



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ  
INFORME TÉCNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL**

**INGENIERIA BIOQUÍMICA**

**PRESENTA:**

**JORGE ALEXIS LÓPEZ LÓPEZ**

**No. DE CONTROL: 14270392**

**NOMBRE DEL PROYECTO:**

**TRATAMIENTO DE AGUA DE UNA INDUSTRIA DE PIGMENTOS  
DE APLICACIÓN EN ALIMENTOS**

**PERIODO DE REALIZACIÓN:**

**ENERO – JUNIO 2019**

**ASESOR INTERNO:**

**DR. JOSE HUMBERTO CASTAÑÓN GONZÁLEZ**

**ASESOR EXTERNO:**

**DRA. CLAUDIA ROSARIO MURO URISTA**

**TUXTLA GUTIERREZ, CHIAPAS. JUNIO DEL 2019**

# ÍNDICE

<b>1. RESUMEN .....</b>	<b>7</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
<b>3. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.....</b>	<b>9</b>
3.1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA.....	9
3.2. MISIÓN.....	11
3.3. VISIÓN.....	11
3.4. VALORES DE LA INSTITUCION .....	11
3.5. UBICACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.....	12
<b>4. PROBLEMA A RESOLVER.....</b>	<b>13</b>
<b>5. OBJETIVOS.....</b>	<b>14</b>
5.1. OBJETIVO GENERAL .....	14
5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	14
<b>6. JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>15</b>
<b>7. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
7.1. EFLUENTES DE LA INDUSTRIA ALIMENTARIA.....	16
7.2. PIGMENTOS .....	16
7.3. CLASIFICACIÓN DE LOS PIGMENTOS.....	18
7.4. PIGMENTOS INORGÁNICOS.....	19
7.4.1. PIGMENTOS INORGÁNICOS SINTÉTICOS .....	19
7.4.2. PIGMENTOS INORGÁNICOS NATURALES.....	19
7.4.3. COLORANTES AZO.....	19
7.5. PIGMENTOS ORGÁNICOS.....	21
7.6. TRATAMIENTOS DE AGUAS INDUSTRIALES DE PIGMENTOS.....	23
7.6.1 ADSORCIÓN.....	24
7.6.2. TIPOS DE ADSORCIÓN .....	24
7.6.2.1. ADSORCIÓN POR LOTE.....	25

7.6.2.2. ADSORCIÓN EN COLUMNAS.....	25
7.7. ARENA.....	26
7.8. INTERCAMBIO IÓNICO .....	27
7.9. IÓN .....	27
7.10. RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO .....	27
7.11. TIPOS DE RESINA SEGÚN SU ESTRUCTURA .....	29
<i>Las resinas se pueden clasificar en 3 tipos según a su estructura, las cuales pueden ser: Microporosas o Tipo Gel, Macroporosas o Macroreticulares y Isoporosas.....</i>	
7.11.1. Microporosas o Tipo Gel.....	29
7.11.2. Macroporosas o Macroreticulares .....	29
7.11.3. Isoporosas.....	29
7.12. SEGÚN SE GRUPO FUNCIONAL DE LA RESINA.....	30
<i>Las resinas se pueden dividir en 4 tipos de acuerdo a su grupo funcional que pueden ser: resina catiónica de ácido fuerte, resina catiónica de ácido débil, resina aniónica de base fuerte y resina aniónica de base débil.....</i>	
7.12.1. Resina Catiónica de Ácido Fuerte .....	30
7.12.2. Resina Catiónica de Ácido Débil .....	30
7.12.3. Resina Aniónica de Base Fuerte.....	30
7.12.4. Resina Aniónica de Base Débil.....	31
<b>8. MÉTODO.....</b>	<b>32</b>
8.1. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL EFLUENTE.....	33
8.1.1. DETERMINACIÓN DE pH .....	33
8.1.2. DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDAD .....	34
8.1.3. DETERMINACIÓN DE CLORUROS .....	35
8.1.4. DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES.....	37
8.1.5. DETERMINACIÓN ESPECTOFOTOMÉTRICA UV-vis.....	38
8.2. EVALUACION DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUA INDUSTRIAL.....	39
8.2.1. PROCESO DE FILTRACIÓN DEL AGUA RESIDUAL UTILIZANDO ARENA.....	42
8.2.2. TRATAMIENTO CON PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO. ....	43

8.2.3.	TRATAMIENTO 1 (RESINA ANIÓNICA).	45
8.2.4.	TRATAMIENTO 2 RESINA MIXTA.	46
8.2.5.	TRATAMIENTO 3 RESINA ANIONICA Y MIXTA	46
<b>9.</b>	<b>RESULTADOS.</b>	<b>48</b>
9.1.	CARACTERÍSTICAS DEL EFLUENTE	48
9.2.	FILTRACION CON ARENA.	49
9.3.	TRATAMIENTO CON PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO.	50
9.3.1.	TRATAMIENTO 1 y 2	51
9.3.2.	TRATAMIENTO 3	53
<b>10.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>58</b>
<b>11.</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>59</b>

## ÍNDICE DE FIGURA

### 3. DESCRIPCION DE LA EMPRESA

Figura 3. 1. Inauguración del Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental (LIIA). .....	9
Figura 3. 2. Localización del Instituto Tecnológico de Toluca (ITT).....	12

### 7. MARCO TEÓRICO

Figura 7. 1. Pigmentos utilizados en las industrias (Morales, 2012).....	17
Figura 7. 2. Estructura química del pigmento amarillo tartracina (Parra y Barajas, 2011). .....	18
Figura 7. 3. Clasificación de los pigmentos según su origen.....	18
Figura 7. 4. Pigmento natural (Morales, 2012). .....	21
Figura 7. 5. Proceso de adsorción (Coronas y Sebastián, 2013). .....	24
Figura 7. 6. Proceso de adsorción por lote (Zeki, 2018).....	25
Figura 7. 7. Proceso de adsorción por columna (Zeki, 2018). .....	26
Figura 7. 8. Representación esquemática de las resinas intercambiadoras de cationes y de aniones (Dardel, 2018). .....	28
Figura 7. 9. Iones que están presentes en el agua (Dardel, 2018).....	29

### 8. MÉTODO

Figura 8. 1. Etapas del método para el tratamiento de agua.....	32
Figura 8. 2. Potenciómetro marca Hanna.....	34
Figura 8. 3. Buffer calibradores de potenciómetro.....	34
Figura 8. 4. Conductímetro marca Hanna. ....	35
Figura 8. 5. Buffer calibrador de conductímetro. ....	35
Figura 8. 6. Equipo volumétrico para la determinación de cloruros.....	36
Figura 8. 7. Determinación de cloruros a partir de la NMX-AA-073-SCFI-2001. ....	37
Figura 8. 8. Horno de secado eléctrico.....	37
Figura 8. 9. Cápsulas para la determinación de sólidos totales. ....	38
Figura 8. 10. Espectrofotómetro UV-vis Pelkin Elmer Lambda 35.....	39
Figura 8. 11. Arena y resinas hidratadas con agua desionizada. ....	42
Figura 8. 12. Columna empacada con arena. ....	43
Figura 8. 13. Pretratamiento en columna de arena. ....	43

Figura 8. 14. Columnas de vidrio de 34 x 450. ....	44
Figura 8. 15. Columna A, lecho de resina aniónica. Columna B, lecho de resina mixta.....	44
Figura 8. 16. Lecho de resina aniónica con muestra 4.....	45
Figura 8. 17. Bomba peristáltica.....	45
Figura 8. 18. Efluente tratado con resina aniónica. ....	46
Figura 8. 19. Proceso de tratamiento en continuo en columnas de resina aniónica y resina mixta. ....	47

## 9. RESULTADO

Figura 9. 1. Muestreo de agua residual proveniente de la industria de pigmentos. ....	48
Figura 9. 2. Efluente filtrado con arena. ....	50
Figura 9. 3. Porcentaje de depuración del efluente con resina aniónica y mixta... ..	52
Figura 9. 4. Efluente tratado con lechos de resinas mixta y aniónica.....	52
Figura 9. 5. Porcentajes de depuración de agua de los trenes de tratamiento. ....	54
Figura 9. 6. Barridos de los tratamientos en espectrofotómetro UV-vis. ....	55
Figura 9. 7. Diagrama de proceso a nivel laboratorio para la depuración de agua para la industria de pigmentos. ....	57

## ÍNDICE DE TABLA

### 7. MARCO TÉORICO

Tabla 7. 1 Pigmentos sintéticos utilizados en las industrias en México.....	20
Tabla 7. 2. Pigmentos exentos de la certificación por la FDA. ....	22
Tabla 7. 3. Tipos de adsorbentes. ....	26

### 8. MÉTODO

Tabla 8. 1. Parámetros y norma para la caracterización del efluente.....	33
Tabla 8. 2. Características de la arena.....	40
Tabla 8. 3. Características de la resina aniónica.....	40
Tabla 8. 4. Características de la resina mixta.....	41

### 9. RESULTADO

Tabla 9. 1. Caracterización fisicoquímica de los efluentes provenientes de la industria de pigmentos. ....	49
Tabla 9. 2. Resultados de la columna de arena. ....	50
Tabla 9. 3. Resultados del tren de tratamiento 1 y 2. ....	51
Tabla 9. 4. Características fisicoquímicas del tratamiento 3.....	53
Tabla 9. 5. comparación de los parámetros requeridos de la industria con lo obtenido en el tratamiento.....	55

## 1. RESUMEN

La presente investigación corresponde al estudio de un proceso de tratamiento de agua residual, para cumplir con las necesidades requeridas de una industria de pigmentos alimentarios. Para esto, se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica del efluente residual, se probaron las propuestas de tratamiento mediante el estudio del proceso de intercambio iónico, con la finalidad de obtener agua de buena calidad de acuerdo a los requerimientos de la industria: pH de 6-9, conductividad  $<260 \mu\text{S}/\text{cm}$ , cloruros de 250 mg/L, sólidos totales  $<300 \text{ mg}/\text{L}$  y eliminación de color.

La metodología se basó en el proceso de intercambio iónico con resinas poliméricas para la recuperación de agua, incluyendo un pretratamiento con arena para su operación. Como resultado del sistema propuesto a escala laboratorio, se obtuvieron los siguientes valores de salida del proceso: pH 8.3, cloruros 1.998 mg/L, conductividad  $0.01524 \mu\text{S}/\text{cm}$ , sólidos totales 217 mg/L y decoloración total de la muestra con un índice de eficiencia del 97%, lo que permite dar cumplimiento a los requerimientos de los parámetros de calidad de agua especificados por las necesidades de la empresa.

## 2. INTRODUCCIÓN

Las industrias generadoras de pigmentos ya sea de tipo orgánicos y/o inorgánicos ocupan grandes cantidades de agua para los procesos de la elaboración de este producto, y a la vez provocan la generación de agua residual de color que son vertidos en los cuerpos de agua. Las industrias de este sector buscan la manera de implementar procesos eficientes para el tratamiento de sus aguas.

Convencionalmente los procesos de tipo biológico son los más comúnmente empleados, sin embargo; no son eficientes dentro de este sector industrial debido a que la composición de la descarga de sus aguas residuales contiene componentes tóxicos como es el caso de cianuros, flúor, sales de arsénico, cloruros, bromuros, nitratos, materia orgánica, grasas y aceites además de una fuerte coloración que inhiben el proceso de degradación por vía biológica.

El reto de las industrias que generan pigmentos consiste en la propuesta de procesos eficientes para el tratamiento de sus aguas, que cumpla con los parámetros requeridos sin ocasionar problemas ambientales. Para el tratamiento de agua del presente trabajo se exige la propuesta de un proceso que logre alcanzar las condiciones específicas de calidad de agua como, por ejemplo, pH, color, cloruros y conductividad. Por tal motivo, en el presente trabajo se llevó a cabo la propuesta de un proceso de tratamiento por medio del uso de arena y resinas de intercambio iónico y de esta manera cumplir con los requerimientos que la industria de pigmentos demanda.

## 3. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

### 3.1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA

El Instituto Tecnológico de Toluca inició labores el 1 de septiembre de 1972, como centro de estudios Científicos y Tecnológicos no. 137. El 4 de septiembre de 1974 se fundó dentro del municipio de Metepec el Instituto Regional de Toluca plantel número 28 dentro del Sistema Nacional de Institutos Tecnológicos de acuerdo con la presidencia del Lic. Luis Echeverría Álvarez, iniciando con los niveles de escolaridad de: laboratoristas químicos, mantenimiento y electrónica, con una población estudiantil de 400 alumnos, 50 catedráticos y 20 administrativos. Para el año de 1982 se cambia el nombre y queda oficialmente como Instituto Tecnológico de Toluca.

El 16 de marzo de 2012, el presidente de México, Felipe Calderón Hinojosa, acompañado por el Gobernador del Estado de México, Eruviel Ávila Villegas, inauguraron el Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental (LIIA) como se puede ver en la Figura 3.1.



Figura 3. 1. Inauguración del Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental (LIIA).

El laboratorio de investigación en ingeniería ambiental esta constituido por dos niveles de trabajo: investigación de proyectos y de servicios externos. Este edificio cuenta con diferentes áreas de investigación:

- Estudios y aplicaciones ambientales de materiales.
- Prevención y control de la contaminación del agua.
- Tratamiento de contaminantes y gestión ambiental.
- Desarrollo y evaluación de materiales, tratamientos fisicoquímicos y de oxidación novedosos para la aplicación ambiental.

El LIIA cuenta con diferentes laboratorios acreditados por la Entidad Mexicana de Acreditación (Ema):

- Absorción.
- Absorción Atómica.
- Biosorbentes.
- Caracterización de Materiales.
- Cromatografía.
- Fisicoquímicos.
- Instrumentación Avanzada.
- Microbiología.
- Nanotecnología.
- Oxidación Química y Biológica.
- Planta de Tratamiento de Aguas.
- Pruebas Piloto.
- Síntesis y Aplicación de Materiales.
- Zeolitas y Colorantes.

Entre las áreas de investigación se encuentra el laboratorio de membranas bajo la responsabilidad de la Dra. Claudia Rosario Muro Urista.

Dentro del laboratorio de membrana se realizan estudios para la depuración y recuperación de agua a partir de efluentes residuales, esto se lleva a cabo a través de procesos eficientes y adecuados según las características de los efluentes. El laboratorio cuenta con diferentes equipos para llevar a cabo los procesos para el tratamiento de aguas, entre los cuales se encuentran: un espectrofotómetro UV-vis Pelkin Elmer, digestor Hach, rotavapor IKA, mufla LabTech, horno eléctrico Riossa, módulos y sistemas de membranas PALL y que también cuenta con una amplia gama de materiales de vidrio.

### **3.2. MISIÓN**

Ofrecer servicios de Educación Superior Tecnológica con calidad, equidad y pertinencia, orientados a la formación integral del ser humano mediante la oferta de programas educativos acreditados y que promuevan el desarrollo sustentable para la conformación de una sociedad justa y humana.

### **3.3. VISIÓN**

Ser una Institución de Educación Superior Tecnológica basada en valores y reconocida por ofrecer un servicio de calidad, mediante el desarrollo sostenido, sustentable y equitativo de su entorno y a través del alto desempeño de su personal.

### **3.4. VALORES DE LA INSTITUCION**

- El Ser Humano.
- Espíritu De Servicio.
- El Liderazgo.
- El Trabajo en Equipo.

### 3.5. UBICACIÓN DE LA INSTITUCIÓN

El Instituto Tecnológico de Toluca (ITT) se encuentra situado en Metepec, Estado de México, ubicado en Avenida Tecnológico 100, La Virgen, 52149, tal como se muestra en la Figura 3.2.



Figura 3. 2. Localización del Instituto Tecnológico de Toluca (ITT).

## **4. PROBLEMA A RESOLVER**

El consumo de agua para la producción de los productos en las industrias alimentarias es excesivo, es por ese motivo que las industrias de este sector se han enfocado al tratamiento de sus aguas para su recuperación con características idóneas de acuerdo con sus necesidades.

Para obtener el agua tratada es necesaria la determinación y el análisis de las características fisicoquímicas del efluente residual, para llevar a cabo la selección de procesos óptimos, novedosos y eficientes que permitan la recuperación de agua y el reusó dentro del proceso de manufactura del proceso o servicio de este sector industrial.

En el presente proyecto de investigación se llevó acabo el estudio de un efluente residual proveniente de una empresa productora de pigmentos de uso alimentario, situada en el Estado de México, con la finalidad de recuperar agua, para que la empresa pueda disponer de ella nuevamente dentro de sus procesos de manufactura, o de que pueda ser vertida a los cuerpos de agua sin ocasionar problemas ambientales con características específicas de pH, conductividad, cloruros, sólidos totales y la eliminación del color.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar un proceso de tratamiento de agua residual de una industria de pigmentos de uso alimentario utilizando resinas de intercambio iónico para su reusó o disposición.

### **5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Determinar las características fisicoquímicas del efluente proveniente de la descarga de una industria de pigmentos.
- Evaluar un proceso de tratamiento de agua residual de origen industrial utilizando resinas de intercambio iónico para su disposición o reusó.
- Diseño de la propuesta de tratamiento a nivel laboratorio para la recuperación de agua a partir de proceso de intercambio iónico de la descarga de efluente industrial.

## **6. JUSTIFICACIÓN**

El proyecto está basado en la investigación de la problemática de una empresa manufacturera de pigmentos del sector alimentario, ya que esta empresa es generadora de grandes volúmenes de efluentes residuales de colorantes sintéticos y que son llevadas a plantas tratadoras de agua para posteriormente ser descargadas, esta agua residual posee características con valores elevados de pH, conductividad, cloruros, sólidos totales y con una alta presencia de color.

La industria tiene como necesidad la incorporación de un tratamiento eficiente para sus efluentes que permita la recuperación de agua con características idóneas para ser dispuesta por la empresa productora de pigmento.

## **7. MARCO TEÓRICO**

### **7.1. EFLUENTES DE LA INDUSTRIA ALIMENTARIA**

En las industrias alimenticias se ocupan grandes cantidades de agua para las diferentes partes de los procesos de producción de alimentos que la integran, entre estas se encuentran; el lavado de la materia prima, diluciones, enfriamiento, elaboración, incorporación de agua al producto y transporte. Además de la producción de alimentos, el agua también se necesita para la limpieza de máquinas e instalaciones. Por este motivo, el consumo de agua origina a su vez, efluentes con diversos contenidos de residuos y con un alto grado de contaminación.

### **7.2. PIGMENTOS**

Las industrias generadoras de pigmentos a nivel mundial producen grandes cantidades de este material, que pueden llegar hasta las 700 toneladas al año entre naturales y sintéticos. El mercado mundial de los pigmentos sintéticos representa 400 millones de dólares de venta al año, de los cuales el 50% se encuentra dirigido a las industrias textiles y un 25% a la industria alimentaria (Guerrero et al., 2006).

Los pigmentos son sustancias naturales que le aportan colores a los alimentos, que además de ser aplicados en la industria alimentaria, también son ampliamente utilizados en la elaboración de cosméticos, pinturas, barnices, ropa, entre otros, como se puede observar en la Figura 7.1 (Dodera, 2019).

Los pigmentos se encuentran entre los compuestos químicos naturales más importantes, estos pueden producir una gran y variada gama de colores además de realizar funciones específicas que van de acuerdo con el aprovechamiento de la luz en la fotosíntesis, protección contra daños foto-oxidativos y en la regulación

del desarrollo y defensa. La mayoría de los pigmentos son nutrientes esenciales y algunos son provitaminas para humanos y animales. Se sabe que algunos pigmentos tienen beneficios nutricionales y para la salud adicionales, incluida la prevención y el tratamiento de enfermedades (Solovchenko et al., 2019).



Figura 7. 1. Pigmentos utilizados en las industrias (Morales, 2012).

En 1958, la *Food and Drug Administration*, (FDA) en su cláusula DELANEY estableció la prohibición de cualquier tipo de aditivo en alimentos, cosméticos y otros productos que indujera cáncer al ser ingerido por el hombre o algún animal. De esta manera, se prohibió el uso de los siguientes colorantes: azul No. 6; rojo No. 10, 11, 12 y 13; el amarillo No. 1 (en aplicación externa), No. 3 y No. 4 para medicamentos y cosméticos. En el área de alimentos, medicamentos y cosméticos se prohibió el rojo No. 2, violeta No. 1, grafito y anaranjado B (Méndez, 2005). De la misma manera el amarillo Subset y el amarillo tartracina se identificaron como agentes causantes de alergias, asma e inductores potenciales que agravan los síntomas de hiperactividad en niños, en la Figura 7.2 se puede observar la estructura química del amarillo tartracina (Tafoya et al., 1999 y Barajas y parras., 2011).

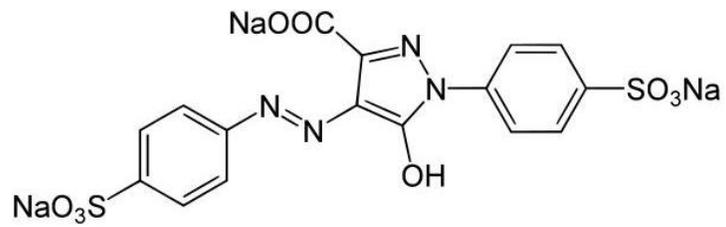


Figura 7. 2. Estructura química del pigmento amarillo tartracina (Parra y Barajas., 2011).

### 7.3. CLASIFICACIÓN DE LOS PIGMENTOS

Los pigmentos se clasifican según su origen, como se puede observar en la Figura 7.3.

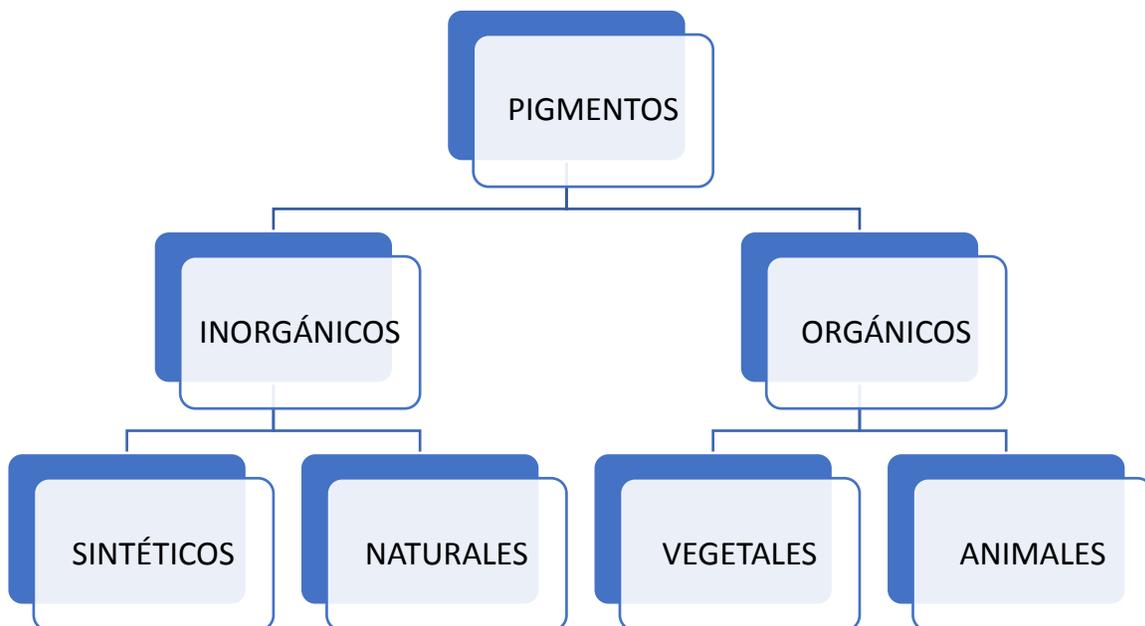


Figura 7. 3. Clasificación de los pigmentos según su origen.

## **7.4. PIGMENTOS INORGÁNICOS**

### **7.4.1. PIGMENTOS INORGÁNICOS SINTÉTICOS**

Los pigmentos inorgánicos sintéticos, no se encuentran naturalmente y contienen compuestos químicos definidos o bien mezclas de compuestos. Estos pigmentos se obtienen en la mayoría de los casos por medio de procesos de síntesis por vía seca o húmeda (Hernández, 1999).

### **7.4.2. PIGMENTOS INORGÁNICOS NATURALES**

Los pigmentos inorgánicos son compuestos que al ser aplicados a un sustrato ya sea una fibra textil, cuero, papel, plástico o alimento, le confiere un color permanente. El colorante debe ser aplicado en disolución o emulsión para lograr la afinidad con el sustrato y este pueda ser absorbido. Los colorantes en general son solubles en el medio en el que se aplican o en el producto final. La producción mundial de colorantes es del orden de 90 millones de kg al año (Sanz, 2008).

Los colorantes artificiales son solubles en agua, debido a la presencia de grupos de ácido sulfónico, y consecuentemente son fáciles de utilizar, generalmente en forma de sales sódicas, en líquidos y materiales pastosos. También se pueden utilizar en forma insoluble, como lacas con hidróxido de aluminio (Roció, 2013).

Los pigmentos sintéticos requieren de una certificación por la FDA, porque estos tipos de pigmentos tienen que pasar por pruebas de calidad y toxicidad para su uso debido a que puede incluir sustancias químicas sintetizadas con un alto grado de pureza.

### **7.4.3. COLORANTES AZO**

Los colorantes azoicos tienen un 31.5% de las ventas mundiales y que pueden tener estructura mono, di o triazo. Los azoicos son los más consumidos y se caracterizan por la presencia de un grupo azo ( $-N=N-$ ) en la molécula que une, al menos, dos anillos aromáticos. El grupo azo tiene 6 electrones móviles (deslocalizados) que a su vez se encuentran unidos con los anillos aromáticos

adyacentes. Todos los compuestos azoicos proporcionan colores, pero no todos son útiles como colorantes alimentarios. Los colorantes azoicos más vendidos son el amarillo 5 y 6, el rojo 2, 4 y 40 y el naranja B (Guerrero Isabel et al., 2006). En esta clase se destacan tres familias las cuales son: monoazo, diazo y triazo: cada una de ellas tienen diferentes propiedades y le confieren una clasificación al colorante azo, que puede ser tipo: ácido, básico, reactivo, directo, disperso y mordente (Kirk-Othmer, 1993).

En la Tabla 7.1, se presenta un listado de algunos pigmentos sintéticos con su clasificación más utilizados en las industrias en México (Guerrero et al., 2006).

Tabla 7. 1 Pigmentos sintéticos utilizados en las industrias en México.

Nombre Oficial	Clasificación Química	Color	Usos
Rojo 3 Eritrosina	Xantana	Rosa-Azul	Salsas, bebidas carbonatadas, pan, cereales, emulsiones aceite/agua
Rojo 40	Monoazo	Rojo-Amarillo	Gelatinas, salsas, bebidas carbonatadas, bebidas en polvo, confitería, pan y cereales, emulsiones, aceite/agua
Amarillo 5 Tartracina	Pirazolona	Verde-Amarillo	Gelatinas, bebidas en polvo, bebidas carbonatadas confitería, pan y cereales, emulsiones aceite/agua
Azul 1	Trifenilmetano	Verde-Azul	Bebidas carbonatadas, bebidas en polvo, confitería, pan y cereales, emulsiones aceite/agua

Azul 5	Índigo	Azul Intenso	Confitería, gelatinas, emulsiones aceite/agua
Verde 3	Trifenilmetano	Verde-Azul	Gelatinas, bebidas en polvo, bebidas carbonatadas, confitería, pan y cereales, emulsiones aceite/agua
Naranja B	Pirazolona	Rojo-Amarillo	Helados

## 7.5. PIGMENTOS ORGÁNICOS

Los pigmentos naturales u orgánicos son aquellos que se obtienen por medio de microorganismos, vegetales, animales y minerales. A nivel mundial el mercado de los pigmentos naturales representa 940 millones de dólares de venta al año (Parra y Barajas., 2011).

Los pigmentos naturales son los que se obtienen por fuentes de la naturaleza como se ilustra en la Figura 7.4 y que a su vez son utilizados para darle color a algunos productos. La *Food and Drug Administration* (FDA) y otras agencias gubernamentales no requieren que se certifiquen los pigmentos naturales como aditivos de color como es el caso de los pigmentos sintéticos. En la Tabla 7.2 se mencionan algunos pigmentos exentos de las certificaciones por la FDA (Guerrero *et al.*, 2006).



Figura 7. 4. Pigmento natural (Morales, 2012).

Aceite de endospermo de maíz (sólo para alimento de aves)	Extracto de color uva (enocianina) (sólo para alimentos, no bebidas)
Aceite de zanahoria	Gluconato ferroso (sólo para pigmentar aceitunas negras)
Ácido carmínico (extracto de cochinilla)	Glutamato de hierro
Aceite de semilla de algodón desgrasado	Harina de algas secas (sólo para alimento de aves)
Azafrán	Harina de semilla de algodón parcialmente tostada
Azul ultramarino (sólo para alimento animal)	Jugo de frutas Jugo de vegetales
b-apo-8-carotenal	Oleoresina de paprika
b-caroteno	Oleoresina turmérica
Betabel deshidratado	Óxido ferroso (sólo para alimento animal)
Cantaxantina	Paprika y oleoresina de paprika
Color caramelo	Riboflavina
Dióxido de titanio	Tagetes erecta (cempasúchil) extracto y harina (sólo para alimento animal)
Extracto de anato (achiote)	
Extracto de cáscara de uva (sólo para bebidas)	

Tabla 7. 2. Pigmentos exentos de la certificación por la FDA.

La clasificación de los pigmentos naturales de acuerdo al grado de solubilidad se puede encontrar en tres tipos:

1. Los hidrosolubles, estos tipos de pigmentos son los que pueden integrar con el agua.
2. Los liposolubles, estos son solubles en grasas o en aceites.
3. Minerales.

## 7.6. TRATAMIENTOS DE AGUAS INDUSTRIALES DE PIGMENTOS

Los problemas medio ambientales que se viven actualmente se deben principalmente a la descarga de compuestos químicos complejos hacia los cuerpos de agua. Una de las industrias con mayor descarga de contaminantes nocivos es la que corresponde a la manufactura de colorantes o pigmentos, debido a que en sus procesos de fabricación se generan grandes volúmenes de agua residual con concentraciones de contaminantes altamente tóxicos.

Las industrias que se dedican a la elaboración de este pigmentos o colorantes llegan a producir mas de 10000 tipos de éstos y se ha reportado que el 20% son descargados a los cuerpos agua. Generalmente, este tipo de descargas con alto contenido de color no pueden ser tratadas por tecnologías convencionales como el uso de procesos biológicos debido a la complejidad poliaromática que puede contener la descarga por la presencia del color (Cuevas y Garzón., 2009). Los colorantes no suelen ser tóxicos, pero sí muy poco biodegradables (Vilaseca, 2015).

Tradicionalmente se han aplicado diversas tecnologías basadas en tratamientos fisicoquímicos para la eliminación del color de los efluentes provenientes de descargas industriales provenientes de la industria textil, cosmética, farmacéutica, alimentaria, entre otros; la aplicación de estos procesos se va ampliando de acuerdo a la complejidad del color presente en los efluentes (Condorchem, 2013). A continuación, se enlistan los procesos más empleados para la eliminación de color presente en aguas residuales:

1. Coagulación-Floculación.
2. Procesos Fentón.
3. Ozonación.
4. Membranas.
5. Procesos electroquímicos.
6. Procesos basados en biotecnología.

- 7. Adsorción
- 8. Intercambio iónico

### 7.6.1 ADSORCIÓN

La adsorción es un fenómeno superficial que involucra la acumulación o concentración de sustancias, en una superficie o interface, donde el compuesto que se adsorbe se le llama adsorbato y la fase donde ocurre la adsorción se le conoce como adsorbente (Rosas, 2012).

La adsorción corresponde a la transferencia de una molécula de la fase líquida hacia la fase sólida. Este fenómeno obedece a las leyes de equilibrio entre la concentración en fase líquida y la concentración en fase sólida, sobre la superficie del material adsorbente (Díaz, 2003).

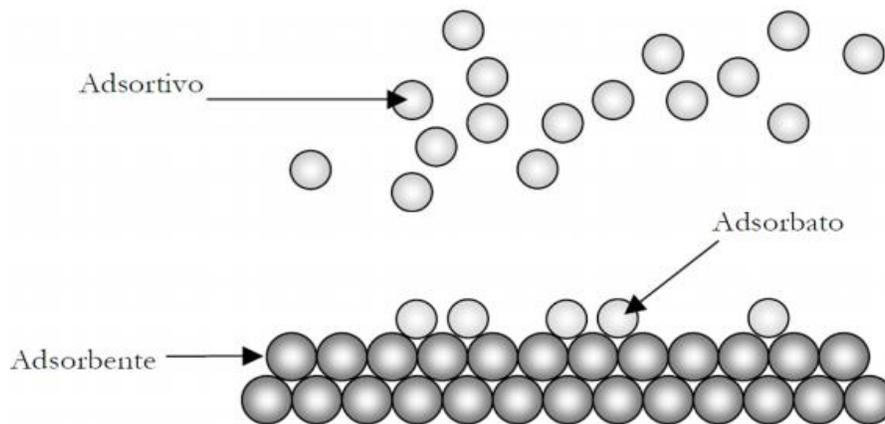


Figura 7. 5. Proceso de adsorción (Coronas y Sebastián., 2013).

En la Figura 7.5 se muestra de como se lleva el proceso de adsorción, por lo cual el adsorbivo es la sustancia en fase fluida, el adsorbato es la sustancia en el estado adsorbido y el adsorbente es el material sólido sobre el que se produce la adsorción.

### 7.6.2. TIPOS DE ADSORCIÓN

### 7.6.2.1. ADSORCIÓN POR LOTE

El proceso de adsorción por “*batch*” o en lote consiste en la unión de un componente líquido y uno sólido en una superficie que se encuentre cerrada ya sean tanques o galones aforados de manera que mediante el constante movimiento se produzca una reacción hasta que se llegue al equilibrio (Salas *et al.*, 2016). En la operación por carga o *batch* no hay estado estable (Zeki, 2018). Esta operación se considera una adsorción de un solo paso, en el cual una solución líquida se trata con un adsorbente sólido como se puede ver en la Figura 7.6.

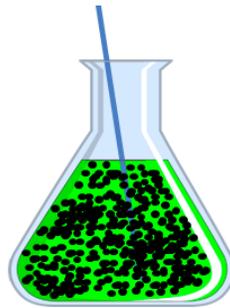


Figura 7. 6. Proceso de adsorción por lote (Zeki, 2018).

### 7.6.2.2. ADSORCIÓN EN COLUMNAS

Los procesos de adsorción por columnas consisten en hacer pasar un fluido gas o líquido que contiene el adsorbato a través de un lecho poroso de adsorbente contenido en una columna (Figura 7.7). La adsorción en columnas se puede considerar como un proceso de separación de múltiples etapas. La eficiencia de la separación es mejor que la de la operación por lotes. Además, tanto los pasos de contacto y separación como la regeneración del adsorbente se llevan a cabo en el mismo equipo. Las columnas de adsorción se utilizan ampliamente en la adsorción de gases y soluciones claras y en el intercambio iónico (Zeki, 2018).

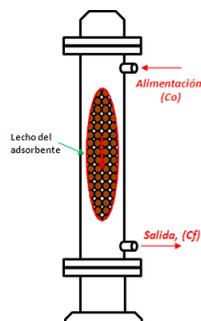


Figura 7. 7. Proceso de adsorción por columna (Zeki, 2018).

Existen diferentes tipos de adsorbentes o lechos empleados en los sistemas de columna, en la Tabla 7.3 se enlistan los tipos más comúnmente empleados (Coronas y Sebastián., 2013).

Tabla 7. 3. Tipos de adsorbentes.

Material
Carbón Activado
Óxidos Metálicos
Hidróxidos
Carbonatos
Alúminas Activadas
Arenas
Resinas Adsorbentes de Intercambio Iónico

### **7.7. ARENA**

La arena se utiliza con frecuencia como proceso de filtración, es un método de pretratamiento muy robusto para separar los sólidos suspendidos del agua, porque actúa como un tamizador que detiene las partículas de mayor tamaño al de los espacios existentes entre dicho grano. La filtración media consiste en una capa múltiple de la arena con una variedad en tamaño y gravedad específica. Los filtros de arena pueden proveer en diversos tamaños y ambos pueden ser manejados manualmente o de forma totalmente automática (Conagua, 2016). Existen tres tipos de filtración por arena los cuales son:

- Los filtros de arena rápidos.
- Los filtros de arena semirapidos.
- Los filtros de arena lentos.

## **7.8. INTERCAMBIO IÓNICO**

Es un proceso mediante el cual los grupos funcionales con cargas positivas o negativas que se mantienen sobre un sólido poroso insoluble son intercambiados por los iones presentes en solución acuosa. Las resinas sintéticas para intercambio iónico se produjeron por primera vez en el año de 1935, poseen una amplia aplicación en el ablandamiento y deionización del agua, purificación de soluciones y separación de iones. Este intercambio de iones es un cambio de electrólitos de una solución, que se puede referir a procesos de purificación, separación, y descontaminación de disoluciones que contenga estas especies químicas (Salas *et al.*, 2016).

## **7.9. IÓN**

Un ión es una partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutral. Los iones que están cargados negativamente, se conocen como aniones y los que se encuentran cargados positivamente, se conocen como cationes (Salas *et al.*, 2016).

## **7.10. RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO**

Las resinas de intercambio iónico han sido utilizadas en distintos campos de la tecnología. Los principios del intercambio iónico son ampliamente usados en métodos de purificación, análisis químico, tratamiento de agua y otras aplicaciones, a escala industrial y de laboratorio, lo que, unido a la gran y variada diversidad de resinas disponibles, permite ofrecer soluciones a muchos problemas tecnocientíficos.

Las resinas de intercambio iónico son insolubles en agua, de naturaleza polimérica, contienen grupos ionizados (aniones o cationes), en forma repetitiva a lo largo de la cadena que las forman. Estos grupos tienen su carga neutralizada por iones de signo contrario, que pueden ser intercambiados de manera estequiometría por otros iones de igual signo al ponerse en contacto con una solución de electrolitos. En la Figura 7.8 se representa esquemáticamente las resinas intercambiadoras de cationes se denominan catiónicas y las de aniones, aniónicas.

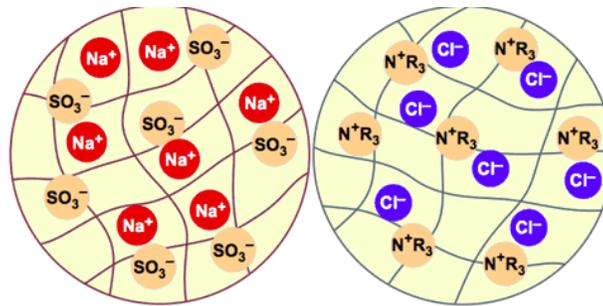


Figura 7. 8. Representación esquemática de las resinas intercambiadoras de cationes y de aniones (Dardel, 2018).

Las resinas normalmente son esferas de 0.5 – 1 mm de diámetro, con una gran cantidad de radicales polares, ácidos o bases, que cuando pasa el agua a través de las resinas, esta toma iones del agua (sodio, cloruro, calcio, magnesio, etc.) y cede una cantidad equivalente en cuanto a carga de protones o de hidroxilos (Alfonso *et al.*, 2000). En la Figura 7.9 representa esquemáticamente iones del agua.

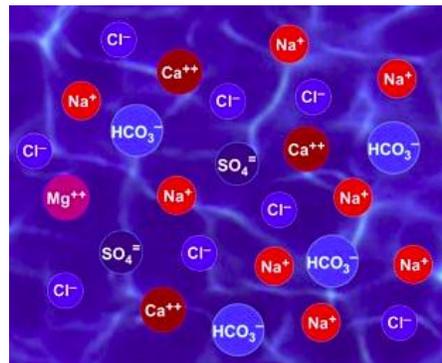


Figura 7. 9. Iones que están presentes en el agua (Dardel, 2018).

### **7.11. TIPOS DE RESINA SEGÚN SU ESTRUCTURA**

Las resinas se pueden clasificar en 3 tipos según a su estructura, las cuales pueden ser: Microporosas o Tipo Gel, Macroporosas o Macroreticulares e Isoporosas

#### **7.11.1. Microporosas o Tipo Gel**

Son resinas convencionales originadas a partir de la polimerización del divinilbenceno y el estireno. Los grupos de intercambio están distribuidos estadísticamente en la partícula, es muy difícil describir la porosidad ya que la distancia entre los enlaces cruzados y las cadenas varía considerablemente (Reyna, 2014).

#### **7.11.2. Macroporosas o Macroreticulares**

Son resinas formadas por el polímero de poliestireno y divinilbenceno, como las de tipo gel, pero su apariencia es diferente a las de gel ya que durante la síntesis de esta se utiliza un cosolvente que actúa interponiéndose entre las cadenas poliméricas creando grandes superficies internas. Este disolvente se elimina una vez formada la estructura rígida del polímero. Las perlas tienen una relación área/volumen mayor que las de tipo gel aumentando así la capacidad de intercambio favoreciendo la difusión de los iones y mejorando por lo tanto la cinética de intercambio (Reyma, 2014).

#### **7.11.3. Isoporosas**

Se caracterizan por tener un tamaño de poro uniforme con lo que aumenta la permeabilidad de los iones en el interior de la red; son resinas de alta capacidad, regeneración eficiente y un costo más bajo que las resinas macroporosas (Reyna, 2014).

## 7.12. SEGÚN EL GRUPO FUNCIONAL DE LA RESINA

Las resinas se pueden dividir en 4 tipos de acuerdo a su grupo funcional que pueden ser: resina catiónica de ácido fuerte, resina catiónica de ácido débil, resina aniónica de base fuerte y resina aniónica de base débil.

### 7.12.1. Resina Catiónica de Ácido Fuerte

Se producen por sulfonación del polímero con ácido sulfúrico, el grupo funcional es el ácido sulfónico ( $-\text{SO}_3\text{H}$ ) que es altamente ionizable, intercambian iones positivos (cationes). Estas resinas operan a cualquier pH requiere de excesivas cantidades de regenerante y es la resina más utilizada.

### 7.12.2. Resina Catiónica de Ácido Débil

El grupo funcional es un ácido carboxílico ( $\text{COOH}$ ) presente en uno de los componentes del copolímero principalmente el ácido acrílico o metacrílico. Son resinas altamente eficientes, poseen menor capacidad de intercambio, no funcionan a pH bajos. Se trata de una resina muy eficiente, requiere menos ácido para su regeneración, aunque trabajan a flujos menores que las de ácido fuerte. Las resinas catiónicas débiles están sujetas a una menor capacidad por un aumento en la velocidad de flujo. Estas resinas fijan los cationes de calcio, magnesio, sodio y potasio de los bicarbonatos y liberan ácido carbónico. Los cationes unidos a los aniones sulfatos, cloruros y nitratos no son intercambiados.

### 7.12.3. Resina Aniónica de Base Fuerte

Se obtienen a partir de la reacción de copolímeros de estireno-divinilbenceno clorometilados con aminas terciarias. El grupo funcional es una sal de amonio cuaternario, ( $\text{R}_4\text{N}^+$ ). Intercambian iones negativos y necesitan una gran cantidad de regenerante, normalmente sosa. Esta destinada a aplicaciones de suavizado de agua, como segunda columna de deionización en los desmineralizadores o para lechos mixtos y elimina los aniones del agua.

#### 7.12.4. Resina Aniónica de Base Débil

Estas resinas combinadas con grupos de amina primaria ( $-\text{NH}_2$ ), secundaria ( $-\text{NHR}$ ) y terciaria ( $-\text{NR}_2$ ). Suelen aplicarse a la adsorción de ácidos fuertes con buena capacidad, pero su cinética es lenta. Se trata de una resina muy eficiente, requiere menos sosa para su regeneración, no se puede utilizar a pH altos, pueden sufrir problemas de oxidación o ensuciamiento, deben ser usadas en aguas con niveles elevados de sulfatos o cloruros, o donde no se requiera la eliminación de la alcalinidad y del silicio, fijan los aniones de los ácidos fuertes como sulfatos, cloruros y nitratos, pero no los aniones débiles del ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), ni del ácido silícico ( $\text{H}_2\text{SiO}_3$ ) (Reyna, 2014).

## 8. MÉTODO

En el diagrama que se muestra en la Figura 8.1, se observan las etapas que componen al método propuesto a nivel laboratorio para la determinación de la eficiencia del proceso para el tratamiento de agua de una industria de pigmentos, mediante dos procesos, filtración e intercambio iónico.

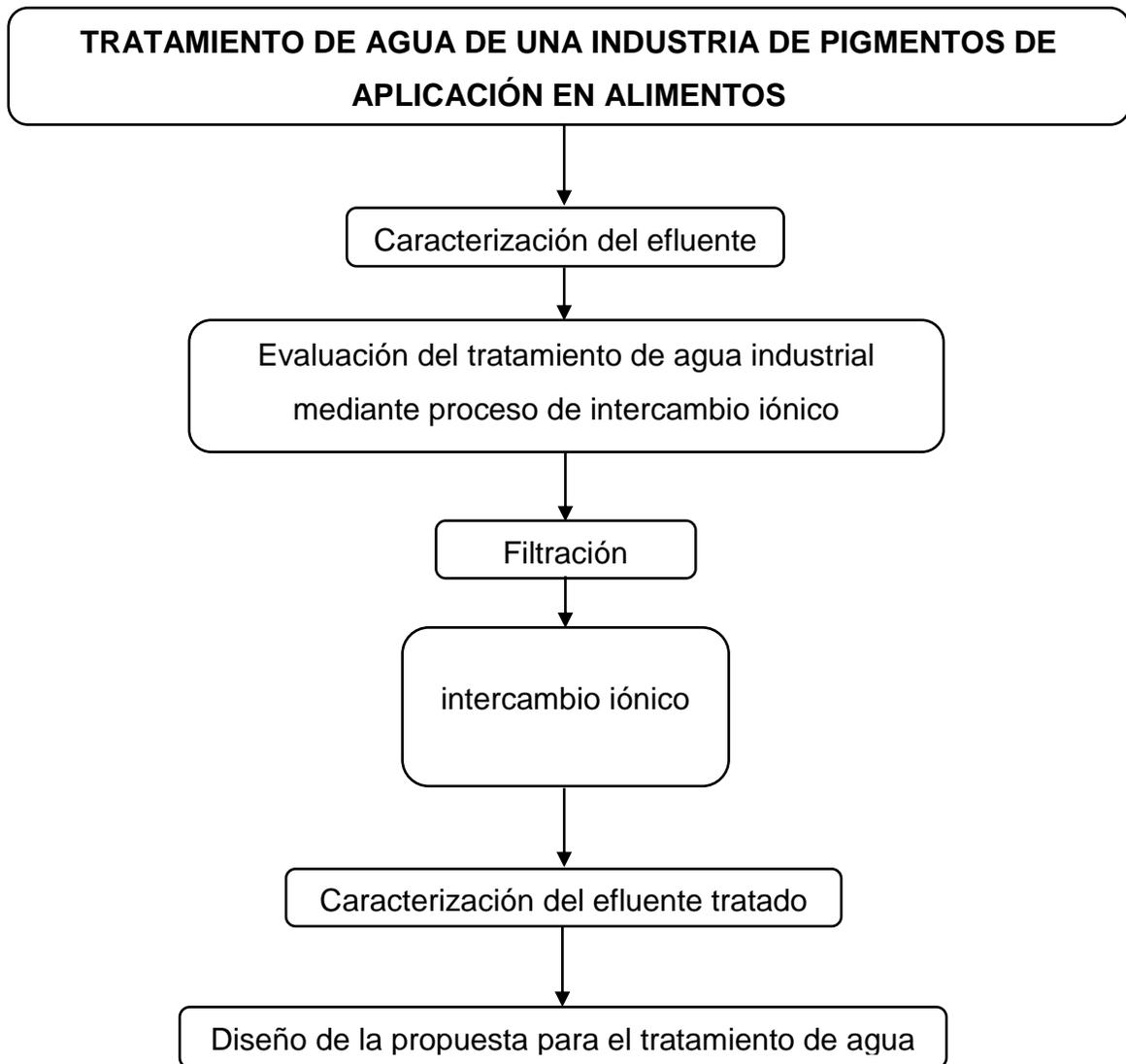


Figura 8. 1. Etapas del método para el tratamiento de agua.

## 8.1. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL EFLUENTE

Las muestras de estudio fueron proporcionadas por la industria de interés, con volúmenes de muestra de 3 L aproximadamente, durante un día de operación a partir de 5 horarios diferentes de muestreo. Los métodos para llevar a cabo la caracterización fisicoquímica de cada una de las muestras se basaron en las normas mexicanas como se ve en la Tabla 8.1 y posteriormente se describen a detalle.

Tabla 8. 1. Parámetros y norma para la caracterización del efluente.

Parámetros	Norma	Equipo
pH	NMX-AA-008-SCFI-2011	Potenciómetro
Conductividad	NMX-AA-093-SCFI-2000	Conductímetro
Cloruros	NMX-AA-073-SCFI-2001	Volumétrico
Color	NO ESPECIFICA	Espectrofotómetro UV-vis
Solidos	NMX-AA-034-SCFI-2015	Horno de secado Balanza analítica

### 8.1.1. DETERMINACIÓN DE pH

A cada una de las muestras de agua a analizar, el pH fue determinado bajo la norma NMX-AA-008-SCFI-2011, empleando un potenciómetro como se ilustra en la Figura 8.2. El equipo fue calibrado antes de cada medición con buffer de 4, 7 y 10 como se ve en la Figura 8.3, a temperatura ambiente (20 °C).

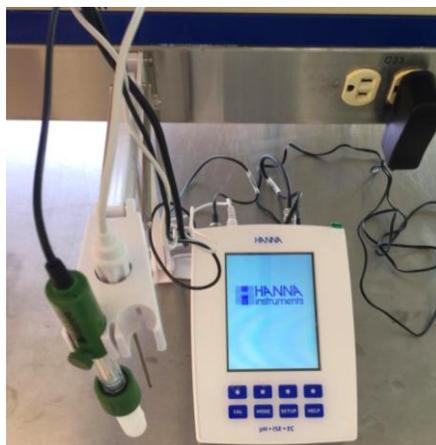


Figura 8. 2. Potenciómetro marca Hanna.



Figura 8. 3. Buffer calibradores de potenciómetro.

### 8.1.2. DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDAD

Para realizar esta prueba se utilizó un conductímetro como se ve en la Figura 8.4. El equipo fue calibrado con el buffer de 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$  como se Figura 8.5, para ser utilizadas con las muestras adecuadamente bajo la norma NMX-AA-093-SCFI-2000.



Figura 8. 4. Conductímetro marca Hanna.



Figura 8. 5. Buffer calibrador de conductímetro.

### 8.1.3. DETERMINACIÓN DE CLORUROS

Para la realización de este análisis se llevo a cabo como lo marca la norma NMX-AA-073-SCFI-2001. Se inició agregando nitrato de plata a 0.01 N en una bureta PYREX de 25 ml, evitando la generación de burbuja en la punta y cubriéndola bien con cartuchos de papel aluminio para evitar el contacto a luz porque la solución es fotosensible, como se puede observar en la Figura 8.6.



Figura 8. 6. Equipo volumétrico para la determinación de cloruros.

Posteriormente, se determinó un volumen de 100 mL de agua desionizada para ser agregada a cada uno de los matraces Erlenmeyer, y con la ayuda de una micropipeta (100 – 1000 microlitros) se tomaron 500 microlitros de muestra para ser incorporada al matraz, enseguida se agregaron 5 gotas de cromato de potasio como indicador, se preparó un blanco con agua desionizada.

Después se tituló cada uno de los matraces asegurando que llegara al vire naranja- rojizo, como se ilustra en la Figura 8.7. Al término se prosiguió a los cálculos para la obtención de la concentración de cloruros presentes de las muestras, empleando la siguiente ecuación:

$$[\text{Cl}^-] \text{ mg /L} = [(A - B) \times N \times 35.45] / \text{mL de muestra}$$

En donde:

A= mL de disolución de nitrato de plata gastados en la valoración de la muestra.

B= mL de disolución de nitrato de plata gastados en la valoración del blanco.

N= normalidad del nitrato de plata.



Figura 8. 7. Determinación de cloruros a partir de la NMX-AA-073-SCFI-2001.

#### 8.1.4. DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES

Para llevar a cabo esta determinación se basó en la norma NMX-AA-034-SCFI-2015, metiendo las cápsulas de porcelana a masa constante, a una temperatura de  $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  por una hora en un horno de secado eléctrico como se ve en la Figura 8.8, al termino las cápsulas se retiraron del horno con la ayuda de unas pinzas para ser colocadas un desecador posteriormente ser pesadas.



Figura 8. 8. Horno de secado eléctrico.

Después de obtener el material en masa constante se prosiguió agregándoles 5 mL de muestra previamente homogenizada con su respectivo duplicado para

llevarlas nuevamente al horno de secado eléctrico a las mismas condiciones descritas anteriormente y ser llevadas a masa constante como se observa en la Figura 8.9; en esta figura se observan los sólidos totales presentes en las muestras de estudio, que por diferencia de masa entre las cápsulas con las muestras evaporadas y la masa original de las cápsulas se conoce el contenido de masa de los sólidos totales presentes, por unidad de volumen, empleando la siguiente ecuación.

$$ST = ((P2 - P1) * 100) / V_0$$

En donde:

ST= Sólidos totales en mg.

P2= Masa de la cápsula con muestra evaporada en mg.

P1= Masa de la cápsula en mg.

V<sub>0</sub>= Volumen de la muestra agregada en la cápsula en mL.



Figura 8. 9. Cápsulas para la determinación de sólidos totales.

#### 8.1.5. DETERMINACIÓN ESPECTOFOTOMÉTRICA UV-vis

Para realizar la determinación de este análisis se utilizó el equipo espectrofotómetro UV-Vis como se presenta en la Figura 8.10, tomando alícuotas

de 4 mL al 50 % de dilución, a la salida de los trenes de tratamientos de agua e incluyendo a la muestra original y tomando como blanco al agua desionizada. Se realizaron barridos en un rango de longitud de onda de 200 nm a 900 nm, para determinar la longitud de onda máxima de las muestras.



Figura 8. 10. Espectrofotómetro UV-vis Pelkin Elmer Lambda 35.

## **8.2. EVALUACION DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUA INDUSTRIAL**

Al término de la caracterización fisicoquímica del efluente, se prosiguió a estudiar a nivel laboratorio cada una de las propuestas de tratamiento de las muestras de agua residual provenientes la industria de pigmentos.

Se utilizaron columnas de vidrio empacadas con lechos de arena y resinas poliméricas, cuyas características se describen a continuación.

La arena fue seleccionada como material para el proceso de pretratamiento de agua por su alta capacidad de remoción de sólidos, cuyas características se presentan en la Tabla 8.2.

Las resinas utilizadas para este estudio son de dos tipos, una de tipo aniónica descrita en la Tabla 8.3 y una de tipo mixta con características descritas en la Tabla 8.4, estas se seleccionaron función de su amplia disponibilidad comercial y por su alta selectividad con los iones cloruros para el tratamiento de aguas.

Tabla 8. 2. Características de la arena.

Arena	
	
Granulometría (mm)	0.45 – 0.55
% humedad	1
pH	7
Composición química	SiO <sub>2</sub> = 99,86 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 0.16 % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 30.09 % TiO <sub>2</sub> = 0.04 % Na <sub>2</sub> O= <0.01%

Tabla 8. 3. Características de la resina aniónica.

Resina aniónica	
	

Aplicación	Decoloración de soluciones
Matriz	Poliestireno macroporoso reticulado con divinilbenceno
Temperatura de operación	35 °C – 100°C
Grupo funcional	Amonio cuaternario Tipo 2
Ion móvil	Cl <sup>-</sup>
Capacidad de intercambio (Eq/L)	1.15
Tamaño de partícula (mm)	0.425 – 1.2

Tabla 8. 4. Características de la resina mixta.

Resina mixta	
	
Matriz	Estireno-DVB
Temperatura de operación	60 °C
Rango de pH de operación	0 - 14
Grupo funcional	Ácido sulfónico / Tipo I (grupos trimetil amonio)
Ion móvil	Cl <sup>-</sup>
Capacidad de intercambio (Eq/L)	1
Tamaño de partícula (mm)	0.710 – 0.720

Posteriormente, se inició con la hidratación de cada uno de los materiales con agua desionizada, dejándolos por 24 horas en recipientes por separados como se puede ver en la Figura 8.11.



Figura 8. 11. Arena y resinas hidratadas con agua desionizada.

#### 8.2.1. PROCESO DE FILTRACIÓN DEL AGUA RESIDUAL UTILIZANDO ARENA

El proceso de filtrado se llevó a cabo en columnas empacadas de arena para la remoción de sólidos suspendidos y sedimentables que puedan estar presentes en el efluente. El empacado de esta columna se realizó tomando un volumen de 10 mL de arena previamente hidratadas y se colocó en una columna con dimensiones de 14 x 550 mm. Se utilizó un tapón de algodón en los extremos del lecho, para asegurar la compactación y así evitar sitios preferentes. Posteriormente, se montó la columna con pinzas de bureta en el soporte universal como se ilustra en la Figura 8.12, para hacer pasar la muestra de estudio.

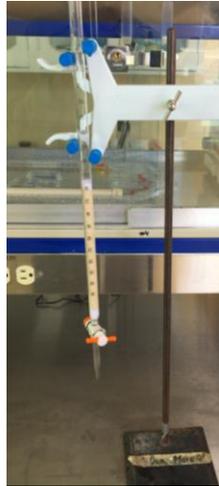


Figura 8. 12. Columna empacada con arena.

En este proceso de pretratamiento, se utilizó un volumen de 400 mL de efluente residual, con una velocidad de flujo de salida 0.20 L/h como se ilustra en la Figura 8.13.



Figura 8. 13. Pretratamiento en columna de arena.

#### 8.2.2. TRATAMIENTO CON PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO.

Las etapas de los procesos de tratamiento de agua se llevaron a cabo en columnas de vidrio con dimensiones de 34 x 450 mm como se ve en la Figura 8.14 con lechos de resinas aniónica y mixta.



Figura 8. 14. Columnas de vidrio de 34 x 450.

El empacado de cada una de las columnas se realizó utilizando lechos con un volumen de 76 mL de cada una de las resinas, colocando un tapón de algodón en los extremos de los lechos para asegurar que se mantenga en una misma posición, logrando la compactación y evitando sitios preferentes como se presenta en la Figura 8.15. El montaje de las columnas se realizó con la ayuda de pinzas de tres dedos en un soporte universal.



COLUMNA A      COLUMNA B

Figura 8. 15. Columna A, lecho de resina aniónica. Columna B, lecho de resina mixta.

### 8.2.3. TRATAMIENTO 1 (RESINA ANIÓNICA).

En esta etapa del proceso de tratamiento, se utilizó un lecho de resina aniónica, por el cual se le hizo pasar un volumen de efluente filtrado con arena de 600 mL como de observa en la Figura 8.16.



Figura 8. 16. Lecho de resina aniónica con muestra 4.

El volumen de la muestra de estudio fue incorporado con la ayuda de una bomba peristáltica como se ve en la Figura 8.17, a una velocidad de flujo de entrada 1.10 L/h y una presión de 3 psi y 0.22 L/h como velocidad de flujo de salida Figuras 8.17 y 8.18.



Figura 8. 17. Bomba peristáltica.



Figura 8. 18. Efluente tratado con resina aniónica.

#### 8.2.4. TRATAMIENTO 2 RESINA MIXTA

En este tren de tratamiento se propone el uso de un lecho de resina de intercambio iónico de tipo mixta, para hacer pasar un volumen de 300 mL de efluente filtrado con arena, que fue suministrado con la ayuda de la bomba peristáltica con una velocidad de flujo de entrada de 1.20 L/h, presión de 3 psi y obteniendo una velocidad de flujo de salida de 0.19 L/h.

#### 8.2.5. TRATAMIENTO 3 RESINA ANIONICA Y MIXTA

En este último tren de tratamiento se propone el empleo de dos columnas de resinas de intercambio iónico en continuo, utilizando un lecho de resina de tipo aniónica seguido de una resina de tipo mixta como se observa en la Figura 8.19. Bajo las mismas condiciones de operación de los trenes de tratamiento descritos anteriormente.

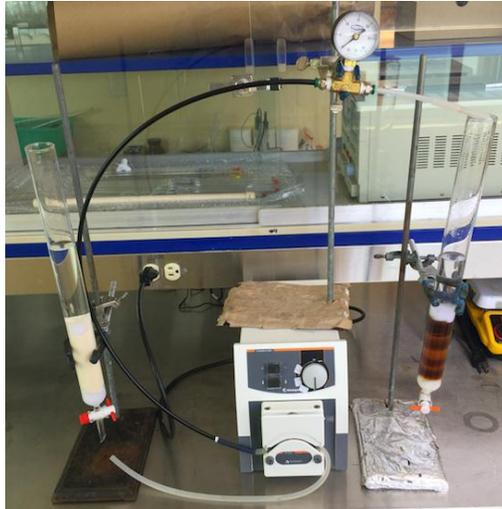


Figura 8. 19. Proceso de tratamiento en continuo en columnas de resina aniónica y resina mixta.

## 9. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de la metodología propuesta para el tratamiento de agua proveniente de una industria de pigmentos de aplicación de alimentos, a fin de obtener la calidad de agua con las características requeridas por la empresa de interés.

### 9.1. CARACTERÍSTICAS DEL EFLUENTE

En la Figura 9.1, se presentan las imágenes de los 5 tipos de muestras provenientes de la descarga de agua residual industrial de la elaboración de pigmentos obtenidas de un día de operación con diferentes horarios de muestreo.

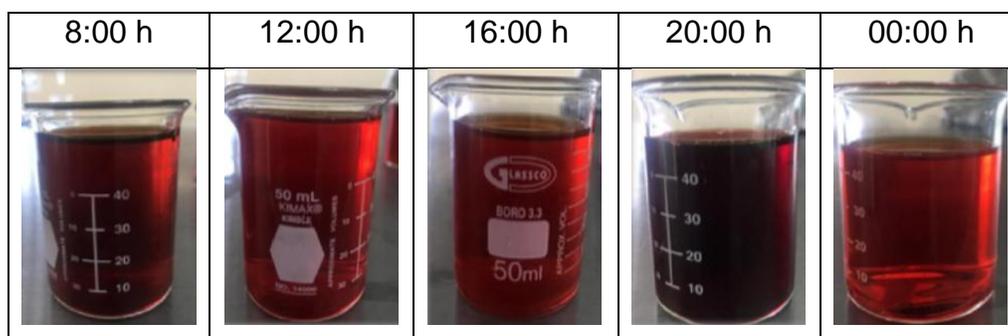


Figura 9. 1. Muestreo de agua residual proveniente de la industria de pigmentos.

Los datos obtenidos durante la caracterización fisicoquímica de las muestras de la industria de pigmentos se muestran en la Tabla 9.1.

Tabla 9. 1. Caracterización fisicoquímica de los efluentes provenientes de la industria de pigmentos.

Parámetros	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
pH	8.63	6.71	6.67	8.97	6.91
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	36 400	18 700	4 760	42 400	3 750
Cloruros (mg/L)	11 450	6 785	1 234	14 342	1 134
Sólidos totales (mg/L)	29 280	13 210	3 510	34 040	2 860

En la Tabla 9.1 se puede observar que la muestra que presenta los valores más elevados en cuanto a los parámetros establecidos por la empresa (pH, conductividad, sólidos totales y cloruros) corresponde a la muestra 4 con un horario de muestreo correspondiente a las 20:00 horas. Considerando los valores que se obtienen a partir de la muestra 4, se prosiguió al estudio de los trenes propuestos para la depuración de agua empleando un proceso de pretratamiento a través de una columna de arena, para posteriormente ser tratadas en columnas de intercambio iónico establecidas en la metodología de la Figura 8.1, para obtener el efluente de acuerdo a los requerimientos de la empresa.

## 9.2. FILTRACION CON ARENA

Los resultados obtenidos en el proceso de filtración se muestran en la Tabla 9.2. El objetivo de esta etapa se enfoca en la reducción de los sólidos presentes en la muestra, en dónde se obtuvo una reducción del 7% para este parámetro, mientras que, en función de la conductividad se obtuvo el 5%, los parámetros de pH, concentración de cloruros y disminución de la coloración de la muestra no se observó cambio alguno. En la Figura 9.2 se muestra el efluente a la salida de esta etapa.

Tabla 9. 2. Resultados de la columna de arena.

Parámetros	Muestra 4	Pretratamiento de arena
pH	8.97	7.858
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	42 400	40 200
Cloruros (mg/L)	14 342	14 301
DQO (mg/L)	2 370	2 258
Sólidos totales (mg/L)	34 040	31 560

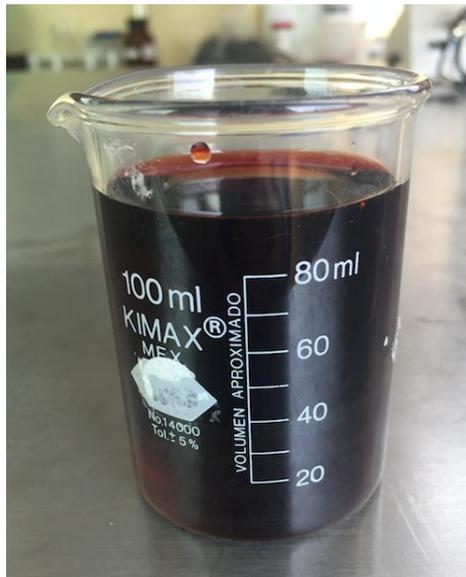


Figura 9. 2. Efluente filtrado con arena.

### 9.3. TRATAMIENTO CON PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de los tres tipos de trenes propuestos para el tratamiento de agua proveniente de la industria de pigmentos para uso alimenticio, definidos como:

Tren de tratamiento 1: Arena + resina aniónica

Tren de tratamiento 2: arena + resina mixta

Tren de tratamiento 3: arena + resina aniónica + resina mixta

### 9.3.1. TRATAMIENTO 1 y 2

En la Tabla 9.3 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica del primer y segundo tratamiento.

Tabla 9. 3. Resultados del tren de tratamiento 1 y 2.

Parámetros	Muestra 4	Arena	Tratamiento 1	Tratamiento 2
			Resina aniónica	Resina mixta
pH	8.97	7.858	8.777	8.484
Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	42 400	40 200	20 590	10 229
Cloruros (mg/L)	14 342	14 301	6 466	96
Sólidos totales (mg/L)	34 040	31 560	13 210	10 017

En la tabla anterior se observa el comportamiento del proceso de intercambio iónico tanto para el lecho de resina aniónica como para resina mixta como alternativa de tratamiento de agua, estos tratamientos son ineficientes en cuanto a los índices máximos de los parámetros requeridos por la empresa. Por ejemplo, en la Figura 9.3 se presentan comparativos de los porcentajes de depuración de agua utilizando los tratamientos 1 y 2 en cuanto a las necesidades de la empresa. Se puede observar que el comportamiento del tratamiento 1 al utilizar un lecho de resina aniónica se encuentra con un rendimiento del 51.41% en términos de la conductividad, 54.91% en cloruros y 61.19% en cuanto a los sólidos totales presentes en la muestra. Por otro lado, al utilizar el lecho de resina mixta se puede observar un incremento en la eficiencia de depuración de agua, obteniendo

valores por arriba del 70% en cuanto a la conductividad y sólidos totales, mientras que, para cloruros la eficiencia corresponde al 99.33%, haciendo de este lecho una alternativa eficiente en los parámetros evaluados.

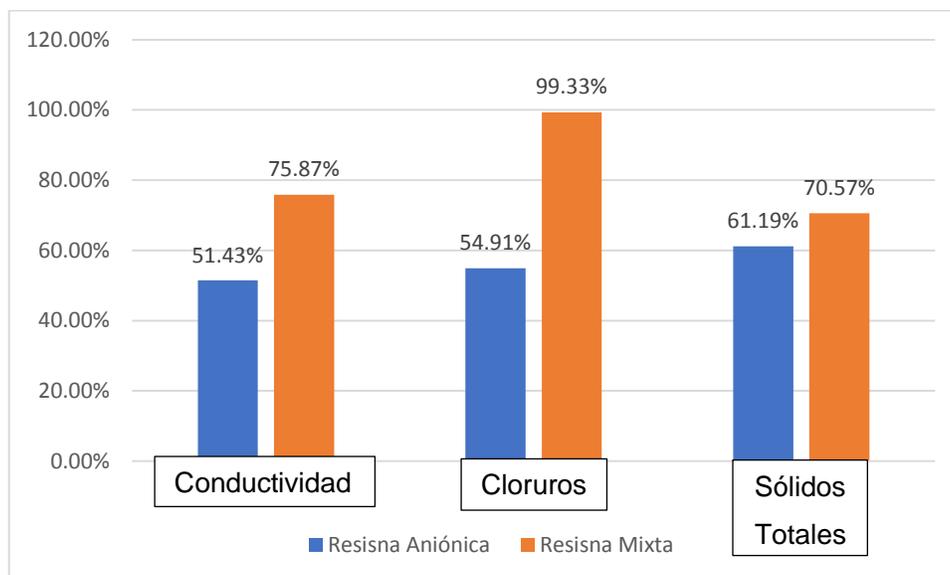


Figura 9. 3. Porcentaje de depuración del efluente con resina aniónica y mixta.

En función de la intensidad de color presente en la muestra de estudio, al comparar la salida del efluente al utilizar el lecho de resina mixta se puede observar la presencia de color en menor intensidad, mientras que la decoloración de la muestra en su totalidad se lleva a cabo al emplear el lecho de resina aniónica, como se observa en la Figura 9.4.



Resina mixta.

Resina anionica

Figura 9. 4. Efluente tratado con lechos de resinas mixta y aniónica.

### 9.3.2. TRATAMIENTO 3

Con base a los resultados obtenidos de los tratamientos 1 y 2, y la eficiencia del tratamiento 1 en la decoloración de la muestra y los altos índices de depuración del tratamiento 2 en función de la conductividad, sólidos totales y concentración de cloruros, se llevó a cabo la realización de un tercer tratamiento a partir de tres etapas: pretratamiento con arena, columna de intercambio iónico con un lecho de resina aniónica y columna de intercambio iónico con un lecho de columna mixta en modo de operación continuo, con la finalidad de obtener un proceso eficiente para el tratamiento de este tipo de efluentes.

En la Tabla 9.4 se muestran los resultados de la caracterización final del tratamiento en continuo de la muestra de estudio.

Tabla 9. 4. Características fisicoquímicas del tratamiento 3.

Parámetros	Muestra 4	arena	Resina aniónica	Resina mixta
pH	8.97	7.858	8.98	8.3
Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	42 400	40 200	19 200	0.01524
Cloruros (mg/L)	14 342	14 301	5 467	1.998
Sólidos totales (mg/L)	34 040	31 560	12 333	217

En la Figura 9.5 se observan los porcentajes de eficiencia del tratamiento propuesto en comparación con los tratamientos 1 y 2, así como en función de los valores iniciales de la muestra para cada uno de los requerimientos de la empresa de interés.

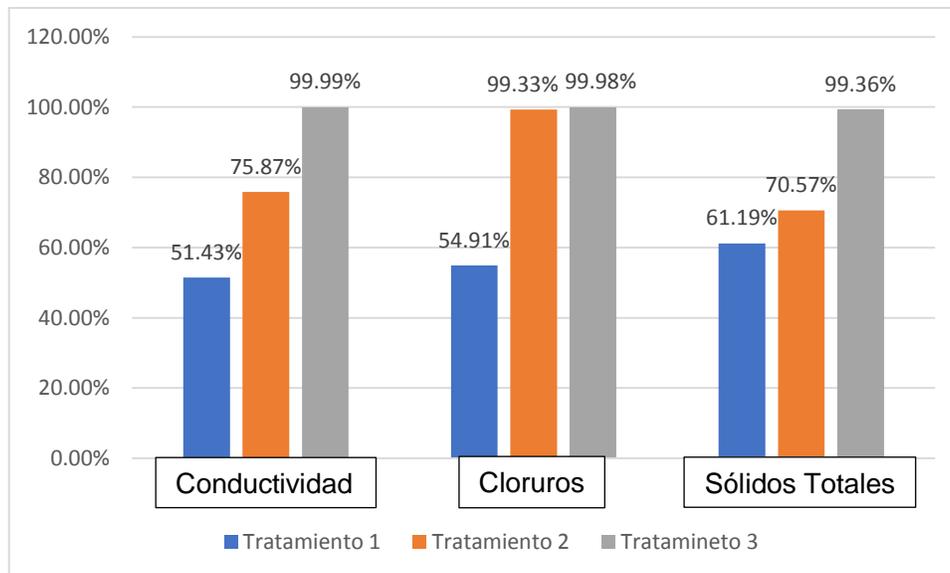


Figura 9. 5. Porcentajes de depuración de agua de los trenes de tratamiento.

Por último, en la gráfica de la Figura 9.6 se pueden observar los resultados obtenidos de los barridos espectrofotométricos en el rango UV-Vis por cada uno de los tratamientos propuestos en cuanto a la eliminación de color de la muestra de interés. La banda de color azul representa al efluente industrial en condiciones iniciales de concentración de color, mientras que las bandas de color naranja, gris y amarillo corresponden a cada uno de los tratamientos propuestos, respectivamente. La absorbancia se determinó a la longitud de onda máxima de absorción a la salida de cada tren de tratamiento la cual corresponde a 500 nm. Este parámetro se encuentra directamente relacionado con la concentración del colorante presente en la muestra, siendo el tratamiento 3 el proceso más eficiente para la eliminación de color, además de los parámetros de conductividad, sólidos totales y concentración de cloruros. Lo que convierte a este proceso en una alternativa viable en la depuración de agua en cuanto a los límites máximos permisibles de los requerimientos por la industria de pigmentos.

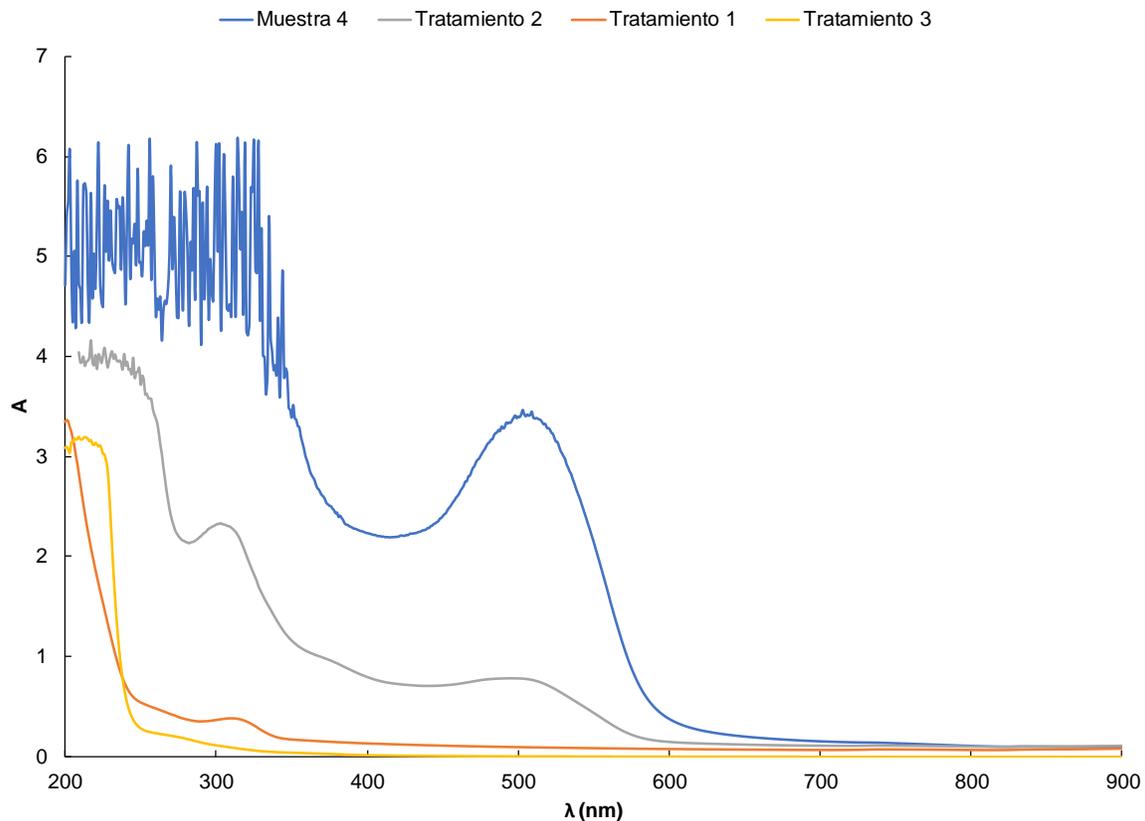


Figura 9. 6. Barridos de los tratamientos en espectrofotómetro UV-vis.

A continuación, en la Tabla 9.5 se observan los límites máximos permisibles de la industria de interés comparándolos con los resultados obtenidos de la caracterización final del tratamiento 3.

Tabla 9. 5. comparación de los parámetros requeridos de la industria con lo obtenido en el tratamiento.

Parámetros	Requerimientos de la empresa	Tratamiento 3
pH	6 – 9	8.3
Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	260	0.01524
Cloruros (mg/L)	250	1.998
Sólidos totales (mg/L)	300	217

De acuerdo con las necesidades requeridas por la industria generadora de pigmentos, este último proceso de tratamiento es factible para la depuración de sus efluentes residuales, al obtener agua en condiciones de buena calidad para la disposición de ésta según lo requiera la empresa. En el diagrama de la Figura 9.7 se observa el diagrama de proceso a nivel laboratorio para la depuración de agua de la industria de pigmentos.

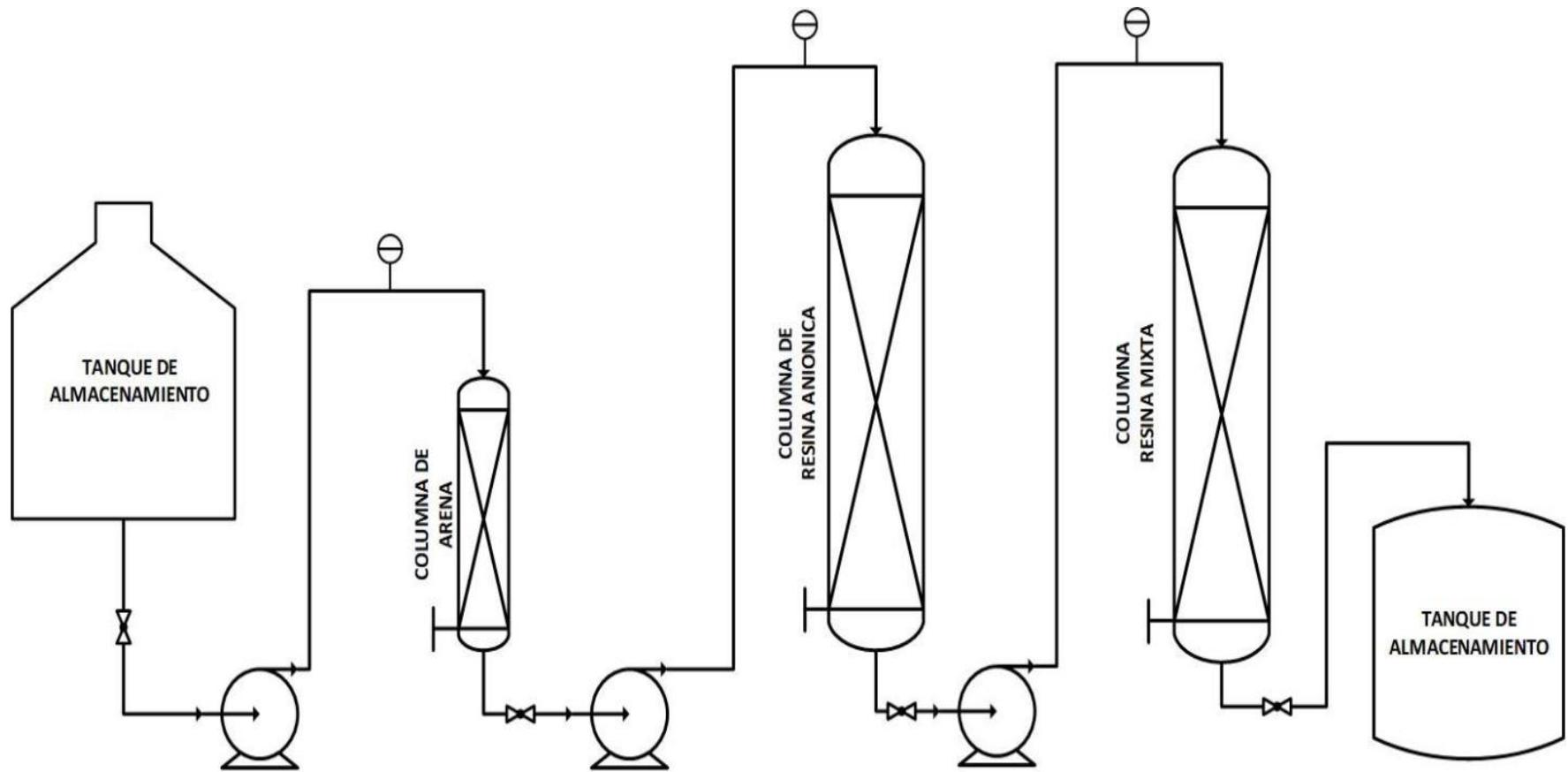


Figura 9. 7. Diagrama de proceso a nivel laboratorio para la depuración de agua para la industria de pigmentos.

## 10. CONCLUSIONES

La caracterización fisicoquímica de cada una de las muestras recolectas en los diferentes horarios de muestreo, permitió la identificación de la muestra que representa a los valores más elevados de conductividad, sólidos totales y concentración de cloruros e intensidad de color, la cual puede ser asociada al horario de mayor producción de los pigmentos durante un día de operación. A partir de la representatividad de la muestrea se plantearon las propuestas de tratamiento de la investigación.

Durante los procesos de tratamiento del efluente industrial empleando las propuestas 1 y 2 se obtuvieron eficiencias del 58% y 87%, respectivamente; durante el monitoreo de la conductividad, sólidos totales y concentración de cloruros. Con respecto a la eliminación de la intensidad de color de la muestra de estudio, el tratamiento 1 (lecho de resina aniónica) obtuvo una eficiencia mayor al 80%, mientras que el tratamiento 2 (lecho de resina mixta) es ineficiente.

En relación con el comportamiento del tratamiento 3, se obtuvo una eficiencia de operación del 97% en los términos de los parámetros requeridos por la empresa (conductividad, sólidos totales y concentración de cloruros); así como, una decoloración total de la muestra. Haciendo de este proceso una alternativa viable en el tratamiento de efluentes industriales proveniente de la elaboración de pigmentos, de esta manera se cumple con el objetivo de la investigación planteada.

## 11. REFERENCIAS

Alfonso H., Pérez G., Díaz I., Alba S., y Leyva R. (2000). Resinas de intercambio iónico para prolongar la liberación de los fármaco. *Rev. cubana* (3), pp. 196-206.

Conderchem Envitech (27 de noviembre de 2013). *Tratamiento para la eliminación del color en aguas residuales de la industria textil*. Recuperado de <https://blog.condorchem.com/tratamiento-para-la-eliminacion-del-color-en-aguas-residuales-de-la-industria-textil/>

Conagua. (2016). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: tratamientos no convencionales*. D.F. México.

Coronas J., y Sebastián V. (2013). *Adsorción, aplicación de procesos industriales de separación*. Recuperado de <http://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/ADSORCION.pdf>

Cuevas D, y Garzón M. (2009). Tratamiento de aguas residuales que contienen colorantes utilizados en la industria textil mediante un proceso combinado de oxidación avanzada y un proceso biológico. Diego F, *XIII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería y VII Simposio Internacional de Producción de Alcoholes y Levaduras*. Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería.

Dardel F. (2018). *El intercambio iónico, principios básicos*. Recuperado de [http://dardel.info/IX/IX\\_Intro\\_ES.html](http://dardel.info/IX/IX_Intro_ES.html)

Díaz C. (2003). La adsorción de micropoluentes orgánicos sobre carbón activo en el tratamiento del agua potable. Ripda-Cyted (Ed), *Agua potable para comunidades rurales, reusó y tratamientos avanzados de aguas residuales domesticas* (pp. 68-85) D.F. México.

Dodera Gabriela. (31 de octubre de 2009). *Tecnología alimentaria*. Recuperado de <http://innovaindustria.blogspot.com/2009/10/pigmentos-naturales-en-alimentacion.html>

Guerrero Isabel, López Eloísa, Armenta Roberto, (2006). Pigmentos. PEARSON Educación (Ed.), *Química de los Alimentos* (pp. 401-444). Naucalpan de Juárez, Edo. de México. México.

Hernández J. (1999). *Estudio de pigmentos por medio de microscopía electrónica*. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza. México.

Kirk-Othmer. (1992). Azo dyes. *Enciclopedia of Chemical Technology*; (capítulo 3,4,8 y 9). John Willey & Son. (pp. 74-82, 753 – 773, 857-863).

Méndez Z. A. (2005). *Proceso de producción y recuperación de pigmentos, por Penicillium purpurogenum GH2, aislado de la región semidesértica de Coahuila, México*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Autónoma de Coahuila. Saltillo, Coahuila, México.

Morales Adriana. (2012). *Pigmentos en los alimentos*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Católica De Cuenca. Cuenca.

Ochando J., y Martínez A. (2015). Estudio del equilibrio de intercambio iónico para la eliminación de sodio presente en agua residual pretratada procedente de la industria oleícola. *Departamento de ingeniería química*. pp. 1 – 4.

Parra Vladimir y Barajas Leticia. (2011). Pigmentos naturales: un futuro prometedor. *Cienciacierta*. (28). Recuperado de <http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/CienciaCierta/CC28/6.html>

Reyna B. (2014). *El intercambio iónico, su descripción y comportamiento químico* (Licenciatura En Ingeniería Química Industrial), Instituto Politécnico Nacional, México.

Roció J, (2013, noviembre, 30), La química del color en los alimentos. *Química Viva*. (12). Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/863/86329278005.pdf>

Rosas J. (2012). *Aplicación de residuos agrícolas para el tratamiento de agua contaminada con colorantes* (Tesis Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Químicas. México.

Salas R., Torres D., Reyes P., y García C. (2016). Efectividad de las resinas de intercambio iónico para la eliminación de hierro en aguas subterráneas. *Revista Estudiantil URU* (4), (pp. 37 – 43).

Solovchenko Alexei, M. Yahia Elhadi, Chen Chunxian. (2019). Pigments. Woodhead Publishing (Ed), *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*. (pp.225-252). Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

Tafoya, A., y García H.F. (1993). *Colorantes en biotecnología alimentaria*. (García, M., Quintero, R. López, A., Eds.), (pp. 479-518). Ed. Limusa, México.

Sanz T. (2008). *Química orgánica industrial*. Recuperado de <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-11.php>

Vilaseca M. (2015). *Eliminación del color de las aguas residuales procedentes de la pintura con colorantes reactivos* (Tesis doctoral). Universitat Politècnica de Catalunya. España.

Zeki B. (2018). Adsorption and ion exchange. Zeki Berk (Ed), *Food Process Engineering and Technology* (pp. 311 – 327) Instituto de Tecnología de Israel, Israel: Academic Press.