ciudad como el sistema de recuperación de agua del proceso productivo, los cuales también coinciden con los datos mostrados en los Cuadros 5.1 y 5.2.

Cabe destacar que, aunque el mayor inconveniente se encuentra en el sistema del tren de reacción, ninguno de los tres sistemas se acercan al valor necesario para

obtener agua ultrapura del tipo II. Es por esto, que la conductividad es uno de los parámetros de mayor relevancia a la hora de tomar una decisión con respecto a los tratamientos a utilizar.

### 5.2.2. Dureza

La dureza, como se mencionó en capítulos anteriores, es un parámetro químico que se mide debido a la posible generación de incrustaciones en los equipos de membranas utilizados en la planta de aguas residuales. Es por esto que, al igual que en el análisis de caracterización anterior, la dureza se midió con el fin de observar variaciones en cada uno de los sistemas. Para esto se utilizó un kit de prueba de dureza marca Hanna Instruments y los resultados se muestran en la Figura 5.12.



**Figura 5.12.** Variación de la dureza por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia.

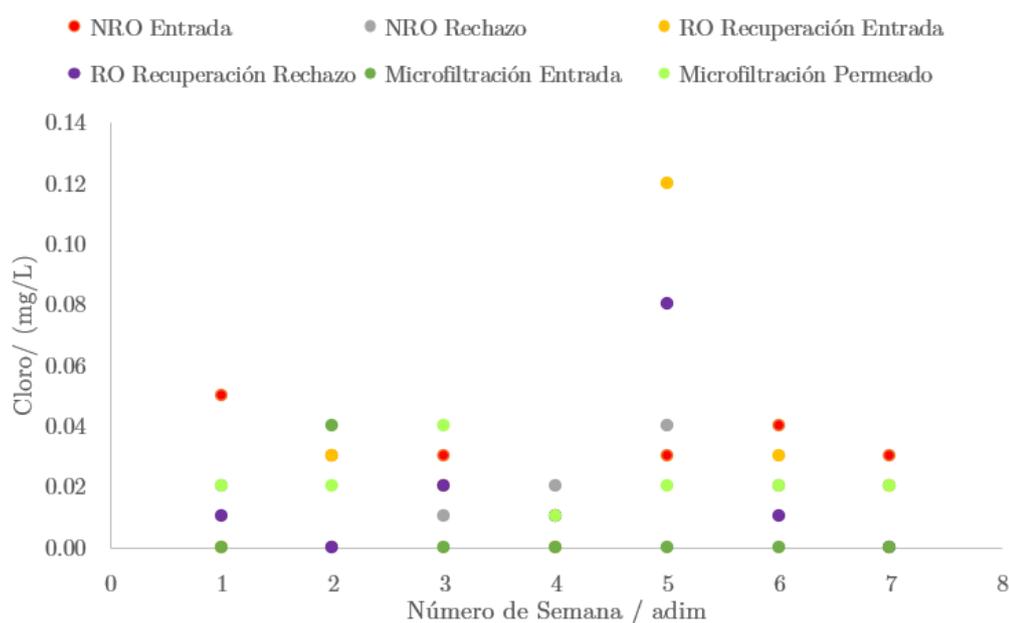
En dicha figura, se observan valores mayores a los 200 mg/L  $\text{CaCO}_3$  para el tren de reacción y valores cercanos a 0 mg/L  $\text{CaCO}_3$  para los otros dos sistemas. Esto también concuerda tanto con los datos proporcionados por el laboratorio certificado como con las entradas a cada uno de los sistemas. Como se mencionó en la sección 5.1.3, el tren de reacción tiene una entrada de cloruro de calcio al sistema, por lo

que la concentración de calcio en dicho sistema aumenta y por ende, la dureza del sistema.

### 5.2.3. Cloro

El cloro residual es uno de los parámetros cuyo seguimiento es de gran importancia, ya que, el cloro puede llegar a dañar las membranas de ósmosis inversa o bien puede ayudar en el proceso de desinfección debido a la carga orgánica que se encuentra fuera de parámetros, la elección se determinó con base en los resultados obtenidos por medio del laboratorio certificado expuestos anteriormente.

Al ser una medición de campo se utilizó un colorímetro portátil marca HACH DR900, el cual utiliza N,N-dietilparafenilendiamina (DPD) como reactivo para la determinación del cloro residual libre. La medición se realizó casi inmediatamente después de tomada la muestra, ya que el cloro se reduce con la luz.



**Figura 5.13.** Variación del cloro residual por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 5.13, los valores no ascienden los 0.14 mg/L, lo que permite tener más flexibilidad en la propuesta de mejora del sistema de tratamiento de aguas residuales, siendo innecesario un equipo que disminuya este

valor por debajo de los valores obtenidos y en su lugar una propuesta sea aumentar este parámetro, con el fin de disminuir la carga orgánica en el sistema. Asimismo, es importante saber que el cloro residual libre no solo se reduce mediante la luz (solar o luz fuerte), sino que también se ve reducido por sales ferrosas (Rojas, 2002) como es el caso del tren de reacción, el cual utiliza sulfato ferroso en el proceso batch.

Cabe destacar que en la Figura 5.13 existen variaciones en los valores obtenidos, principalmente en el sistema de recuperación RO recuperación, esto se debe a que, en dicho proceso se utiliza biocida para eliminar cualquier rastro de microorganismos que puedan llegar a las líneas de producción, y este biocida pudo haber interferido en la medición de cloro residual. A su vez, los valores de la entrada del equipo NRO coinciden con los observados en la Figura 5.10, los cuales no superan los 0.6 mg/mL.

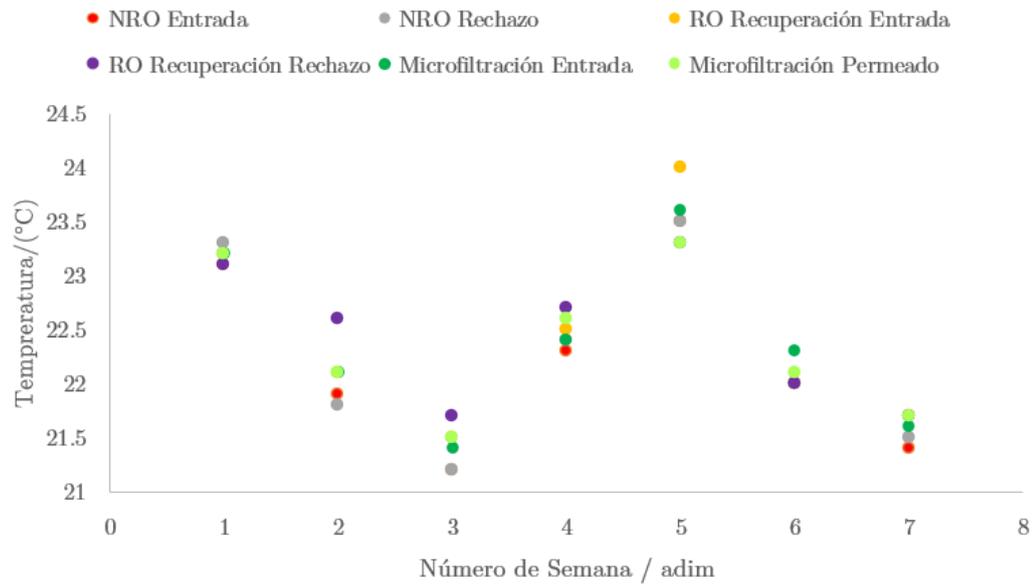
#### **5.2.4. Temperatura**

La temperatura aunque es un parámetro que en la planta de tratamiento de aguas residuales no sufre de muchas variaciones, es importante describir su comportamiento con el fin de observar cualquier anomalía que se presente y que haga que este parámetro esté fuera de especificación con respecto al límite permitido destacado en el Capítulo 3.

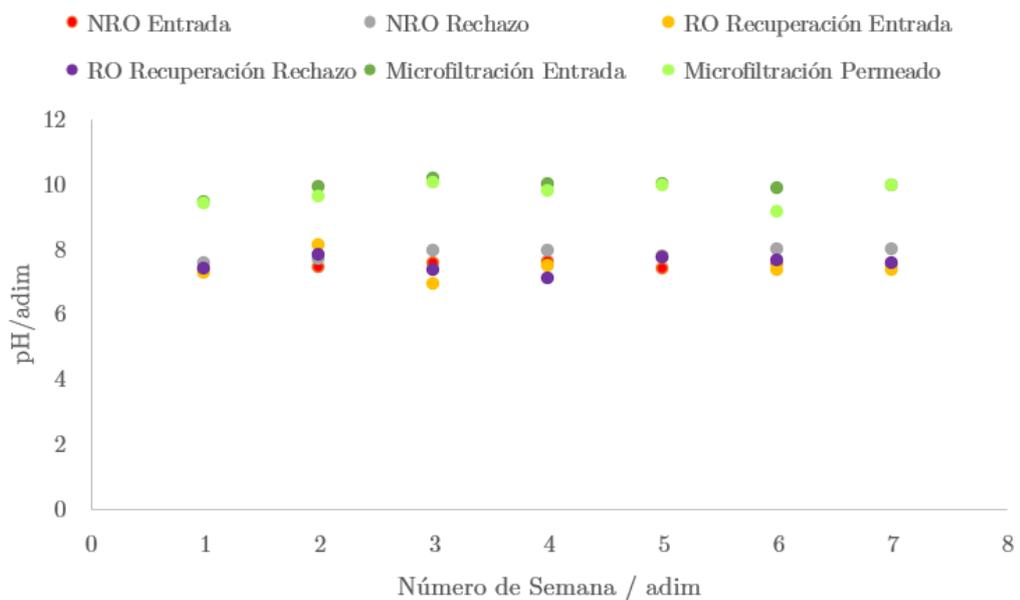
En la Figura 5.14, se muestran los valores obtenidos para la temperatura con variaciones entre los 21°C a los 24°C, aunque ninguno se encuentra fuera de especificación. Por lo tanto, la temperatura es uno de los parámetros con menor incidencia en la toma de decisiones para la propuesta de mejora.

#### **5.2.5. pH**

El pH se determinó con un pHmetro marca Oakton y los valores se presentan en la Figura 5.15. Aunque en dicha figura no se observan variaciones mayores a 2 unidades dentro de cada corriente, llama la atención el effluente del permeado del sistema de microfiltración, debido a que este valor está fuera de especificación según el Cuadro 3.1 y lo cual concuerda con el resultado obtenido en el Cuadro 5.3.



**Figura 5.14.** Variación de la temperatura por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia.



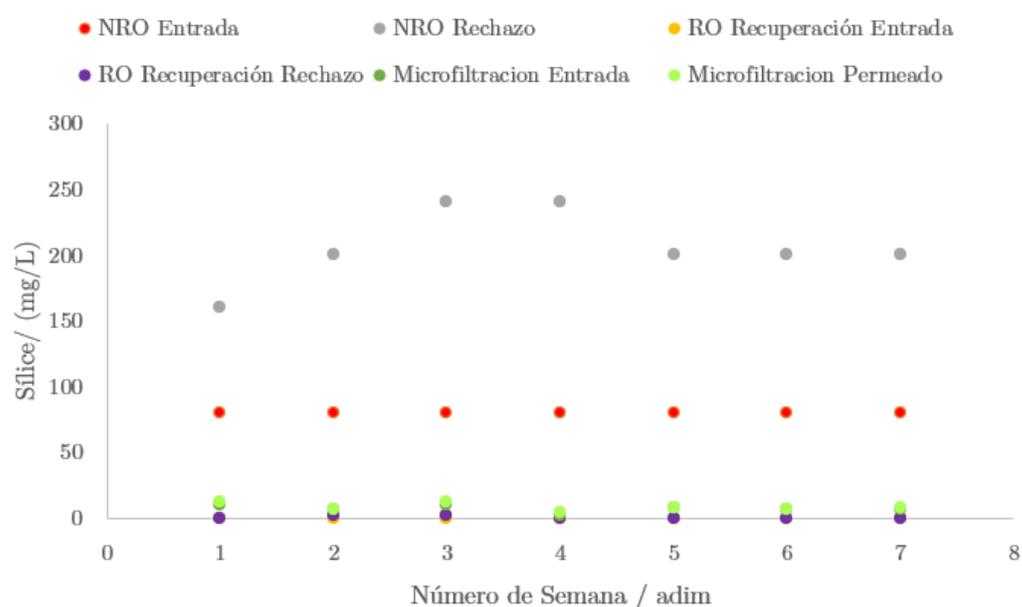
**Figura 5.15.** Variación del pH por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia.

Esto es importante conocerlo ya que, como se describió en el capítulo 3, para valores alcalinos se puede tener como efecto adverso la producción de obstrucciones en tuberías o accesorios debido a las reacciones entre iones presentes en el agua. Es

por esto, que para el sistema de microfiltración se debe buscar una alternativa que estabilice el pH. Asimismo, como se mencionó anteriormente, en el Cuadro 3.1 se detalla que el límite máximo del potencial de hidrógeno para el reuso de aguas residuales se encuentra comprendido entre 5 y 9, por lo que este efluente no se podría reutilizar para ninguno de los propósitos descritos en el Capítulo 3.

### 5.2.6. Sílice

El parámetro de sílice se determinó mediante un kit de prueba de sílice marca HACH SI-5 y los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.16. Como se observa en dicha figura, el rechazo de la NRO tiene valores mayores a los 150 mg/L, el rechazo del RO Recuperación prácticamente 0 mg/L y el permeado de microfiltración alrededor de los 10 mg/L. Esto también concuerda con los resultados obtenidos en los Cuadros 5.1, 5.2 y 5.3.



**Figura 5.16.** Variación de la concentración de sílice por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia.

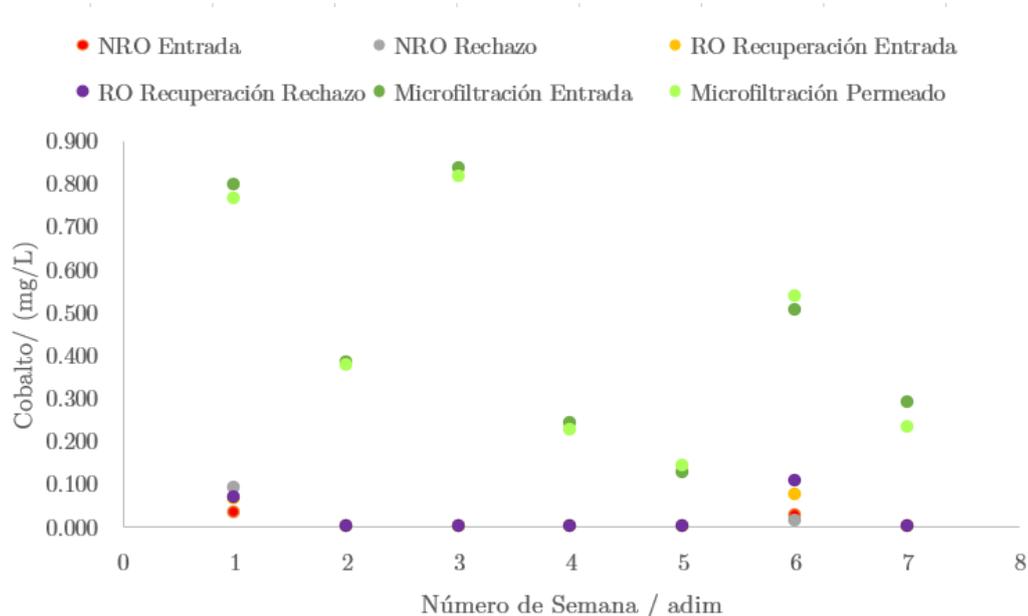
Según Lapeña (1999), la sílice contribuye a la alcalinidad del agua y su eliminación es primordial en las aguas de uso industrial, ya que dicho parámetro genera incrustaciones en equipos y tuberías. Para disminuir este valor, el autor recomienda el uso

de resinas de intercambio iónico fuertemente básicas.

### 5.2.7. Metales pesados

Para determinar las concentraciones de los distintos metales pesados, se utilizó el equipo de absorción atómica marca Agilent Technologies, el cual se encuentra en el laboratorio del departamento del proceso de galvanoplastia. Se midieron los siguientes metales pesados:

- Cobalto:** Como se mencionó en la sección 5.1.2, es un metal no precioso que se utiliza para generar oro duro, y los valores obtenidos se pueden observar en la Figura 5.17. En dicha figura muestran valores mayores para el sistema de microfiltración y casi sin ninguna variación entre la entrada y la salida de dicho sistema, por lo que sería necesario un tratamiento más robusto si se desea reutilizar este efluente con valores menores de cobalto.



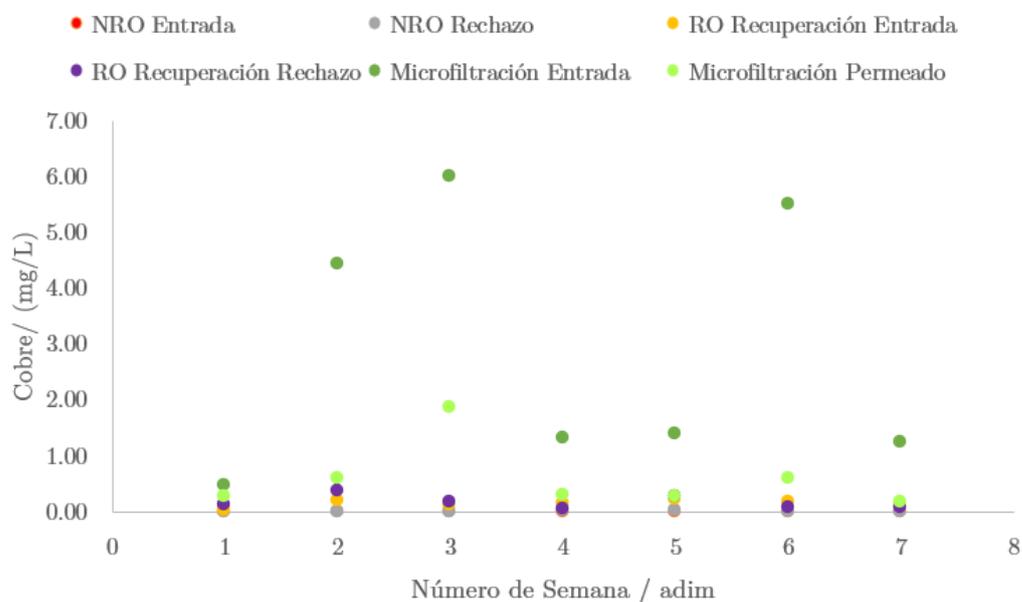
**Figura 5.17.** Variación de la concentración de cobalto por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia.

Cabe destacar que los valores de cobalto varían desde los 0.200 mg/L hasta los 0.800 mg/L, y el valor obtenido por el laboratorio certificado, Cuadro 5.3, se

encuentra cerca del límite inferior de éste ámbito. Por lo que, por esta razón toma mayor importancia el análisis a lo largo del tiempo.

#### ■ Cobre:

Como se mencionó anteriormente, el cobre es uno de los metales presentes en los efluentes dirigidos hacia descarga, ya que es el metal base del material utilizado en el proceso productivo.

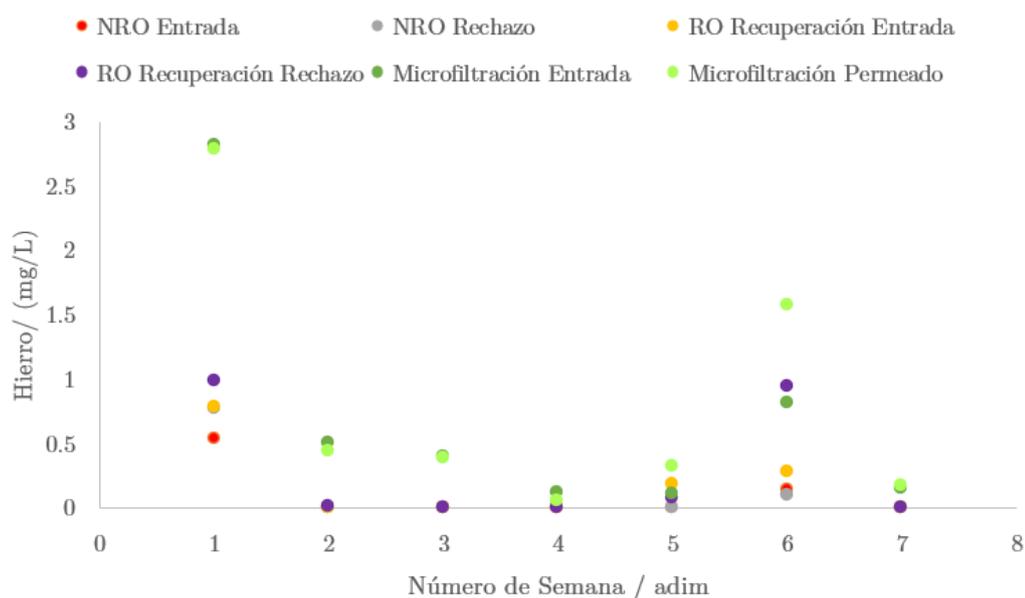


**Figura 5.18.** Variación de la concentración de cobre por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia.

En la Figura 5.18, se observa que el proceso con mayor concentración de cobre es el que contiene el sistema de microfiltración. A su vez, en dicha figura se destaca el funcionamiento del equipo de microfiltración, ya que existe una disminución entre el 40 y 89% en la concentración del cobre que entra al que sale por el permeado. Asimismo, en promedio esta corriente dobla el valor de concentración con respecto al valor del Cuadro 5.3, 0,58 mg/L y 0,25 mg/L respectivamente; caso contrario al valor promedio de la corriente del RO Recuperación comparado con el dato del Cuadro 5.2, 0,15 mg/L y 0,24 mg/L respectivamente.

### ■ Hierro:

Como se detalló en las secciones 5.1.2 y 5.1.3, el hierro es uno de los elementos conocidos como impurezas en el proceso productivo, y es por esto que es determinante su medición, la cual se muestra en la Figura 5.19. En dicha figura se observan comportamientos similares en todas las corrientes, en especial en los puntos 1 y 6 de la gráfica. En estos puntos se reflejan valores mayores a 1 mg/L, lo cual se puede atribuir a un error de lectura en el equipo de absorción atómica, ya que al comparar dichos datos con los obtenidos en los Cuadros 5.1, 5.2 y 5.3, la concentración de hierro en los sistemas es mucho menor a 1 mg/L, por lo tanto, dichas lecturas distan de los valores reales obtenidos por el laboratorio certificado.

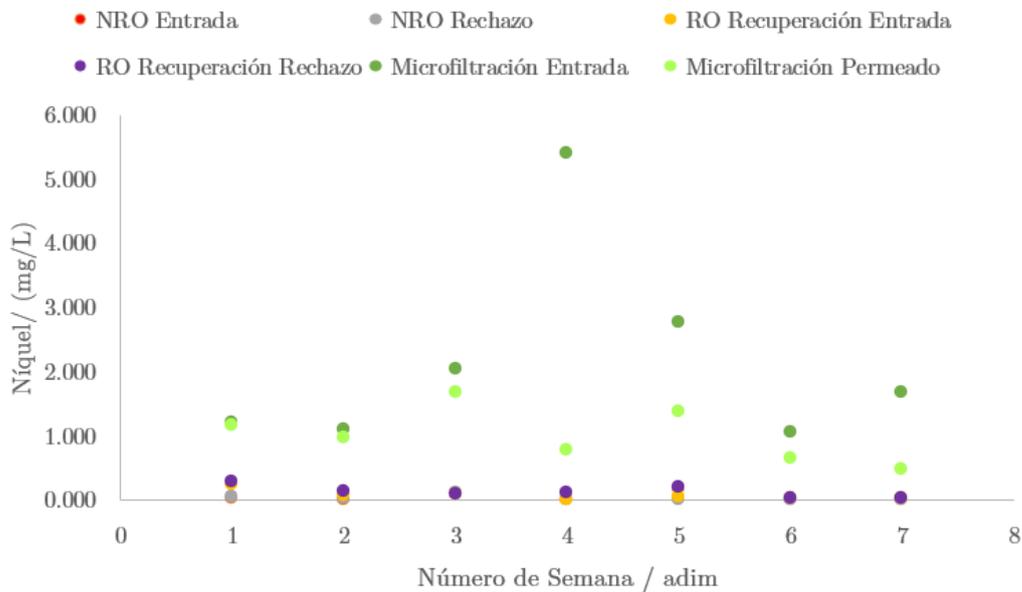


**Figura 5.19.** Variación de la concentración de hierro por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia.

### ■ Níquel:

El níquel, al ser uno de los metales principales que se utiliza en el proceso productivo, es uno de los elementos que presenta un mayor control en la planta. Esto se logra observar en la Figura 5.20, la cual presenta valores dentro de lo permitido según el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales,

ubicado en el Capítulo 3, a excepción de algunas semanas del sistema de microfiltración, como las semanas 1, 3 y 5, mostradas en dicha figura.



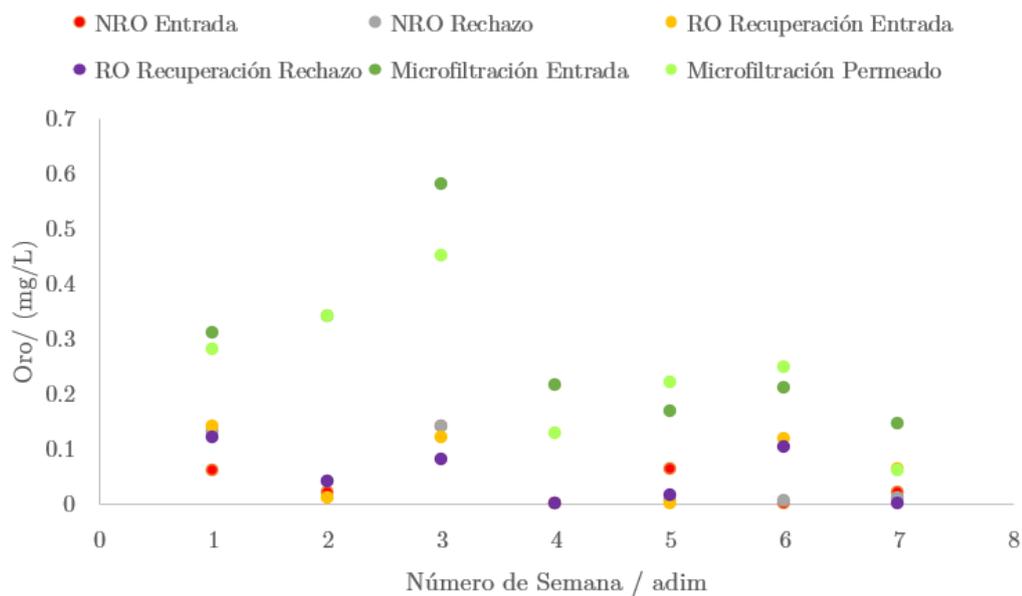
**Figura 5.20.** Variación de la concentración de níquel por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia.

Cabe destacar que en la semana 4 se dio una disminución en la concentración de níquel en hasta un 85 % aproximadamente, lo que refleja la efectividad del sistema para remover metales, en especial los metales que se encuentran en mayor concentración en el proceso productivo. También, se debe considerar que el porcentaje de remoción de metales en el sistema de microfiltración, depende mucho del estado en el que se encuentren las membranas de dicho equipo, y lo cercano que fue el mantenimiento de dichas membranas, con la toma de datos para generar el análisis de caracterización.

#### ■ Oro:

El oro al ser un metal precioso, lleva un proceso completamente diferente al descrito en éste y en capítulos anteriores, por lo que dicho proceso no se encuentra dentro del estudio realizado. Aún conociendo esto, es se puede corroborar como el sistema utilizado, es capaz de recuperar la mayor cantidad

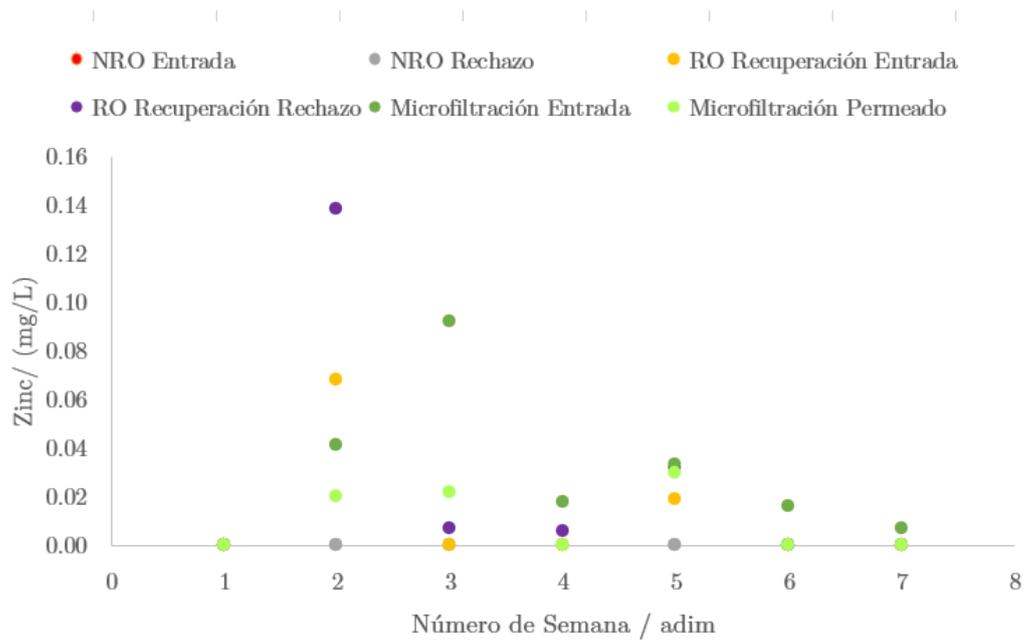
de oro posible y mantener la concentración de este metal por debajo de 0.6 mg/L, como se observa en la Figura 5.21.



**Figura 5.21.** Variación de la concentración de oro por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia.

#### ■ Zinc:

El zinc al igual que el hierro, es uno de los elementos conocidos como impurezas en el proceso productivo. Como se observa en la Figura 5.22 los valores oscilan entre los 0 mg/L hasta 0.14 mg/L, lo cual coincide en su mayoría con los valores obtenidos en los Cuadros 5.2 y 5.3 y no genera mayor injerencia a la hora de analizar las corrientes del proyecto en estudio. Los datos que sobresalen en la semana 2, se pueden atribuir a un error de lectura en el equipo de absorción atómica.



**Figura 5.22.** Variación de la concentración de zinc por semana, en las principales fuentes de descarga. Elaboración propia.

## **CAPÍTULO 6**

### **PROPUESTA PARA EL REUSO DE LAS AGUAS RESIDUALES**

En el presente capítulo se realizará una breve investigación de las tecnologías más comunes utilizadas en los sistemas de tratamiento de aguas residuales para la remoción de metales pesados. Asimismo, se detallará el fenómeno de cero descarga líquida y los equipos que se involucran en dicho sistema. A su vez, se compararán las distintas tecnologías mencionadas, tanto en sus ventajas como en sus desventajas, con el fin de realizar una propuesta acorde a lo observado en los capítulos anteriores.

Una vez propuesto el sistema de tratamiento, éste se comparará con tres planteamientos de tres empresas distintas y se seleccionará la propuesta más adecuada, con el fin de continuar los estudios con dicha empresa.

#### **6.1. Tecnologías utilizadas en el tratamiento de las aguas residuales**

Como menciona Ramalho (2021), la clave para la resolución de los problemas de diseño que se encuentran en el tratamiento de aguas residuales reside en el concepto de operaciones unitarias, la cual ha sido desarrollada fundamentalmente en ingeniería química en los últimos 50 años. El mismo autor recalca que se deben de considerar nuevas tecnologías, nuevos procesos, así como la modificación de las antiguas líneas de tratamiento, con el fin de diseñar caso por caso cada problema de aguas residuales. Es por esto que, primero se identificarán cada uno de los principales sistemas con utilidad en el presente caso de estudio.

##### **6.1.1. Sedimentación**

Es una de las operaciones unitarias más utilizadas en el tratamiento de aguas residuales. Su función es remover los residuos sólidos sedimentables y el material flotante para disminuir la concentración de sólidos suspendidos. La separación de los sólidos

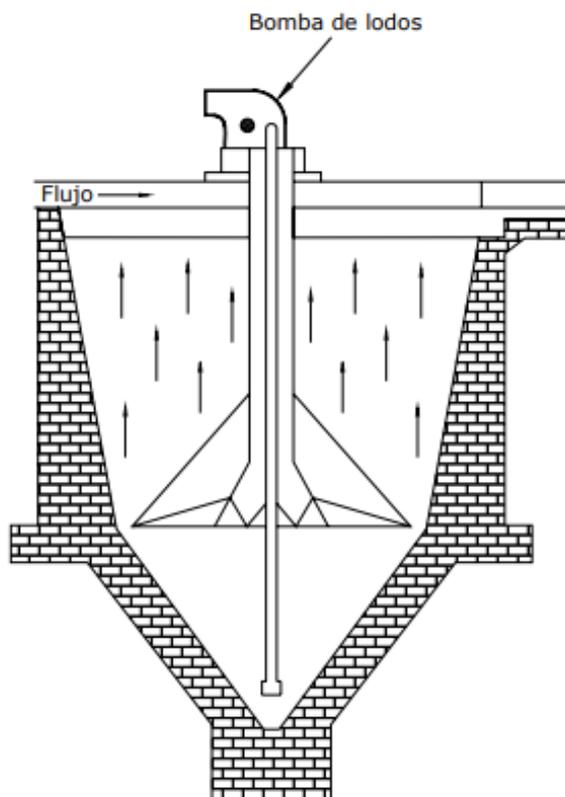
del líquido se presenta por medio del asentamiento por gravedad (Fallas, 2015).

Aunado a esto, Fallas (2015) también explica que la precipitación química en el tratamiento de aguas residuales requiere la adición de productos químicos que alteren el estado físico de los sólidos disueltos y en suspensión, para que de esta manera se facilite su eliminación por medio de la sedimentación. En los procesos de galvanoplastia, la precipitación se da debido a que los iones metálicos solubles y ciertos aniones se convierten en formas insolubles dentro de la solución. Las interacciones químicas, temperatura, pH, solubilidad y efectos de la mezcla afectan el rendimiento de dicho proceso.

Los coagulantes/floculantes inorgánicos son los más utilizados para el tratamiento de aguas residuales, debido a su rendimiento, disponibilidad, costo y efectividad. Poseen la capacidad de actuar como coagulantes y floculantes, cuando son disueltos estos forman compuestos complejos hidratados. Entre los más utilizados se hallan, sulfato de aluminio, sulfato férrico, sulfato ferroso, cloruro férrico y el aluminato de sodio. También existen los coagulantes orgánicos, que son polímeros solubles en agua basados en unidades repetidas de varios monómeros tales como acrilamida y ácido acrílico (Bravo, 2015).

Aunque existen varios tipos de sedimentadores, Leyva (2022) destaca en su texto el sedimentador Dortmund o sedimentador cónico (Figura 6.23), que a diferencia de otros, en estas unidades no se tratan los lodos; por lo que los lodos necesitan de tratamiento adicional. Leyva (2022) también resalta que, estas unidades tienen como función la reducción de los sólidos suspendidos, grasas y aceites de las aguas residuales y que las eficiencias esperadas son del 55 % de los sólidos. Asimismo, cuando se utilizan coagulantes, como el sulfato de aluminio, cloruro o sulfato férricos, para aumentar la eficiencia del sistema, este es considerado tratamiento primario avanzado.

También es importante mencionar que a nivel de laboratorio existe una prueba de sedimentación llamada prueba de jarras, la cual consiste en una simulación de los procesos de coagulación y floculación para encontrar la dosis ideal donde se produzca la mejor calidad de agua posible a los menores costos (Andía, 2000).



**Figura 6.23.** Esquema general de un tanque tipo Dortmund. Fuente: Durán y Díaz (2008)

Esto último cobra relevancia, ya que se recomienda utilizar dicha prueba de jarras para determinar el mejor coagulante a utilizar en el proceso batch o discontinuo y con esto eliminar el cloruro de calcio del sistema de reacción.

### 6.1.2. Oxidación Química

Para el caso de estudio, dicho proceso se utiliza en el sistema de recuperación de metales preciosos el cual, como se mencionó en capítulos pasados, no es de interés del estudio realizado. Por lo tanto, solo se mencionará mas no se ahondará en ello.

Los procesos de oxidación-reducción consisten en la adición de un compuesto que actúa como oxidante o reductor, produciéndose una transformación como consecuencia de la transferencia electrónica entre el compuesto añadido y los compuestos presentes en el agua residual. Se utilizan comúnmente para transformar un com-

puesto de elevada toxicidad a una forma menos peligrosa o que se puede eliminar más fácilmente (Fallas, 2015).

### **6.1.3. Carbón activado**

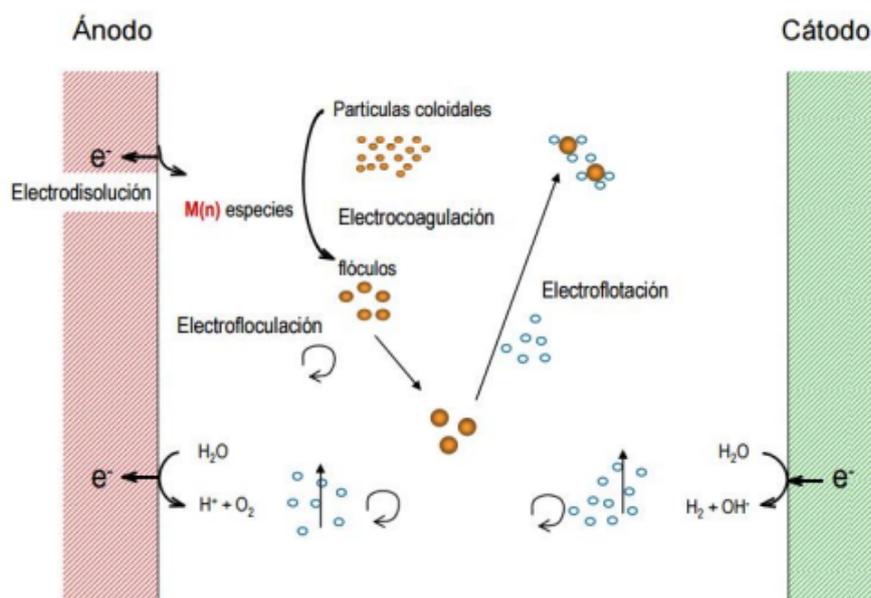
Según Rodríguez y Molina (2002), el carbón activado es un material que posee una elevada superficie interna, lo cual hace que pueda adsorber una gran cantidad de compuestos, tanto en fase gaseosa como en disolución. Asimismo, los autores destacan dos características fundamentales en las que se basan las aplicaciones del carbón activado: elevada capacidad de eliminación de sustancias debido a su porosidad y distribución de tamaño de poros, y baja selectividad de retención, lo que lo convierte en un adsorbente universal.

A su vez, Lopez y Tooth (2022) indican que el carbón activado se puede utilizar tanto en polvo como en granular. Además los autores resaltan que este material posee dos características por las cuales es de utilidad: atrapa contaminantes orgánicos en sus paredes con una gran efectividad que deja prácticamente al agua libre de compuestos y también elimina el cloro libre residual que no ha reaccionado.

### **6.1.4. Electrocoagulación**

Consiste en la desestabilización de especies químicas suspendidas o disueltas presentes en una solución, producto de la aplicación de una diferencia de potencial eléctrico a través de un sistema cátodo-ánodo inmerso en la solución de agua a tratar, tal y como se muestra en la Figura 6.24. En el transcurso de dicho proceso, las especies catiónicas producidas en el ánodo entran a la solución, reaccionan con las demás especies, forman óxidos metálicos y precipitan los respectivos hidróxidos (Davis, 1994).

A diferencia de la coagulación química, en el proceso de electrocoagulación el agente coagulante se genera in situ por la oxidación electrolítica del material del ánodo, lo que permite la reducción en la dosificación de reactivos, y por ende, supone un ahorro importante en los costos operativos (Moya-Llamas, 2018).



**Figura 6.24.** Procesos involucrados en un equipo de electrocoagulación. Fuente: Martínez (2007)

### 6.1.5. Desinfección

La inactivación de los microorganismos patógenos contenidos en un agua residual tratada se consigue mediante un proceso de desinfección. Los productos más comúnmente utilizados para la desinfección de un agua son el cloro y sus derivados, el ozono y la radiación ultravioleta (UV). El cloro es el desinfectante por excelencia, ya que en general ofrece una gran eficacia y su aplicación es bien conocida (Aguirre *et al.*, 2004).

La aplicación de la luz UV para la desinfección de agua residual depurada todavía presenta notables limitaciones, especialmente derivadas de su escasa eficacia desinfectante cuando se utilizan aguas residuales de composición físico-química muy diferente e incluso variable en función de los vertidos de zona (Aguirre *et al.*, 2004).

Por su parte el ozono es inestable y no puede ser transportado ni almacenado y, por lo tanto, debe ser producido *in situ*. Es muy eficiente en bajas concentraciones, y más efectivo en la inactivación de patógenos, incluyendo bacterias, protozoarios y virus. También sólo debe ser utilizado como desinfectante primario, pues no tiene efecto residual en agua. Puede formar compuestos bromados, además de otros productos

orgánicos tales como aldehídos o cetonas (Guimarães *et al.*, 2001).

#### **6.1.6. Intercambio iónico**

El intercambio iónico es una operación unitaria donde los iones adheridos a una sustancia sólida (resinas) se intercambian con iones en la solución alimentada (Wankat, 2008). Este procedimiento ha llegado a ser de gran importancia en el tratamiento de aguas residuales, ya que la desmineralización completa se puede alcanzar mediante este proceso, produciendo un efluente de calidad específica, por ejemplo, de una determinada dureza (Ramalho, 2021).

Las resinas son polímeros insolubles a los que se le añaden grupos básicos o ácidos mediante reacciones químicas. El número total de grupos funcionales por unidad de peso de resina determina la capacidad de intercambio, mientras que el tipo de grupo funcional determina la selectividad iónica y la posición de equilibrio de intercambio (Ramalho, 2021).

Estas resinas se clasifican en resinas catiónicas si tienen cargas negativas fijas y resinas aniónicas si contienen cargas fijas positivas. La resina es fuerte, si está totalmente ionizada y débil si no está totalmente ionizada (Wankat, 2008).

El intercambiador de iones tienen una capacidad limitada para almacenar iones, llamada capacidad de intercambio, por lo que llegara a saturarse con los iones intercambiados. Es por esto que se realiza un lavado con una solución fuertemente regeneradora que contiene la especie deseable de iones, los cuales sustituyen a los iones no deseados, dejando al material de intercambio en condición útil. Esta operación es un proceso químico cíclico y el ciclo ordinario completo incluye retrolavado, regeneración, enjuagado y servicio (Hernandez, 2015).

#### **6.1.7. Electrodesionización**

Sanz *et al.* (2006) resume que, la electrodesionización en continuo es un proceso de producción de agua de alta pureza, donde intervienen una pequeña cantidad de resinas de intercambio iónico, membranas semipermeables aniónicas y catiónicas al-

ternadas y una corriente eléctrica continua entre dos electrodos (cátodo y ánodo). A su vez, los diseños estándar para obtener agua purificada, agua para inyectables y agua de alta pureza emplean una combinación de ósmosis inversa y electrodesionización en continuo.

En la Figura 6.25 se muestra un módulo de un sistema de electrodesionización en continuo agrupado en bastidores.



**Figura 6.25.** Vista de un sistema modular de electrodesionización en continuo. Fuente: Sanz *et al.* (2006)

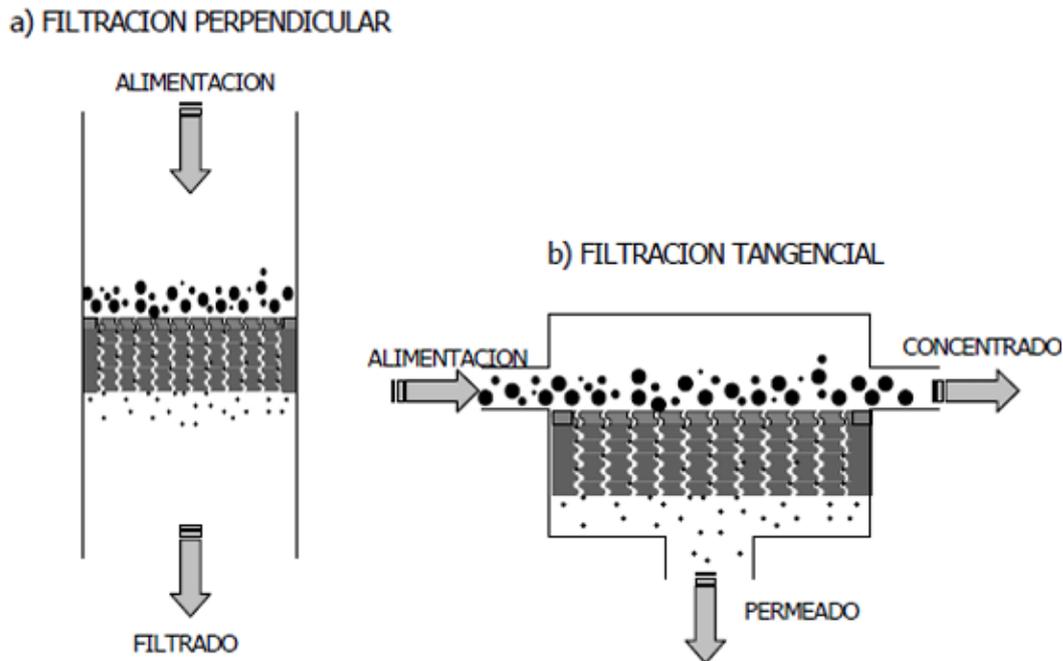
### 6.1.8. Microfiltración

Se utiliza para eliminar los sólidos suspendidos, cuando el ámbito de tamaño de partículas se encuentra entre 0,01 y 1  $\mu\text{m}$ . Este tipo de filtración no es capaz de remover o eliminar sólidos disueltos. Las membranas son microporosas simétricas con tamaños de poro de 0,1 a 10  $\mu\text{m}$  y las diferencias de presión establecidas a través de la membrana son de 0,1 a 2 bar (Fallas, 2015).

Asimismo, Zambrano (2011) destaca que los equipos de microfiltración son útiles en proceso de concentración, fraccionamiento o clarificación donde se obtienen dos fracciones líquidas cuya composición es diferente entre ellas y el producto inicial. También, Zambrano (2011) destaca que dichos equipos al efectuar la filtración, las

membranas se auto limpian, permitiendo trabajar en continuo con características de funcionamiento estables.

En la Figura 6.26 se puede observar una comparación esquemática entre la filtración perpendicular y la tangencial, a razón de la orientación de la alimentación con respecto a la membrana (Coronel, 2012).



**Figura 6.26.** Filtración convencional o perpendicular (a) y tangencial o paralela (b).  
Fuente: Coronel (2012)

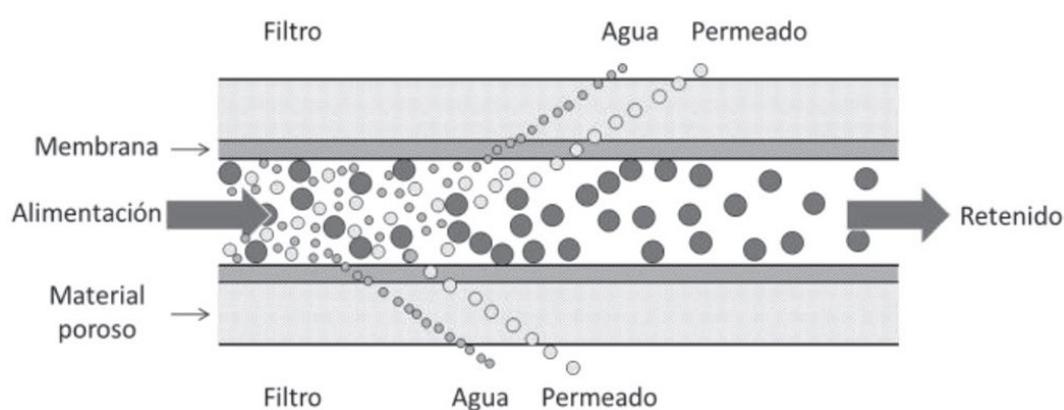
### 6.1.9. Ultrafiltración

Es un proceso impulsado por la presión en el cual el disolvente y las pequeñas moléculas de soluto pasan a través de una membrana y se recogen como una solución permeada. Las moléculas de soluto más grandes no pasan a través de la membrana y se recuperan en una solución concentrada (Geankoplis, 2006).

Se aplica para recuperar proteínas en procesos de las industrias alimenticia y farmacéutica. Es útil para separar emulsiones permanentes, porque las gotas de aceite no atraviesan las membranas. También se usa para eliminar partículas coloidales finas y para recuperar colorantes del agua residual. En muchas aplicaciones, la ul-

trafiltración y la ósmosis inversa se utilizan en serie. El equipo para los sistemas de ultrafiltración se parece con frecuencia al de los sistemas de ósmosis inversa, pero trabaja a presiones menores. Las membranas para ósmosis inversa no son porosas y se separan debido a un mecanismo de solución y difusión, las membranas para ultrafiltración son porosas y separan por tamaño (Wankat, 2008).

En la Figura 6.27 se representa el proceso general de separación a través de una membrana semipermeable.



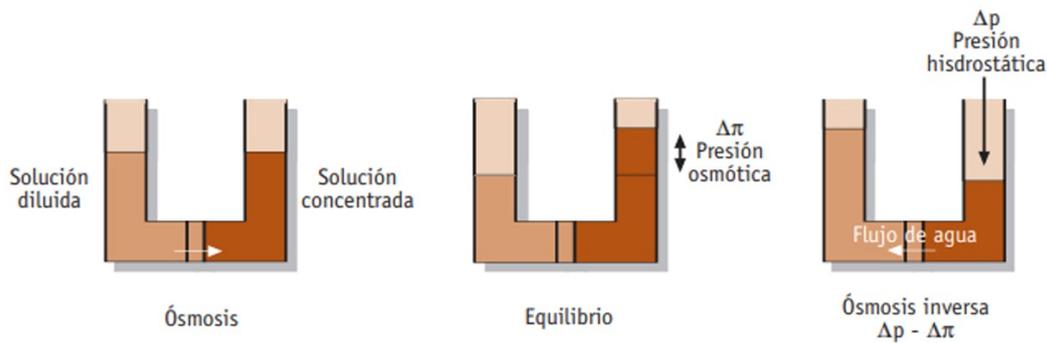
**Figura 6.27.** Esquema de la separación con membranas. Fuente: Solís *et al.* (2017)

### 6.1.10. Ósmosis Inversa

Es uno de los varios procesos de membrana conducidos bajo presión para la purificación del agua, entre los que también se incluyen la nanofiltración, la ultrafiltración y la microfiltración. Es una técnica muy útil y muy bien desarrollada para la purificación y desalinización del agua. El proceso consiste en forzar el agua a través de una membrana semipermeable que permite el paso del agua, pero no de otro material. Este proceso, depende de la sorción preferencial del agua en la superficie de una membrana porosa de acetato de celulosa o poliamida. Por lo que, el agua pura de la capa sorbida es forzada a través de los poros de la membrana bajo presión (Manahan, 2006).

Como se observa en la Figura 6.28, el proceso de ósmosis inversa es generado al aplicar presión en el lado de la solución más concentrada, originando una diferencia

de presión mayor a la presión osmótica. De esta forma se logra que el flujo de agua sea en el sentido de la solución concentrada a la solución diluida, por lo que se obtiene agua desalada (Velásquez, 2019)

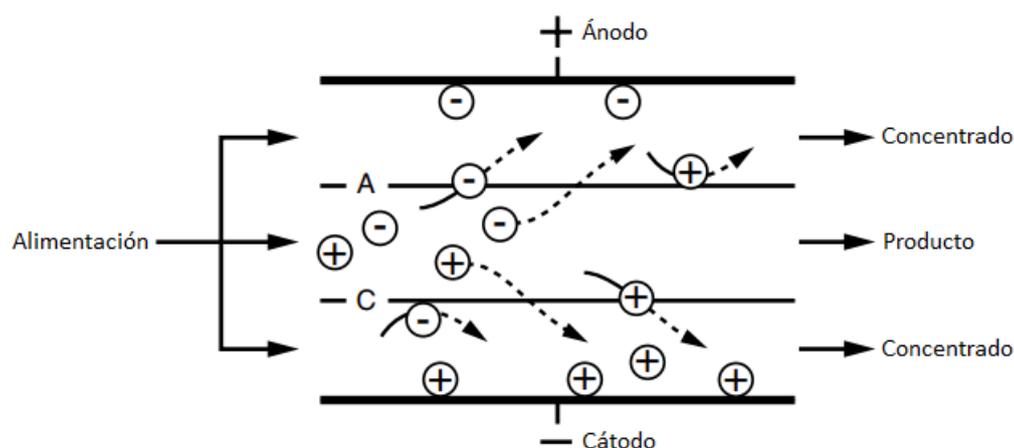


**Figura 6.28.** Proceso de ósmosis inversa. Fuente: Velásquez (2019)

También, como menciona Wankat (2008) en su texto, es importante recalcar que en los sistemas de ósmosis inversa se requiere de un tratamiento previo para eliminar todas las partículas que puedan obstruir la membrana. A su vez, en el diseño se debe de determinar si hay iones o solutos en solución que puedan precipitar sobre la membrana. Por lo que, si hay probabilidad de que haya precipitación, los iones o solutos se deben eliminar o convertir en más solubles para evitar que precipiten.

#### 6.1.11. Electrodialisis

La electrodiálisis (ED) es un proceso accionado eléctricamente en el que las sales minerales y otras especies son transportadas a través de membranas selectivas de iones de una solución a otra bajo la fuerza motriz del potencial eléctrico directo. Las sales se encuentran en la solución como partículas ionizadas con cargas positivas y negativas. Cuando se impone una corriente directa a la solución, los iones positivos migran hacia el electrodo negativo, o cátodo, y los iones negativos migran hacia el electrodo positivo, o ánodo, como se muestra en la Figura 6.29. En comparación con la nanofiltración y la ósmosis inversa, que transportan el agua a través de la membrana dejando las sales atrás, con la ED, la sal se elimina gradualmente de la solución dejando una solución diluida. La electrodiálisis no elimina la materia coloidal, la que no está ionizada, ni las bacterias (Asano *et al.*, 2007).



**Figura 6.29.** Diagrama conceptual del proceso de electrodiálisis. Fuente: Asano *et al.* (2007)

A continuación, se muestra una tabla resumen de clasificación de los procesos con membranas según Solís *et al.* (2017):

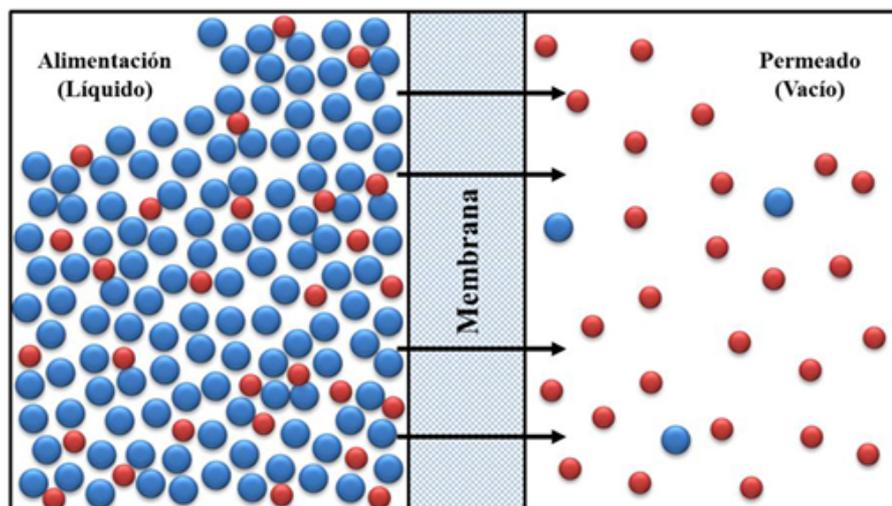
**Cuadro 6.1.** Clasificación de los procesos con membranas.

Equipo	Resumen
Microfiltración	Separa partículas con un tamaño entre 0.05 y 10 $\mu\text{m}$ , a presiones entre 0.5 y 3 bar.
Ultrafiltración	La membrana tiene un diámetro aproximado de poro de 0.01 $\mu\text{m}$ , se realiza a valores de presión entre 1-10 bar.
Ósmosis Inversa	El tamaño de poro se encuentra entre 5-15 Å permitiendo obtener retenidos con un contenido máximo de sólidos del 30%.
Electrodiálisis	Separa iones cargados eléctricamente mediante la aplicación de un campo eléctrico.

### 6.1.12. Pervaporación

La pervaporación es una de las técnicas de separación por membrana, especialmente útil para eliminar pequeñas trazas de las mezclas de líquidos, por ejemplo pequeña cantidad de componentes orgánicos a partir de agua contaminada. Es un proceso

basado en membranas, en la que un lado de la membrana está en contacto con la mezcla de alimentación, mientras que el otro lado de la membrana puede ser un gas portador, tal y como se muestra en la Figura 6.30. Este proceso de separación ofrece muchas ventajas; como la alta selectividad, bajo consumo de energía, costo moderado y de diseño modular (García *et al.*, 2015).



**Figura 6.30.** Diagrama de pervaporación a través de una membrana. Fuente: García *et al.* (2015)

Los factores más importantes para la elección de diferentes membranas de pervaporación debe tener: alta permeabilidad, una buena selectividad y estabilidad robusta. Diferentes teorías afirman que una membrana polimérica ideal para pervaporación debería tener un parámetro de solubilidad próxima a la de la componente a permear selectivamente, de modo que la absorción de este componente es alta. Debido a esta idea de sorción preferencial, la elección de las membranas hidrófilas para los propósitos de la deshidratación de las mezclas es un concepto común en el campo de la pervaporación (García *et al.*, 2015).

### 6.1.13. Cristalización

De acuerdo con Paredes y Trujillo (2021), la cristalización es un cambio de estado que conduce, a partir de una fase líquida o gaseosa, a un sólido de estructura organizada, llamado cristal. Se trata de un proceso cinético, cuya fuerza impulsora es

la sobresaturación. Asimismo, los autores destacan que los procesos de cristalización consisten en tres etapas básicas: sobresaturación, nucleación y crecimiento, y que una diferencia entre los productos de la precipitación química con los productos obtenidos por procesos convencionales de cristalización, es que los primeros son sustancias prácticamente insolubles, mientras que los últimos pueden redisolverse fácilmente si se restauran las condiciones originales de temperatura y concentración. Tanto los procesos de evaporación como los procesos de cristalización, son procesos utilizados en sistemas de descarga líquida cero o *Zero-liquid discharge (ZLD)*. Yaqub y Lee (2019) resumen que, en los sistemas ZLD convencionales las aguas residuales se alimentan a un concentrador de salmuera para su evaporación y luego a un cristizador; el destilado recolectado luego se reutiliza, mientras que los sólidos recuperados se desechan o se recuperan como subproductos valiosos.

Dicho sistema se considera una técnica emergente para minimizar los desechos, recuperar recursos, tratar los flujos de desechos industriales tóxicos y mitigar los impactos potenciales en la calidad del agua en el agua receptora. Aunque los sistemas ZLD son capaces de minimizar la contaminación de las fuentes de agua y amplificar suministro de agua, sus aplicaciones a escala industrial están restringidas debido a su alto costo e intensivo consumo de energía (Yaqub y Lee, 2019).

## **6.2. Ventajas y desventajas de las tecnologías empleadas para el tratamiento y el reuso de aguas residuales**

En esta sección se resumen aspectos importantes de las tecnologías mencionadas en la sección anterior, con el fin de obtener mayor información a la hora de seleccionar las tecnologías más adecuadas para el presente caso de estudio.

A continuación se muestra un cuadro resumen de ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías citadas anteriormente:

**Cuadro 6.2.** Ventajas y desventajas de la electrocoagulación. Fuente: Ruiz (2005)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Requiere de equipos simples y fáciles de operar.</li> <li>■ Produce efluentes con menor cantidad de sólidos disueltos totales (SDT) comparado con los tratamientos químicos, si esta agua se reusa, los bajos niveles de SDT contribuye a bajos costos de tratamiento de agua.</li> <li>■ Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos.</li> <li>■ Genera lodos más compactos y en menor cantidad, que involucra menor problemática de disposición de estos lodos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Reposición de los electrodos de sacrificio.</li> <li>■ Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo utilizado.</li> <li>■ El uso de electricidad puede ser costoso en muchos lugares.</li> <li>■ Una película de óxido impermeable puede formarse en el cátodo que lleva a la pérdida de eficiencia del proceso.</li> </ul>

**Cuadro 6.3.** Ventajas y desventajas de la electrodesionización. Fuente: Carrillo (2020), Contreras (2017) y Serra (2007)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Sistema no contaminante, fiable y muy seguro: no se manejan productos químicos, no se producen efluentes peligrosos y no se vierten resinas.</li> <li>■ Los equipos requieren menos espacio en planta, ya que no se necesita de la instalación de tanques y bombas auxiliares para la regeneración.</li> <li>■ Controla la población bacteriana.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Costos de operación principalmente en el suministro de energía eléctrica.</li> <li>■ Elimina sólo un número restringido de partículas cargadas.</li> </ul>

**Cuadro 6.4.** Ventajas y desventajas de la microfiltración. Fuente: Picho (2006), Puritec de México (2019)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Son equipos escalables y modulares, el número de etapas se puede aumentar en función de las necesidades.</li> <li>▪ El aumento de su capacidad o selectividad del sistema es fácil.</li> <li>▪ El costo de inversión es proporcional a la capacidad.</li> <li>▪ El costo de funcionamiento es bajo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Solo elimina materia suspendida y bacterias.</li> <li>▪ Las membranas son sensibles a los productos químicos oxidativos.</li> <li>▪ Necesita filtración previa, ya que las membranas se pueden dañar con partículas duras y afiladas.</li> </ul>

**Cuadro 6.5.** Ventajas y desventajas de la ultrafiltración. Fuente: Martos y Area (2000), Carrillo (2020)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No requiere de reacciones químicas, cambios de fase o dilución.</li> <li>▪ Utiliza bajas presiones y el equipamiento es relativamente sencillo.</li> <li>▪ El costo total de operación es aproximadamente 30% inferior que el tratamiento químico.</li> <li>▪ Elimina sólidos y turbidez.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Velocidades de flujo relativamente bajas.</li> <li>▪ Elevados costos de instalación y bombeo.</li> <li>▪ Las membranas sufren de polarización de la concentración (formación de una capa gel de solutos macromoleculares y/o coloidales sobre su superficie).</li> <li>▪ Requiere de agentes químicos para limpieza.</li> <li>▪ Necesita filtración previa, ya que las membranas se pueden dañar con partículas duras y afiladas.</li> </ul>

**Cuadro 6.6.** Ventajas y desventajas de la ósmosis inversa. Fuente: Carrillo (2020), Puritec de México (2019), Martínez Guijarro (2021b)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Elimina óxidos y residuos microscópicos.</li> <li>▪ Desinfección, remueve bacterias e incluso los virus.</li> <li>▪ Se puede obtener agua potable</li> <li>▪ Reducción en metales pesados, nitratos, sulfatos, color, taninos y turbidez.</li> <li>▪ Ablanda el agua dura.</li> <li>▪ Alta retención de sales e iones monovalentes particulares.</li> <li>▪ Menor coste energético que sistemas térmicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Alto costo en las membranas.</li> <li>▪ El agua necesita pretratamiento.</li> <li>▪ Costos de operación altos.</li> <li>▪ Membranas sensibles al cloro libre.</li> <li>▪ Alta presión de operación.</li> </ul>

**Cuadro 6.7.** Ventajas y desventajas de la electrodiálisis. Fuente: Contreras (2017), Martínez Guijarro (2021b)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ De operación simple.</li> <li>▪ Se puede ajustar para el uso con sistemas pequeños, por lo general funciona automáticamente con pocos requisitos de mantenimiento y funcionamiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Requiere gran cantidad de energía para producir la corriente constante que impulsa la purificación y bombea el agua a través del sistema..</li> <li>▪ Necesita purificación previa.</li> <li>▪ No se puede usar para aguas de dureza superior a 1 ppm.</li> <li>▪ Solo utiliza agua de baja salinidad. Cuando la salinidad es alta se incrementan los costes de inversión y mantenimiento.</li> </ul>

**Cuadro 6.8.** Ventajas y desventajas de la pervaporación. Fuente: Novo (2018), Gutiérrez (2007)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mínimo impacto ambiental, puesto a que no usa solventes ni sales orgánicas, y las membranas pueden ser recicladas, después de su tiempo de servicio.</li> <li>■ El espacio ocupado por esta unidad es mínimo en comparación con otras tecnologías.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Se necesitan membranas de alta selectividad lo cual eleva el costo de las unidades de pervaporación.</li> <li>■ Sus costos operativos son mayores a las demás operaciones ya que se necesitan alcanzar bajas temperaturas para lograr la condensación del permeado y los flujos efluentes de la unidad suelen ser bajos.</li> <li>■ No ha tenido aplicaciones industriales en procesos de descontaminación importantes.</li> </ul>

**Cuadro 6.9.** Ventajas y desventajas de la cristalización. Fuente: Melo y Ochoa (2021)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Permite un alto control de las especificidades del producto, como el tamaño y forma, facilitando su manejo, empaque y almacenamiento.</li> <li>■ Tiene un bajo requerimiento energético, en comparación con otros procesos de separación como la destilación.</li> <li>■ Tiene un amplio rango de temperaturas (20°C - 500°C) y de producción.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ No es posible recuperar todo el soluto en una sola etapa.</li> <li>■ Requiere un manejo de sólidos, lo que supone una secuencia de separación de sólidos-líquidos y de secado.</li> <li>■ Requiere el desarrollo de un método de modelación que permita determinar el equilibrio sólido-líquido y el mecanismo de control del crecimiento del cristal.</li> <li>■ Requiere un mejor método de estimación de solubilidad en función de la temperatura.</li> </ul>

### 6.3. Propuesta para el reuso de aguas residuales

En esta sección se detallará la propuesta para el reuso de las aguas residuales mencionadas en los capítulos anteriores.

Primero, se determinaron los efluentes a analizar, los cuales se encuentran descritos en las secciones 4.2, 4.3 y 4.4, y se resumen en lo siguiente: 1) rechazo de la ósmosis inversa NRO, 2) rechazo de la ósmosis inversa RO recuperación y 3) permeado del sistema de microfiltración. Una vez conocido cada efluente, se enumeran los principales elementos presentes en éstos, los cuales se mencionan en la sección 5.1.

Luego se realizó un análisis de caracterización de aguas, cuyos resultados se muestran en los Cuadros 5.1, 5.2 y 5.3. En dichos cuadros destacan los siguientes valores: DBO mayor a 50 mg/L tanto en el rechazo de la ósmosis inversa RO recuperación como en el permeado de microfiltración, DQO mayor a 150 mg/L en el permeado de microfiltración, el pH mayor a 9 en el permeado de microfiltración, la concentración de níquel mayor a 1 mg/L en el permeado de microfiltración y la concentración de sílice mayor a 3  $\mu\text{g/L}$  en los tres efluentes estudiados.

A su vez, de los resultados obtenidos en la sección 5.2 sobresalen los siguientes: conductividad mayor a 1  $\mu\text{S/cm}$  (sección 3.3.1) en los tres efluentes estudiados, valores de dureza entre 180 y 460 mg/L en el permeado de microfiltración, esto último debido a la adición de cloruro de calcio como agente precipitante; pH entre 9 y 10 en el permeado de microfiltración, concentración de sílice entre 160 y 240 mg/L en el rechazo de la NRO, concentraciones mayores a 0.5 mg/L de cobre en el permeado de microfiltración y concentraciones mayores a 1.0 mg/L de níquel en el permeado de microfiltración.

Es por esto que, de acuerdo con lo anterior mencionado para poder reutilizar el agua residual tanto en el proceso productivo como en los diferentes tipos de reuso de aguas residuales, se deben aplicar lo siguiente: reducción del DBO y del DQO, regulación del pH, reducción de la dureza del agua, reducción de la concentración del sílice y de los metales pesados y reducción de la conductividad del agua.

Para lograr esto, se observan las tecnologías mencionadas en la sección anterior y

con base en los cuadros de ventajas y desventajas de dichas tecnologías, así como del conocimiento que se tiene en la empresa sobre el uso de algunas de ellas, se seleccionan las siguientes: tanque ecualizador para regular el pH, desinfección del sistema mediante cloración para la reducción del DBO (prevención de la proliferación de *legionella* y *sphingomonas paucimobilis*), tanque de carbón activado para la reducción del DBO y DQO, tanques de resinas de intercambio iónico catiónicas para reducir la dureza del agua residual y aniónicas para reducir concentración del sílice y un sistema de ósmosis inversa para reducir la concentración de metales pesados y para reducir la conductividad del agua residual, tal y como se muestra en la Figura 6.31.



**Figura 6.31.** Sistema propuesto para el reúso de las aguas residuales provenientes del proceso productivo.

#### 6.4. Propuestas de las empresas oferentes para el reúso de aguas residuales

En esta sección se describirán las propuestas de las empresas oferentes para el reúso de aguas residuales.

Como principal criterio de elección, se tomó como base la propuesta realizada en la sección anterior, así como las ventajas y desventajas de cada una de las propuestas. También cabe destacar que por términos de confidencialidad no se mencionarán los nombres de dichas empresas y solo se describirán como empresa A, empresa B y

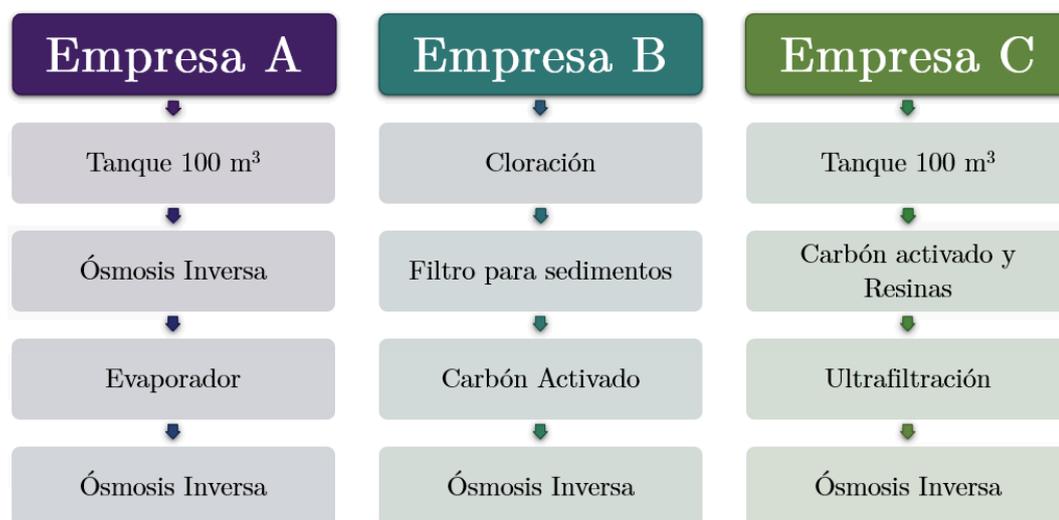
empresa C.

El sistema de la empresa A consiste en un tanque de 100 m<sup>3</sup> donde las aguas provenientes de la planta de proceso se mezclarán. El sistema continúa con la recuperación de agua por medio de membranas de ósmosis inversa de dos etapas antes de llegar a la unidad de evaporación final, la cual se encargará de separar los sólidos finales del sistema, enviando al tanque de recuperación el condensado resultante. Tanto los flujos de agua producto de las dos primeras unidades de ósmosis como los condensados del evaporador serán enviados a un tanque de alimentación para la tercer y última unidad de ósmosis inversa, posterior a esto, dichas aguas pasan a una última etapa de pulido por medio de resinas mixtas desionizadoras antes de entrar a la unidad final de desinfección por radiación de luz ultravioleta. Esta propuesta tiene un valor de \$ 195,847 de costos de equipamiento más \$ 32,440 por costos de servicios del proyecto, para un total de \$ 228,287 y un porcentaje de recuperación entre el 75-80 %.

La empresa B propuso un sistema que inicia con un equipo de cloración, luego de esto pasa por un filtro para sedimentos y un filtro de carbón activado, ambos retrolavables automáticamente, para finalizar con un equipo de ósmosis inversa de un paso más un desmineralizador de doble columna como segundo paso. Esta propuesta tiene un valor de \$149,100 y un porcentaje de recuperación de 73.9 %.

La empresa C propone un sistema con un tanque homogenizador de 100 m<sup>3</sup>, dos tanques de carbón activado, dos tanques de intercambio iónico de resinas aniónicas que funcionen en paralelo, un tanque intermedio de 20 m<sup>3</sup> que sirva como alimentación de un equipo de ultrafiltración y por último, un equipo de ósmosis inversa. La propuesta tiene un valor de \$ 198,000 y un porcentaje de recuperación del 70 %.

En la Figura 6.32 se observa un resumen de cada una de las propuestas, con los equipos más relevantes de las mismas. A su vez, en el Cuadro 6.10, se resumen las ventajas y desventajas observadas en cada una de las propuestas, con el fin de determinar la selección de una de ellas.



**Figura 6.32.** Sistemas propuestos por las empresas oferentes para el reuso de las aguas residuales provenientes del proceso productivo.

**Cuadro 6.10.** Ventajas y desventajas de las propuestas de las empresas oferentes.

Empresa A	Empresa B	Empresa C
\$228,287	\$149,100	\$198,000
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ventajas: cero descarga líquida, se recupera entre 75-80 %.</li> <li>▪ Desventajas: falta de pretratamiento, costos eléctricos elevados al considerar el uso de un evaporador, propuesta con el costo de inversión más alto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ventajas: menor cantidad de equipos para recuperar un 73.9 %.</li> <li>▪ Desventajas: falta de tanque ecualizador, la propuesta no justifica la eliminación de la dureza.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ventajas: propuesta similar a la propuesta de la sección anterior, se recupera un 70 %.</li> <li>▪ Desventajas: la propuesta no justifica más detalladamente el uso del equipo de ultrafiltración como pretratamiento de la ósmosis inversa.</li> </ul>

Por lo tanto, analizando los costos de cada una de las propuestas, la similitud de cada una de ellas con la propuesta de la sección anterior y también considerando que la empresa seleccionada ya realiza trabajos de pretratamiento con la empresa de estudio, es que la elegida para continuar con el proyecto es la empresa C.



# CAPÍTULO 7

## ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO

En este capítulo se detallará el análisis costo-beneficio de la propuesta de mejora del sistema de tratamiento de aguas residuales elegida para continuar con el presente proyecto.

### 7.1. Conceptos

- **Análisis costo-beneficio:**

Según Carriquiry *et al.* (2019), el análisis costo-beneficio (ACB) es una herramienta de apoyo utilizada para el uso eficiente de los recursos, donde se cuantifican los costos y los beneficios asociados a la implementación de un proyecto. Para García *et al.* (2013), el ACB permite pronosticar cual decisión es la más apropiada en términos económicos en un proyecto específico.

- **Tasa de retorno:**

Zugarramurdi (1998) menciona que la tasa de retorno sobre la inversión se expresa normalmente como un porcentaje, donde el beneficio anual neto se divide por la inversión total inicial, multiplicado por 100. En este caso se utilizará una ecuación similar, con la diferencia de dividir la inversión inicial entre el beneficio anual y con esto obtener la cantidad de años a los cuales se terminaría de cancelar la inversión inicial. Esto último se realiza de esta manera, ya que, así es como se realiza dicho cálculo en la empresa de estudio, como se muestra a continuación:

$$\text{Retorno sobre la inversión}(ROI) = \frac{\text{Inversión}}{\text{Beneficio}} \quad (1)$$

Conociendo lo anterior, para éste estudio es de interés solamente evaluar y cuantificar la propuesta elegida en el capítulo anterior, así como detallar los diferentes escenarios que la misma podría presentar.

## **7.2. Costos Operativos**

Para poder determinar el retorno sobre la inversión de la propuesta elegida se deben conocer los costos operativos de dicha propuesta. Los costos operativos actuales solo se mencionarán mas no se utilizarán en el cálculo, ya que es un valor que es independiente de la propuesta. A continuación se detallan estos temas:

### **7.2.1. Costos operativos actuales**

Actualmente la planta tiene un total de \$85,904 en costos operativos anuales aproximadamente, los cuales involucran cambios de membranas de las ósmosis inversas, cambios del carbón activado y el uso de limpiadores alcalinos y ácidos para los mantenimientos de los equipos de microfiltración, ósmosis inversa y regeneración de resinas, filtros utilizados en la planta y los químicos utilizados en el proceso batch. Dado que los precios son tomados de proveedores de la empresa, no se podrán detallar los costos unitarios.

Los costos anteriores se pueden reducir si se mejora el pretratamiento de los diferentes sistemas de la planta. Si esto ocurre, los mantenimientos preventivos de los equipos de membranas se realizarían máximo 1 vez al mes, a diferencia de los mantenimientos semanales que se realizan actualmente. Si se cumple esto, los costos operativos anuales se reducirían a \$72,432, mejorando en un 16 % aproximadamente.

### **7.2.2. Costos operativos de la propuesta elegida**

Los costos operativos anuales de la propuesta elegida, al igual que la sección anterior, se basan en precios de distintos proveedores, por lo que no se presentarán los costos unitario, sino solamente un aproximado total.

La propuesta cuenta con resinas de intercambio iónico de tipo aniónicas, las cuales tienen un costo aproximado de \$19,380 para dos tanques de 30 ft<sup>3</sup> y con un costo de químicos utilizado para regenerar de \$10,400. Considerando un mantenimiento semanal del sistema de ultrafiltración, los químicos utilizados tendrían un costo anual de \$66.84. Por último, basado en los costos por el equipo adquirido, los costos

operativos anuales por instalación de tuberías, instalación eléctrica, instalación del equipo adquirido y los servicios auxiliares serían de \$64,722. Por lo tanto, el costo operativo anual de la propuesta sería de \$94,569.

Los costos operativos pueden variar dependiendo del escenario que se presente. A parte de la propuesta que se presentó anteriormente, un segundo panorama consiste en no tomar el rechazo del sistema de la NRO para el reuso de dicho efluente, por lo tanto, se estaría eliminando el problema con el sílice y las resinas de intercambio iónico aniónicas no serían necesarias. Los costos al final se resumen en los mantenimientos del equipo de ultrafiltración y en los costos por instalación de tuberías, instalación eléctrica, instalación del equipo adquirido y servicios auxiliares, dando un total de \$47,277.

### **7.3. Ahorro del agua a tratar**

El ahorro de agua viene dado por los datos mencionados en el Capítulo 5, con excepción del efluente proveniente de la ósmosis inversa RO recuperación, ya que en este caso tomaremos como flujo la entrada y no el rechazo, con el fin de utilizar dicho equipo como elemento final de la propuesta realizada. Por lo tanto, tomando los caudales de los Cuadros 5.1, 5.3 y un valor promedio de entrada de la RO recuperación de  $68.34 \text{ m}^3/\text{día}$ , se obtiene un total de  $126.34 \text{ m}^3/\text{día}$ , a su vez se sabe que la empresa seleccionada propone un ahorro del 70 % de estos tres efluentes, por lo tanto, se obtiene un valor de  $88.44 \text{ m}^3/\text{día}$  a ahorrar. También, según los datos del AyA, el valor del metro cúbico se encuentra en \$3.08 al mes de junio de 2022.

Con los datos anteriores, se obtiene un posible ahorro de \$99,424.25 por año para la propuesta completa. Como se mencionó en la sección anterior, un segundo escenario sería descartando el efluente de la NRO, por consiguiente, el 70 % del caudal resultante sería  $62.54 \text{ m}^3/\text{día}$ , con un posible ahorro de \$70,307.47 por año.

Por otro lado, es importante destacar que no solo se puede hablar de ahorro del agua como único beneficio, sino también se pueden mencionar los beneficios intangibles que dicha propuesta conlleva, tales como: mejora del aprendizaje y experiencia de

los operadores de la planta, mejora en la imagen de la empresa al ser un proyecto de reuso de aguas residuales, optimización de los procesos de la planta, mejor control en cada uno de los sistemas estudiados debido a la caracterización de aguas, se facilita la planificación estratégica para futuras mejoras de la propuesta, etcétera.

#### **7.4. Retorno sobre la inversión**

Para el retorno sobre la inversión se determinó el costo de inversión más los costos operativos de los distintos escenarios de la propuesta sobre el ahorro de agua de las mismas.

- La propuesta completa incluye un costo de inversión de \$155,956.20, costos operativos de \$94,569, con un ahorro de \$99,424.25 por año. Utilizando la ecuación 1, se obtiene un ROI de 2.52 años.
- La propuesta sin la NRO incluye un costo de inversión de \$113,758.57, costos operativos de \$47,277, con un ahorro de \$70,307.47 por año. Utilizando la ecuación 1, se obtiene un ROI de 2.29 años.

Por lo tanto, ambas propuestas son viables bajo los escenarios planteados. A su vez, es importante considerar que al ser propuestas con costos aproximados y no con costos de ingeniería al detalle, la viabilidad del proyecto podría estar en riesgo, ya que los costos operativos podrían incrementar. Es por esto, que se recomienda involucrar los equipos ya existentes de carbón activado, de ósmosis inversa, entre otros, en la propuesta de reuso de aguas con el fin de minimizar los costos de inversión.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES

- ☞ Se propuso el siguiente análisis de caracterización de aguas residuales para el sistema de tratamiento de agua de ciudad: pH, temperatura, conductividad eléctrica, DBO, DQO, dureza total, grasas y aceites, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, sólidos totales disueltos, sustancias activas al azul de metileno, turbidez, calcio, potasio, bicarbonatos, cloruros, fluoruros, fosfatos, nitratos, sulfatos, hierro, magnesio, manganeso, sílice, silicio, sodio, coliformes fecales y nematodos intestinales.
- ☞ Se propuso el siguiente análisis de caracterización de aguas residuales para el sistema de recuperación de agua del proceso productivo: pH, temperatura, conductividad eléctrica, DBO, DQO, dureza total, grasas y aceites, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, sólidos totales disueltos, sustancias activas al azul de metileno, turbidez, calcio, potasio, bicarbonatos, cloruros, fluoruros, fosfatos, nitratos, sulfatos, hierro, magnesio, manganeso, sílice, silicio, sodio, cobalto, cobre, estaño, níquel, zinc, coliformes fecales y nematodos intestinales.
- ☞ Se propuso el siguiente análisis de caracterización de aguas residuales para el sistema del tren de reacción: pH, temperatura, conductividad eléctrica, DBO, DQO, dureza total, grasas y aceites, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, sólidos totales disueltos, sustancias activas al azul de metileno, turbidez, calcio, potasio, bicarbonatos, cloruros, fluoruros, fosfatos, nitratos, sulfatos, hierro, magnesio, manganeso, sílice, silicio, sodio, cobalto, cobre, estaño, níquel, zinc, coliformes fecales y nematodos intestinales.
- ☞ En el sistema de ósmosis inversa NRO se obtuvo un valor de conductividad mayor a los  $1 \mu\text{S}/\text{cm}$  y una concentración de sílice entre 160 y 240 mg/L.
- ☞ En el sistema de ósmosis inversa RO Recuperación se obtuvieron valores de conductividad mayor a los  $1 \mu\text{S}/\text{cm}$  y DBO mayor a 50 mg/L O<sub>2</sub>.

- ☞ En el sistema del tren de reacción se obtuvieron valores de conductividad mayor a los  $1 \mu\text{S}/\text{cm}$ , DBO mayor a  $50 \text{ mg/L O}_2$ , DQO mayor a  $150 \text{ mg/L}$ , pH mayor a 9, dureza entre 180 y  $460 \text{ mg/L}$ , concentraciones de cobre mayores a  $0.5 \text{ mg/L}$  y concentraciones de níquel mayores a  $1.0 \text{ mg/L}$ .
- ☞ Se propuso el siguiente sistema para el reuso del agua residual: un tanque equalizador, desinfección del sistema mediante cloración, tanque de carbón activado, tanques de resinas de intercambio iónico catiónicas y aniónicas y un sistema de ósmosis inversa.
- ☞ Debido a la similitud con la propuesta del caso de estudio y también considerando los trabajos de pretratamiento realizados en la planta de tratamiento de la empresa de estudio, se seleccionó a la empresa C para continuar con el proyecto.
- ☞ La propuesta de la empresa C obtuvo un valor de ROI de 2.52 años para el escenario de la propuesta completa y de 2.29 años para el escenario de la propuesta sin la NRO. Por lo tanto, ambas propuestas son viables.

## Recomendaciones

- ☞ Se recomienda modificar el fondo plano del tanque de concentración ubicado a la entrada de microfiltración, con el fin de mejorar la recolección de sólidos sedimentables de dicho tanque antes de que el agua residual entre al sistema de microfiltración.
- ☞ Se recomienda realizar estudios sobre diferentes tipos de coagulantes que se puedan utilizar en el tren de reacción, para poder eliminar el uso de cloruro de calcio el cual le agrega dureza al agua del sistema.
- ☞ Se recomienda replantear el uso del equipo de ultrafiltración mediante estudios realizados en una planta piloto.
- ☞ Se recomienda involucrar los equipos ya existentes de carbón activado y de ósmosis inversa en la propuesta de reuso de aguas con el fin de minimizar costos de inversión.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre, P. A., García, J., y Mujeriego, R. (2004). Desinfección con cloro y luz uv en un proceso convencional de regeneración de agua. *Ingeniería del agua*, 11(1):75–89.
- Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua: coagulación y floculación. *Documento técnico. Planta de Tratamiento de Agua Sedapal, Lima*.
- Asano, T., Burton, F., Leverenz, H., Tsuchihashi, R., y Tchobanoglous, G. (2007). *Water reuse: issues, technologies, and applications*. McGraw-Hill Education.
- Blais, J.-F., Djedidi, Z., Cheikh, R. B., Tyagi, R. D., y Mercier, G. (2008). Metals precipitation from effluents. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 12(3):135–149.
- Bravo, M. (2015). Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales.
- Campos, I. (2000). *Saneamiento ambiental*. EUNED.
- Carrillo, M. P. (2020). Desarrollo de una propuesta de mejora para la reutilización de agua en los procesos de calibración de equipos volumétricos en Colmetrik SAS. Tesis de licenciatura, Fundación Universidad de América.
- Carriquiry, M., Piaggio, M., y Sena, G. (2019). *Guía de análisis costo beneficio. Aplicación para medidas de adaptación al cambio climático en el sector agropecuario en Uruguay*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Chávez, Á., Cristancho, D., y Ospina, É. (2009). Una alternativa limpia para el tratamiento de las aguas residuales galvánicas: revisión bibliográfica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(14):39–50.
- Contreras, S. L. (2017). Diseño de un sistema para remoción de sólidos y aceites suspendidos en agua de proceso. Tesis de grado, Universidad de los Andes.

- Corbett, C. J. y Pan, J.-N. (2002). Evaluating environmental performance using statistical process control techniques. *European Journal of Operational Research*, 139(1):68–83.
- Coronel, M. (2012). Microfiltración tangencial. *Enfoque UTE*, 3(1):1–7.
- Davis, M. (1994). Use advanced methods to treat wastewater. *Hydrocarbon Processing; (United States)*, 73(8).
- De Lima, G., Guessier, W., y Masiero, I. (2007). Influência do bismuto, níquel, estanho e alumínio na espessura da camada dos revestimentos galvanizados. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 12(4):549–567.
- Durán, C. y Díaz, E. (2008). *Manual para el diseño de unidades de tipo biológico en Plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en El salvador*. Tesis doctoral, Tesis de grado. Universidad de El Salvador–Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
- Fallas, M. J. (2015). Análisis técnico de la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales provenientes del proceso de recubrimiento metálico. Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica.
- Garay, J. A., Pinilla, C. A., y Díaz, J. M. (2003). *Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos (aguas, sedimentos y organismos)*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR.
- García, H., Corredor, A., Calderón, L., y Gómez, M. (2013). *Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia*. Fedesarrollo.
- García, L. A. G., Armesto, D. F. T., y Correa, D. A. (2015). Métodos de separación por pervaporación: una revisión. *ReCiTeIA*, 15(1):66–78.
- Geankoplis, C. J. (2006). Procesos de transporte y principios de procesos de separación. *CECSA Editorial México*.

- Guimarães, J. R., Ibáñez, J., Litter, M. I., y Pizarro, R. (2001). Desinfección de agua. *Eliminación de contaminantes por fotocátalisis heterogénea*, 1:375–388.
- Gutiérrez, J. P. (2007). Diseño de un proceso para la recuperación y degradación de fenol de aguas residuales industriales. *Departamento de Ingeniería Química-Universidad Nacional de Colombia*.
- Hernandez, Z. (2015). Comparación de tratamientos empleados para la eliminar la dureza del agua. Tesis de grado, Universidad de Quintana Roo.
- Hibbitt, C. y Kamp-Roelands, N. (2002). Europe's (mild) greening of corporate environmental management. *Corporate Environmental Strategy*, 9(2):172–182.
- Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace elements in soils and plants*. CRC press.
- Kaifer, J. (2006). Tratamientos físico-químicos de residuos. *Escuela de Organización Industrial. EOI. España*.
- Kerri, K. (2013). *Treatment of Metal Wastestreams*. California, USA: California State University.
- Lapeña, M. R. (1999). *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales*, volumen 27. Marcombo.
- Leyva, R. (2022). Eficiencia del tanque imhoff y sedimentador dormunt en la remoción de la carga másica en función de la dco de las aguas residuales domésticas adaptado en climas alto andinos, Marcará–2019. Tesis de grado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.
- Lopez, J. C. J. y Tooth, F. M. (2022). Remoción de demanda química de oxígeno de aguas residuales empleando carbón activado en la laguna de oxidación, nuevo chimbote-2022.
- Manahan, S. E. (2006). *Introducción a la química ambiental*. Editorial Reverté.
- Mancilla-Villa, Ó. R., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Uscanga-Mortera, E., Ramos-Bello, R., y Reyes-Ortigoza, A. L. (2012). Metales pesados totales y

- arsénico en el agua para riego de puebla y veracruz, méxico. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(1):39–48.
- Mantovani, P., Asano, T., Chang, A., y Okun, D. (2001). Management practices for nonpotable water reuse, WERF. *Project Report 97-IRM-6*.
- Martínez, F. (2007). *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional*. Tesis doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha.
- Martínez Guijarro, M. (2021a). *Agua con fines analíticos: calidad y sistemas de producción*. Universitat Politècnica de València.
- Martínez Guijarro, M. (2021b). *Procesos y tecnología para la desalinización del agua*. Universitat Politècnica de València.
- Martos, M. y Area, M. (2000). La ultrafiltración y sus aplicaciones en la industria de la pulpa y el papel. *El Papel. La Revista de la Industria Papelera para España y America Latina.*, (87):28–31.
- Melo, D. y Ochoa, N. (2021). Diagnóstico del proceso de cristalización del sulfato de cobre pentahidratado mediante revisión bibliográfica. Tesis de grado, Fundación Universidad de América.
- Ministerio de Ambiente y Energía (2016). *Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales*. MINAE.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España (2009). *Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del Sector de Tratamiento de Superficies Metálicas y Plásticas*. España: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Ministerio del Ambiente de Ecuador (2011). Estudio de potenciales impactos ambientales y vulnerabilidad relacionada con las sustancias químicas y tratamiento de desechos peligrosos en el sector productivo del ecuador. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/03/PART11.pdf>.

- Moya-Llamas, M.-J. (2018). *Tecnologías electroquímicas aplicadas en el tratamiento de aguas: Electrocoagulación*. Universidad de Alicante.
- Muñoz, A. (2008). Caracterización y tratamiento de aguas residuales. Tesis de grado, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Novo, L. F. (2018). Propuesta técnico-financiera de alternativa tecnológica para la producción de alcohol anhidro a partir de etanol rectificado en la fábrica nacional de licores (FANAL). Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica.
- Osorio, N. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo integral del suelo y Nutrición vegetal*, 1(4):1-4.
- Paredes, V. y Trujillo, L. V. (2021). *Análisis de uso potencial de un lodo rico en estruvita obtenido a partir de procesos de precipitación química y cristalización para el tratamiento de agua residual municipal*. Universidad Autónoma de Occidente.
- Picho, L. (2006). Estudio de las condiciones óptimas de operación para la obtención de jugo clarificado de granadilla (*passiflora ligularis* L.) a través de la microfiltración tangencial. Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria.
- Puritec de México (2019). Tratamiento de agua: Procesos de purificación. <https://www.manantialwater.com.mx/purificacion/category/procesos-de-purificacion/>.
- Ramalho, R. S. (2021). *Tratamiento de aguas residuales*. Editorial Reverté.
- Rodríguez, F. y Molina, M. (2002). El carbón activado en procesos de descontaminación. *Universidad de Alicante. España*.
- Rojas, R. (2002). *Guía para la vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Ruiz, Á. A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de investigación*, 2(1):49-56.

- Sanz, J., Guerrero, L., y Roca, M. (2006). Producción de agua de alta pureza: electrodesionización en continuo (cedi). *Tecnología del agua*, 26(269):48–53.
- SCIJ (2006). Reglamento de vertido y reuso de aguas residuales. [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=59524](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=59524).
- Serra, A. (2007). Sistema de gestión del agua en una planta de energía solar. Tesis de máster, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Simpson, J. (2006). *From waste-d-water to pure water*. WaterReuse Association.
- Solís, C., Vélez, C., y Ramírez-Navas, J. S. (2017). Tecnología de membranas: Ultrafiltración. *Entre ciencia e ingeniería*, 11(22):26–36.
- Sun Kou, M. d. R. (2004). Procesos para el tratamiento de las aguas residuales en plantas galvanicas y metalúrgicas. *Sección Química. Departamento De Ciencias. Facultad De Ciencias E Ingeniería. Pontificia Universidad Católica del Perú*.
- Valdivia-Medina, R. Y., Pedro-Valdés, S., y Laurel-Gómez, M. (2010). Agua para uso en laboratorios. *Boletín Científico Técnico INIMET*, (1):3–10.
- Velásquez, R. O. R. (2019). Diseño de un prototipo de ósmosis inversa para tratamiento de aguas residuales en la industria textil de cúcuta. *Interfaces*, 2(2).
- Vickers, A. L. (1999). *Handbook of water use and conservation*. American Academy of Environmental Engineers, Annapolis, MD (United States).
- Wankat, P. C. (2008). *Ingeniería de procesos de separación*. Pearson Educación.
- Yaqub, M. y Lee, W. (2019). Zero-liquid discharge (zld) technology for resource recovery from wastewater: A review. *Science of the total environment*, 681:551–563.
- Zambrano, G. N. (2011). Evaluación de la calidad de yogur tipo ii elaborado con leche concentrada por microfiltración tangencial utilizando diferentes tipos de grasas y estabilizante. Tesis de grado, Universidad Técnica del Norte.

Zugarramurdi, A. (1998). *Ingeniería económica aplicada a la industria pesquera*.  
Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO.



## APÉNDICES

### A. RESULTADOS CARACTERIZACIÓN A LO LARGO DEL TIEMPO

**Cuadro A.1.** Valores de conductividad en  $\mu S/cm$ .

Semana	NRO	NRO	Rec	Rec	Mf*	Mf*
	Entrada	Rechazo	RO*	RO*	Entrada	Permea- do
			Entrada	Rechazo		
1	332.2	793.3	55.11	145.6	6290	6260
2	312	738	172.7	438.2	11800	12130
3	282.1	889.8	103	269.9	9860	9840
4	287.8	858.3	72.92	223.1	4900	4930
5	282.6	738.9	51.66	155.2	4610	4740
6	278.0	679.1	59.52	190.3	5330	5210
7	281.0	778.6	50.35	161.7	2120	2110

\*Rec RO=RO Recuperación; Mf=Microfiltración

**Cuadro A.2.** Valores de dureza en mg/L.

Semana	NRO	NRO	Rec	Rec	Mf*	Mf*
	Entrada	Rechazo	RO*	RO*	Entrada	Permea- do
			Entrada	Rechazo		
1	0.60	0.60	0.90	0.90	414	366
2	0.90	0.60	0.90	0.90	510	267
3	0.60	0.00	0.60	0.60	561	186
4	0.60	0.00	1.50	1.50	330	276
5	0.60	0.00	0.90	0.60	495	462
6	0.60	0.90	0.90	0.90	528	363
7	0.60	0.60	0.90	0.90	231	231

\*Rec RO=RO Recuperación; Mf=Microfiltración

**Cuadro A.3.** Valores de cloro en mg/L

Semana	NRO	NRO	Rec	Rec	Mf*	Mf*
	Entrada	Rechazo	RO*	RO*	Entrada	Permea- do
			Entrada	Rechazo		
1	0.05	0.02	0.00	0.01	0.00	0.02
2	0.03	0.00	0.03	0.00	0.04	0.02
3	0.03	0.01	0.02	0.02	0.00	0.04
4	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01
5	0.03	0.04	0.12	0.08	0.00	0.02
6	0.04	0.02	0.03	0.01	0.00	0.02
7	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02

\*Rec RO=RO Recuperación; Mf=Microfiltración

**Cuadro A.4.** Valores de temperatura en °C.

Semana	NRO	NRO	Rec	Rec	Mf*	Mf*
	Entrada	Rechazo	RO*	RO*	Entrada	Permea- do
			Entrada	Rechazo		
1	23.2	23.3	23.1	23.1	23.2	23.2
2	21.9	21.8	22.1	22.6	22.1	22.1
3	21.2	21.2	21.5	21.7	21.4	21.5
4	22.3	22.4	22.5	22.7	22.4	22.6
5	23.5	23.5	24.0	23.3	23.6	23.3
6	22.0	22.0	22.0	22.0	22.3	22.1
7	21.4	21.5	21.7	21.7	21.6	21.7

\*Rec RO=RO Recuperación; Mf=Microfiltración

**Cuadro A.5.** Valores de pH, unidades adim.

Semana	NRO	NRO	Rec	Rec	Mf*	Mf*
	Entrada	Rechazo	RO*	RO*	Entrada	Permea- do
			Entrada	Rechazo		
1	7.33	7.56	7.24	7.38	9.44	9.40
2	7.43	7.70	8.12	7.81	9.93	9.62
3	7.56	7.95	6.91	7.35	10.18	10.03
4	7.60	7.95	7.49	7.10	10.01	9.76
5	7.39	7.75	7.73	7.73	10.01	9.94
6	7.56	7.99	7.36	7.66	9.87	9.12
7	7.52	7.98	7.33	7.55	9.96	9.94

\*Rec RO=RO Recuperación; Mf=Microfiltración

**Cuadro A.6.** Valores de sílice en mg/L.

Semana	NRO	NRO	Rec	Rec	Mf*	Mf*
	Entrada	Rechazo	RO*	RO*	Entrada	Permea- do
			Entrada	Rechazo		
1	80	160	0	0	10	12
2	80	200	0	2	6	6
3	80	240	0	2	10	12
4	80	240	0	0	2	4
5	80	200	0	0	8	8
6	80	200	0	0	6	6
7	80	200	0	0	6	8

\*Rec RO=RO Recuperación; Mf=Microfiltración

**Cuadro A.7.** Valores de cobalto en mg/L.

Semana	NRO	NRO	Rec	Rec	Mf*	Mf*
	Entrada	Rechazo	RO*	RO*	Entrada	Permea- do
			Entrada	Rechazo		
1	0.032	0.091	0.067	0.069	0.797	0.765
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.382	0.378
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.836	0.815
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.241	0.225
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.126	0.144
6	0.028	0.015	0.075	0.106	0.505	0.536
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.289	0.232

\*Rec RO=RO Recuperación; Mf=Microfiltración

**Cuadro A.8.** Valores de cobre en mg/L.

Semana	NRO	NRO	Rec	Rec	Mf*	Mf*
	Entrada	Rechazo	RO*	RO*	Entrada	Permea- do
			Entrada	Rechazo		
1	0.000	0.000	0.007	0.122	0.454	0.271
2	0.000	0.000	0.187	0.363	4.433	0.578
3	0.000	0.000	0.115	0.164	5.994	1.861
4	0.000	0.017	0.141	0.043	1.323	0.298
5	0.000	0.008	0.225	0.252	1.375	0.274
6	0.000	0.000	0.171	0.056	5.507	0.595
7	0.000	0.000	0.093	0.064	1.234	0.169

\*Rec RO=RO Recuperación; Mf=Microfiltración

**Cuadro A.9.** Valores de hierro en mg/L.

Semana	NRO	NRO	Rec	Rec	Mf*	Mf*
	Entrada	Rechazo	RO*	RO*	Entrada	Permea- do
			Entrada	Rechazo		
1	0.542	0.779	0.783	0.993	2.816	2.785
2	0.000	0.004	0.000	0.012	0.502	0.438
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.394	0.387
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125	0.059
5	0.000	0.000	0.189	0.082	0.106	0.321
6	0.146	0.100	0.282	0.942	0.813	1.577
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.158	0.172

\*Rec RO=RO Recuperación; Mf=Microfiltración

**Cuadro A.10.** Valores de níquel en mg/L.

Semana	NRO	NRO	Rec	Rec	Mf*	Mf*
	Entrada	Rechazo	RO*	RO*	Entrada	Permea- do
			Entrada	Rechazo		
1	0.036	0.050	0.244	0.294	1.204	1.163
2	0.012	0.032	0.071	0.128	1.097	0.980
3	0.092	0.121	0.100	0.103	2.031	1.673
4	0.000	0.000	0.017	0.118	5.402	0.777
5	0.174	0.012	0.045	0.201	2.775	1.370
6	0.000	0.000	0.029	0.022	1.056	0.645
7	0.000	0.008	0.020	0.033	1.673	0.488

\*Rec RO=RO Recuperación; Mf=Microfiltración

**Cuadro A.11.** Valores de oro en mg/L.

Semana	NRO	NRO	Rec	Rec	Mf*	Mf*
	Entrada	Rechazo	RO*	RO*	Entrada	Permea- do
			Entrada	Rechazo		
1	0.060	0.130	0.140	0.120	0.310	0.280
2	0.020	0.040	0.010	0.040	0.340	0.340
3	0.140	0.140	0.120	0.080	0.580	0.450
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.215	0.128
5	0.063	0.007	0.001	0.015	0.168	0.221
6	0.000	0.005	0.117	0.104	0.211	0.249
7	0.020	0.012	0.064	0.002	0.146	0.060

\*Rec RO=RO Recuperación; Mf=Microfiltración

**Cuadro A.12.** Valores de zinc en mg/L.

<b>Semana</b>	<b>NRO Entrada</b>	<b>NRO Rechazo</b>	<b>Rec RO* Entrada</b>	<b>Rec RO* Rechazo</b>	<b>Mf* Entrada</b>	<b>Mf* Permea- do</b>
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.068	0.138	0.041	0.020
3	0.000	0.000	0.000	0.007	0.092	0.022
4	0.000	0.000	0.000	0.006	0.018	0.000
5	0.000	0.000	0.019	0.032	0.033	0.030
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016	0.000
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000

\*Rec RO=RO Recuperación; Mf=Microfiltración

## B. MUESTRA DE CÁLCULO

### B.1. Cálculos para el Retorno sobre la inversión

Antes de realizar el cálculo del retorno sobre la inversión, se definió que la fórmula a utilizar sería la misma que se ha utilizado en la empresa de estudio para otros proyectos.

$$\text{Retorno sobre la inversión (ROI)} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Beneficio}} \quad (\text{B.1})$$

Donde,

- Inversión: costos de inversión de la propuesta más costos operativos, \$.
- Beneficio: ahorro de agua, \$/año.
- ROI: retorno sobre la inversión, año.

Primero, se tiene que la propuesta completa tiene el siguiente retorno sobre la inversión:

$$ROI = \frac{(\$155,956.20 + \$94,569)}{\$99,424.25/\text{año}} \quad (\text{B.2})$$

$$ROI = \frac{\$250,525.20}{\$99,424.25/\text{año}} \quad (\text{B.3})$$

$$ROI = 2.52 \text{ años} \quad (\text{B.4})$$

Por último, para el segundo escenario de la propuesta elegida se obtuvo el siguiente resultado:

$$ROI = \frac{(\$113,758.57 + \$47,277)}{\$70,307.47/\text{año}} \quad (\text{B.5})$$

$$ROI = \frac{\$161,035.57}{\$70,307.47/\tilde{\text{año}}} \quad (\text{B.6})$$

$$ROI = 2.29\tilde{\text{años}} \quad (\text{B.7})$$



# ANEXOS

## A. Equipos y procedimientos utilizados para la caracterización a lo largo del tiempo

**Cuadro A.13.** Equipo utilizado en el análisis de caracterización de aguas residuales a lo largo del tiempo.

Equipo	Fabricante
Conductímetro	Oakton
Kit de prueba de dureza	Hanna Instruments
Colorímetro portátil	HACH DR900
Termómetro digital	Fisher Scientific
pHmetro	Oakton
Kit de prueba de sílice	HACH SI-5
Absorción atómica	Agilent Technologies
Micropipeta	Fisherbrand
Cristalería general	Fisherbrand

### A.1. Procedimientos de medición

#### 1. Dureza

a) *Rango alto - 0 a 300 mg/L de CaCO<sub>3</sub>*

Retirar la tapa del vaso de plástico pequeño. Enjuagar el vaso de plástico con la muestra de agua, llenarlo hasta la marca de 5 mL. Volver a colocar el tapón.

Añadir 5 gotas de buffer de dureza a través del orificio de la tapa y mezclar cuidadosamente girando el vaso en círculos.

Añadir 1 gota de Indicador Calmagite a través del orificio del tapón y mezclar. La solución deberá adquirir un color rojo violáceo.

Tomar la jeringa de valoración y empujar el émbolo completamente dentro de la jeringa. Insertar la punta en la solución HI 3812-0 EDTA y tirar del émbolo hasta que el borde inferior del sello esté en la marca de 0 mL de la jeringa.

Colocar la punta de la jeringa en el orificio de la tapa del vaso de plástico y añadir lentamente la solución de valoración gota a gota, agitando para mezclar después de cada gota.

Continuar añadiendo la solución de valoración hasta que la solución se vuelva púrpura, luego mezclar durante 15 segundos después de cada gota adicional hasta que la solución se vuelva azul.

Leer los mililitros de solución de valoración en la escala de la jeringa y multiplicar por 300 para obtener mg/L (ppm) de  $\text{CaCO}_3$ .

*b) Rango bajo - 0 a 30 mg/L de  $\text{CaCO}_3$*

Si el resultado es inferior a 30 mg/L, la precisión de la prueba puede mejorarse mediante el siguiente procedimiento.

Retirar la tapa del vaso de plástico grande. Enjuagarlo con la muestra de agua, llenarlo hasta la marca de 50 mL. Volver a taponarlo.

Proceder a la valoración como en el caso de la prueba de rango alto.

Leer los mililitros de solución de valoración en la escala de la jeringa y multiplicar por 30 para obtener mg/L (ppm) de  $\text{CaCO}_3$ .

## 2. Cloro

*a) Rango - 0.05 a 4.00 mg/L de  $\text{Cl}_2$*

Iniciar el programa 87 Chlorine, F&T PP MR.

Preparar el blanco: llenar la cubeta de muestra con 10 mL de muestra.

Limpiar la cubeta de la muestra del blanco.

Introducir el blanco en el soporte de la cubeta.

Pulsar ZERO. En la pantalla aparecerá 0.00 mg/L de  $\text{Cl}_2$ .

Preparar la muestra: Llenar una segunda cubeta de muestra con 10 mL de muestra.

Añadir el contenido de un paquete de polvo de Cloro Libre DPD para 25 mL de muestra a la celda de la muestra preparada.

Colocar el tapón en la cubeta de muestra preparada. Invertir la celda de la muestra varias veces para mezclar. Un color rosado aparecerá si el cloro está presente. Pasar inmediatamente al siguiente paso.

Limpiar la cubeta de la muestra preparada.

Antes de que transcurra un minuto desde la adición del reactivo, introducir la muestra preparada en el soporte de la cubeta.

Precionar READ. Los resultados se mostrarán en mg/L de  $\text{Cl}_2$ .

### 3. Sílice

#### a) *Rango alto - 0 a 600 mg/L de $\text{SiO}_2$*

Utilizar el cuentagotas y agregar 1 mL de muestra al frasco.

Rellenar el frasco hasta la marca de 20 mL con agua desionizada. Mezclar haciendo girar la solución.

Rellenar dos tubos hasta la primera línea (5 mL) con la muestra diluida.

Colocar uno de los tubos en la abertura izquierda de la caja del comparador de colores.

Agregar un sobre de reactivo en polvo de ácido y un sobre de reactivo en polvo de molibdato al segundo tubo. Mezclar haciendo girar la solución.

Esperar 10 minutos. Aparecerá un color amarillo si hay sílice o fosfato en la muestra.

Agregar un sobre de reactivo en polvo de ácido cítrico al mismo tubo. Mezclar haciendo girar la solución.

Esperar 2 minutos. La interferencia del fosfato es eliminada en este paso.

Agregar un sobre de reactivo en polvo de sílice 3 al mismo tubo. Mezclar haciendo girar la solución.

Esperar 5 minutos. Deberá aparecer un color azul.

Colocar el segundo tubo en la caja del comparador de colores.

Sostener la caja del comparador de colores delante de una fuente de luz.

Girar el disco de color hasta que los colores coincidan.

Leer el resultado en la ventana de la escala. Multiplicar el valor por 20 para obtener el resultado en mg/L de  $\text{SiO}_2$ .

*b) Rango bajo - 0 a 30 mg/L de  $\text{SiO}_2$*

Rellenar dos tubos hasta la primera línea (5 mL) con la muestra.

Agregar un sobre de reactivo en polvo de ácido y un sobre de reactivo en polvo de molibdato a un tubo. Mezclar haciendo girar la solución.

Esperar 10 minutos. Aparecerá un color amarillo si hay sílice o fosfato en la muestra.

Agregar un sobre de reactivo en polvo de ácido cítrico al mismo tubo. Mezclar haciendo girar la solución.

Esperar 2 minutos. La interferencia del fosfato es eliminada en este paso.

Agregar un sobre de reactivo en polvo de sílice 3 al mismo tubo. Mezclar haciendo girar la solución.

Esperar 5 minutos. Deberá aparecer un color azul si hay sílice en la muestra.

Colocar el tubo con el blanco en la abertura izquierda de la caja del comparador de colores. Colocar el tubo con la muestra preparada en la caja del comparador de colores.

Sostener la caja del comparador de colores delante de una fuente de luz.

Girar el disco de color hasta que los colores coincidan.

Leer el resultado en mg/L de  $\text{SiO}_2$  en la ventana de la escala.

#### 4. Metales pesados

*a) Curva de calibración*

Preparar 5 alícuotas: 0.5 mg/L, 1.0 mg/L, 2.0 mg/L, 5.0 mg/L para la curva de calibración y 1.5 mg/L como punto de chequeo. Esto para cada uno de los metales a determinar.

Para la alícuota de 0.5 mg/L, utilizar una pipeta y medir 125 microlitros de los estándares de cada uno de los metales. Verter los 125 microlitros

en un balón aforado de 250 mL. LLenar con agua desionizada hasta la marca de aforo.

Para la alícuota de 1.0 mg/L, utilizar una pipeta y medir 100 microlitros de los estándares de cada uno de los metales. Verter los 100 microlitros en un balón aforado de 100 mL. LLenar con agua desionizada hasta la marca de aforo.

Para la alícuota de 2.0 mg/L, utilizar una pipeta y medir 200 microlitros de los estándares de cada uno de los metales. Verter los 200 microlitros en un balón aforado de 100 mL. LLenar con agua desionizada hasta la marca de aforo.

Para la alícuota de 5.0 mg/L, utilizar una pipeta y medir 500 microlitros de los estándares de cada uno de los metales. Verter los 500 microlitros en un balón aforado de 100 mL. LLenar con agua desionizada hasta la marca de aforo.

Para la alícuota de 1.5 mg/L, utilizar una pipeta y medir 150 microlitros de los estándares de cada uno de los metales. Verter los 150 microlitros en un balón aforado de 100 mL. LLenar con agua desionizada hasta la marca de aforo.

Agitar bien y con cuidado cada uno de los balones.

Preparar la curva de calibración con las alícuotas anteriores.

Encender la computadora y preparar el programa de medición de metales.

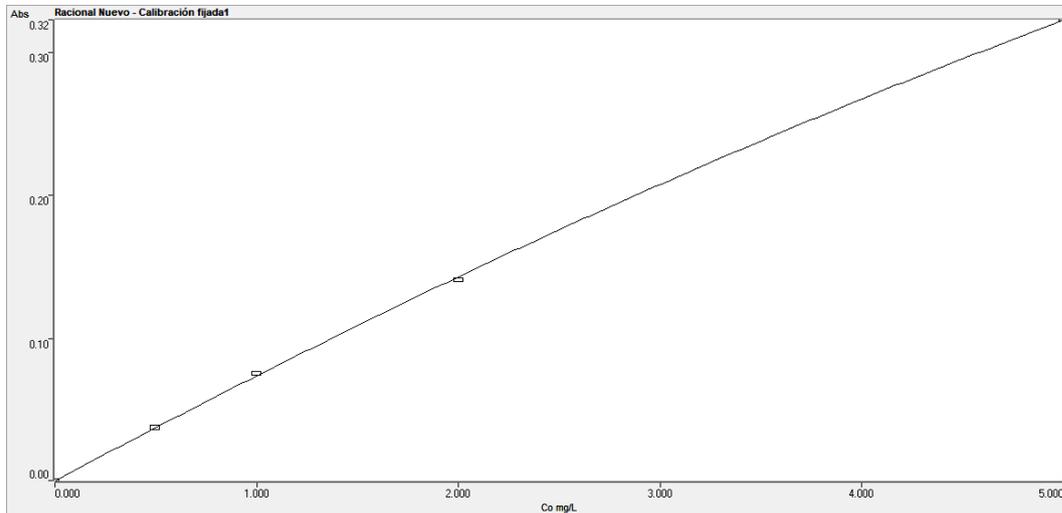
Encender el equipo de Absorción Atómica.

Medir cada una de las alícuotas con el equipo de Absorción Atómica.

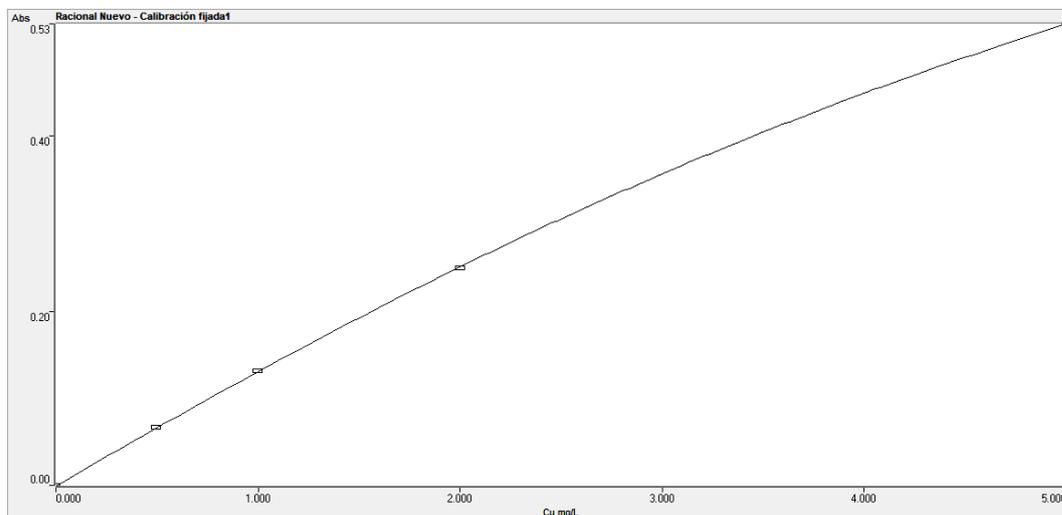
Guardar los datos de la curva de calibración en el programa de medición de metales.

- b) Al finalizar la medición de la curva de calibración, medir cada una de las muestras del sistema de tratamiento de aguas residuales.

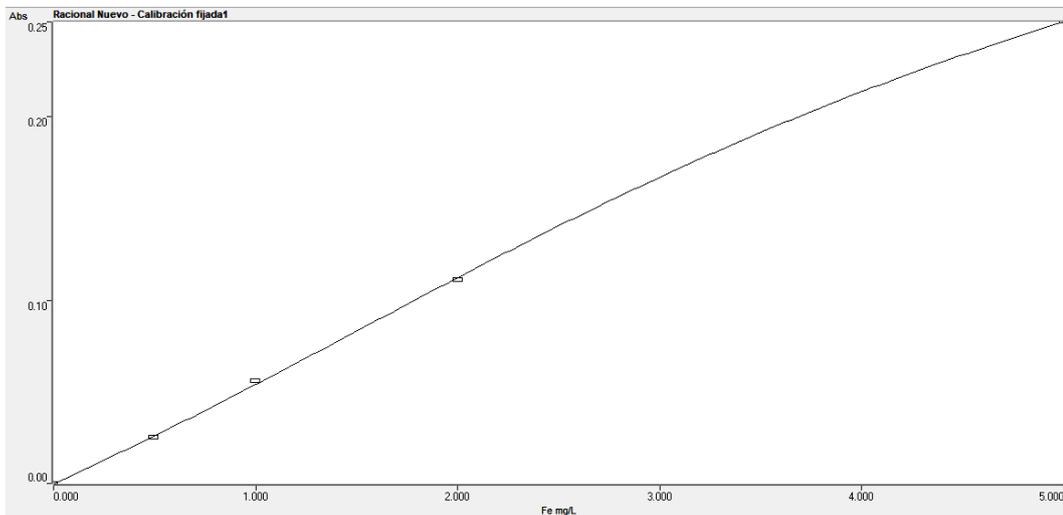
## B. Curva de calibración de los metales pesados analizados en la caracterización de aguas residuales



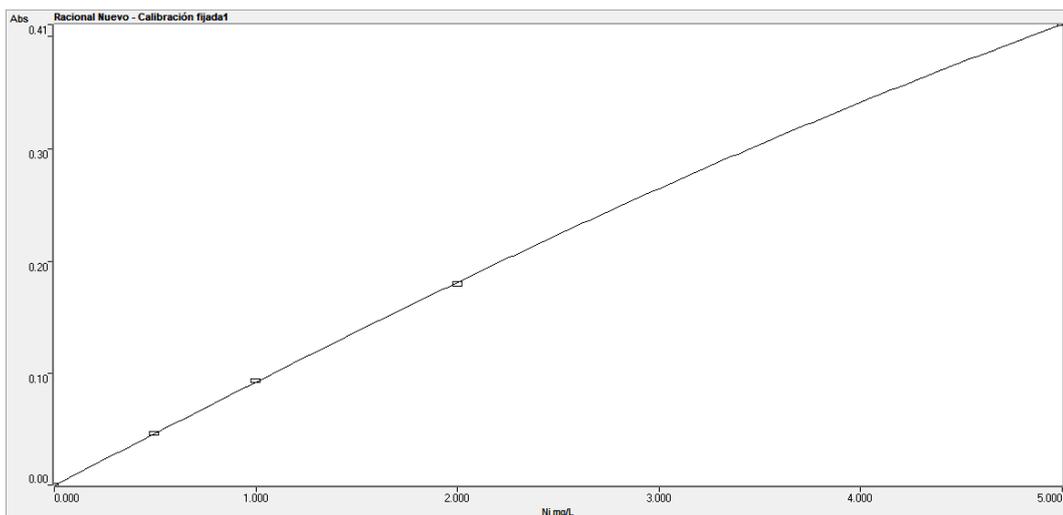
**Figura 10.33.** Curva de calibración del Cobalto mediante el uso de un equipo de absorción atómica. (Elaboración propia)



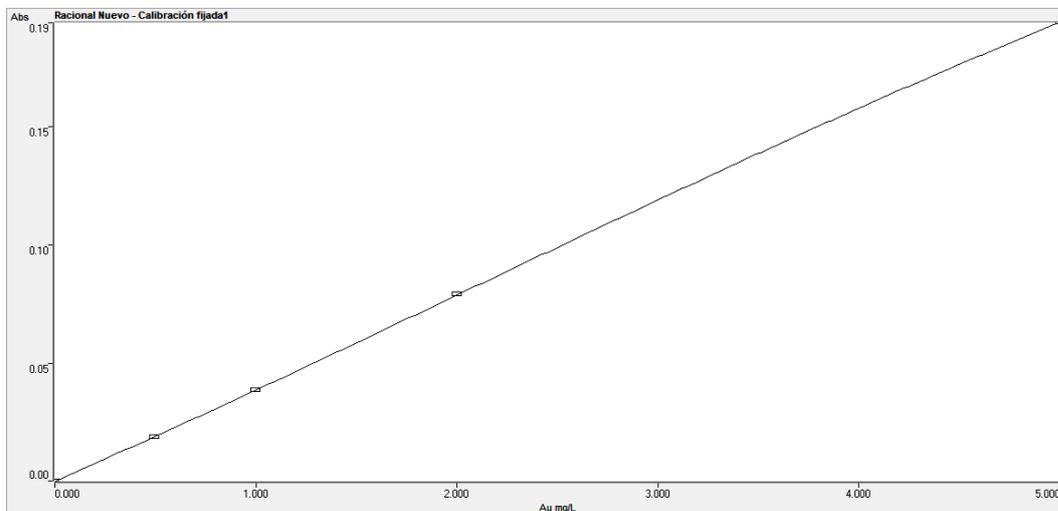
**Figura 10.34.** Curva de calibración del Cobre mediante el uso de un equipo de absorción atómica. (Elaboración propia)



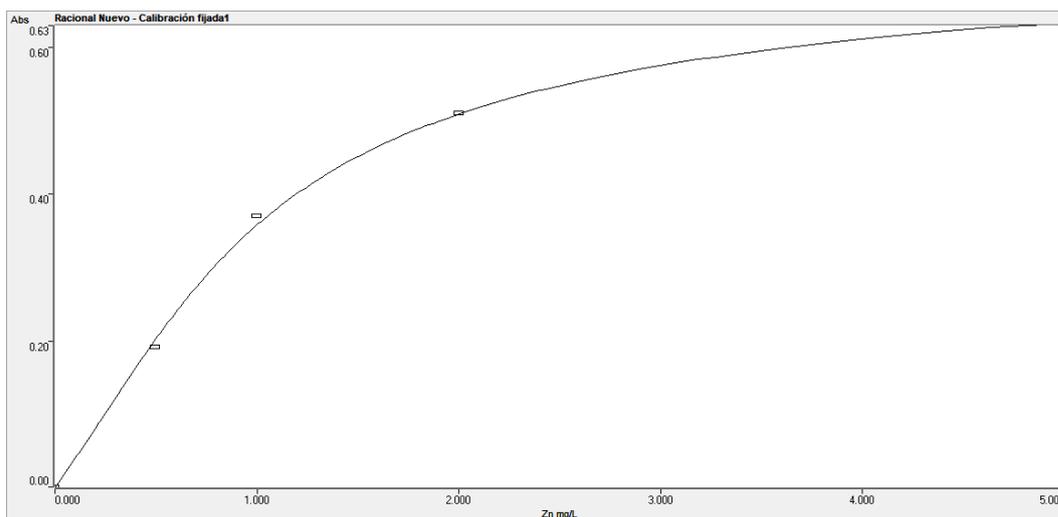
**Figura 10.35.** Curva de calibración del Hierro mediante el uso de un equipo de absorción atómica. (Elaboración propia)



**Figura 10.36.** Curva de calibración del Níquel mediante el uso de un equipo de absorción atómica. (Elaboración propia)



**Figura 10.37.** Curva de calibración del Oro mediante el uso de un equipo de absorción atómica. (Elaboración propia)



**Figura 10.38.** Curva de calibración del Zinc mediante el uso de un equipo de absorción atómica. (Elaboración propia)