

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**



**ELABORACIÓN DE UN MATERIAL BIOSORBENTE A  
PARTIR DE LA CÁSCARA DE PLÁTANO (*Musa sp.*) PARA  
SER UTILIZADO EN LA REMOCIÓN DE CROMO VI  
PROVENIENTE DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA  
INDUSTRIA DE CURTIEMBRE**

PRESENTADO POR:

**LAURA MARILYN HERNÁNDEZ MESTANZA**

**GABRIELA ESMERALDA MAJANO ABREGO**

**ELBA ALEJANDRA MIRA MARTÍNEZ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERA QUÍMICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO 2019

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR:

**MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

SECRETARIO GENERAL:

**MSc. CRISTÓBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO:

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

SECRETARIO:

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**

DIRECTORA:

**DRA. TANIA TORRES RIVERA**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERA QUÍMICO**

Título:

**ELABORACIÓN DE UN MATERIAL BIOSORBENTE A  
PARTIR DE LA CÁSCARA DE PLÁTANO (*Musa sp.*) PARA  
SER UTILIZADO EN LA REMOCIÓN DE CROMO VI  
PROVENIENTE DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA  
INDUSTRIA DE CURTIEMBRE**

Presentado por:

**LAURA MARILYN HERNÁNDEZ MESTANZA**

**GABRIELA ESMERALDA MAJANO ABREGO**

**ELBA ALEJANDRA MIRA MARTÍNEZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesora:

**INGA. EUGENIA SALVADORA GAMERO DE AYALA**

**SAN SALVADOR, MARZO 2019**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesora:

**INGA. EUGENIA SALVADORA GAMERO DE AYALA**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por permitirnos culminar esta etapa de nuestras vidas y la carrera universitaria, finalizando con este proyecto.

A nuestras familias, amigos y compañeros por brindarnos su apoyo y comprensión incondicional a lo largo de todos estos años y sobre todo en esta etapa.

A la Universidad de El Salvador, por ser nuestra Alma Mater, de la que nos sentimos orgullosas por habernos formado profesionalmente. Asimismo, a la Facultad de Ingeniería y Arquitectura por brindarnos los recursos necesarios para nuestra instrucción académica y profesional.

A nuestra asesora, Inga. Eugenia Salvadora Gamero de Ayala por su apoyo, asesoría y colaboración durante la carrera y en este trabajo de investigación.

A la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, por facilitarnos el uso de las instalaciones de la Planta Piloto.

A la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática por abrirnos sus puertas y brindarnos el apoyo técnico, científico y de laboratorio por medio de la valiosa colaboración del Lic. Alfredo Díaz y del estudiante de la Licenciatura en Ciencias Químicas Gerardo Ruíz, que tuvieron siempre la disposición de colaborar en el avance y culminación de este trabajo de graduación.

A todas las personas, que estuvieron involucradas directa e indirectamente en el desarrollo del trabajo y que nos brindaron sus experiencias técnicas, laborales y personales, que sumarían significativamente al enriquecimiento de cada una, especialmente al Señor Gilberto Linares, Don José Manuel Majano, Don Carlos Santos y Don Antonio.

## **DEDICATORIA**

A Dios, por haberme permitido llegar a esta etapa de mi vida y ayudarme a superar todas las dificultades que se me han presentado hasta culminar con éxito mi carrera universitaria.

A mis padres, María Sabina Mestanza de Hernández y Santiago Hernández por haberme dado la vida y apoyarme en todo momento por medio del amor y comprensión que me han brindado a lo largo de todos mis años de estudio, teniendo en cuenta que cada esfuerzo vale la pena para seguir siempre adelante. También a mis hermanas Karina y Brenda Hernández por compartir parte de su tiempo conmigo, a pesar de tener temperamentos diferentes y aconsejarme cuando ha sido necesario. Igualmente, a mi sobrino Jeffrey, con el que he compartido muchos días a su lado y al que quiero incondicionalmente.

A la Universidad de El Salvador, por la formación profesional dentro de ella durante estos últimos años y el apoyo con recursos de diferente tipo mediante sus Unidades, Facultades, Escuelas y Administraciones Académicas.

A la familia Letona Carrillo, que me abrió las puertas de su hogar desde inicios de la carrera y que siempre me ha brindado una increíble hospitalidad y cariño.

A la familia Mira Martínez, que me ha recibido muy atentamente desde que me conoce y de manera muy amable me ha acogido en su hogar estos últimos meses para el avance de este proyecto.

A mis compañeros de estudio y amigos: Yamileth Medina, Elba Mira, Silvia Letona, Yamileth García, Emily Beltranena, Gilma Ramírez, Isella Ventura, Natalia Pérez, Mario Khalil, Mario Guillén y Walter Vaquero con los que pasé muchísimas horas de convivencia tanto dentro como fuera de la Universidad y que sin duda la experiencia de la educación superior será inolvidable y han marcado considerablemente mi vida.

A mi asesora, Inga. Eugenia Gamero por su aporte, conocimiento y paciencia en todo este trayecto y por sus enseñanzas en las asignaturas impartidas. Asimismo, a todos los docentes y catedráticos de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos que forman parte de ella y con su conocimiento contribuyen a la formación académica y profesional de cada estudiante.

A mis compañeras de trabajo de graduación, Elba Mira y Gabriela Majano por formar parte de este proceso y contribuir con su esfuerzo para la culminación de esta etapa.

**LAURA MARILYN HERNÁNDEZ MESTANZA**

## DEDICATORIA

*Porque no hay nada imposible para Dios (Lucas 1, 37).*

Agradezco a Dios, por su infinito amor y misericordia, al proveerme de fortaleza voluntad y convicción para culminar esta meta de mi vida. A María Santísima, que como dijo San Juan Bosco: “Ella lo ha hecho todo”, gracias Virgencita María Auxiliadora por la intercesión que día con día me cubre y guía en el caminar de la vida.

A mis padres, Irma y José Manuel, por todo el apoyo y sacrificio en todo momento ya que no me dejaron sola, gracias por sus consejos en especial “Hace lo que podás, Dios hará lo demás”, siempre lo tendré presente. Agradezco a mi hermana Patricia Ulloa por su amor y apoyo incondicional, que siempre me han motivado a hacer el bien. Gracias familia por ser un ejemplo de vida para mí. Les amo.

A mi novio Omar Leiva, por su confianza, me animó diciéndome “Paciencia, Dios provee”. Gracias por la comprensión y sacrificios que has hecho durante este tiempo pues has sido parte del mejor equipo que Dios me ha regalado (mi familia y tú).

A mis amigas, “las bichas” y mis hermanos de comunidad, que me han apoyado con sus oraciones, las cuales han fortalecido mi paciencia, ánimo y constancia para alcanzar la meta; con ustedes, el yugo es más ligero porque son un soporte incondicional.

A todos los amigos que conocí en el camino hacia esta meta, la Universidad, no hubiese sido lo mismo sin ustedes, ya que, con solidaridad y amor fraterno, hicieron que las alegrías, enojos, frustraciones e incluso, lágrimas unieran más nuestra amistad. Gracias, Karly, Adri, Andrea, Rhina, Kayla y Christian por hacer de mí, una mejor persona.

A mis compañeras de Trabajo de Investigación, Laura y Elba, gracias por aceptarme tal cual soy y porque al unificar esfuerzos, alcanzamos nuestra meta, gracias por su comprensión y apoyo.

A nuestra asesora, Inga. Eugenia Gamero, porque además de brindarnos sus conocimientos con mucha paciencia, sabiduría y entendimiento, ha sido la guía y la amiga que en todo momento hemos necesitado.

A todos docentes de la FIA como de otras Facultades por animarme a continuar y no darme por vencida. Gracias por sus conocimientos y consejos, los cuales son consejos de oro para la vida. Gracias por ser ustedes ese “Testimonio que arrastra”.

**GABRIELA ESMERALDA MAJANO ABREGO**

## **DEDICATORIA**

Primeramente, agradezco a Dios Todopoderoso por brindarme el conocimiento necesario que adquirí a lo largo de la carrera, ayudarme a superar todas las dificultades y permitirme conocer personas maravillosas en la universidad.

A mis padres Alfredo Mira y Lorena Martínez por todo su amor, consejos, comprensión, paciencia, enseñanza y apoyo incondicional gracias por siempre creer en mí en las decisiones que he tomado y ayudarme a seguir adelante.

A mi hermano Gerardo Mira por estar a mi lado, animarme y compartir los buenos y malos momentos.

A mis amigos y compañeros de la carrera: Marcela Letona, Laura Hernández, Yamileth García, Gilma Ramírez, Mario Khalil, Mario Guillén y Walter Vaquero gracias por todos los momentos de alegrías, bromas, apoyo y noches de estudio, definitivamente hicieron que todo este trayecto en la carrera fuera agradable e inolvidable.

A la familia Letona Carrillo que desde inicios de la carrera siempre me recibieron en su hogar, gracias por su hospitalidad y cariño.

A nuestra asesora Ing. Eugenia Gamero por su orientación, apoyo, paciencia y disposición que nos permitió desarrollar nuestro trabajo de graduación.

A mis compañeras de trabajo de graduación Laura Hernández y Gabriela Majano por su entrega y dedicación al concluir este proceso.

**ELBA ALEJANDRA MIRA MARTÍNEZ**



## RESUMEN

El plátano (*Musa sp.*) es un material orgánico que tiene múltiples usos a nivel culinario principalmente y su cáscara es un residuo, que en la mayoría de los casos es un desperdicio. Sin embargo, este residuo orgánico puede ser aprovechado en la elaboración de materiales biosorbentes naturales para ser aplicados en el tratamiento de aguas residuales, generando una cantidad de lodos con menor carga contaminante que la que se generaría en sistemas de tratamiento establecidos donde se hace uso de químicos nocivos para el medio ambiente.

Es de vital relevancia tomar en cuenta la caracterización botánica, morfológica, química y física de las cáscaras de plátano a utilizar en un proceso químico industrial con el objetivo de obtener un producto de calidad y que sea eficiente en el proceso pretendido.

Actualmente en El Salvador, no se están ampliando tecnologías innovadoras de remoción de contaminantes en el agua donde se aprovechen una gran cantidad de residuos agrícolas para obtener productos a partir de esas fuentes naturales. Uno de los residuos agrícolas no aprovechados en el país es el plátano, siendo este un fruto perenne a nivel nacional. Sin embargo, del 30 al 40% del fruto representa la cáscara, y esto es un desperdicio; cuestión que no puede ser desaprovechada debido a que esta tiene estructuras funcionales, lo cual la vuelve aplicable en el tratamiento de aguas contaminadas por metales, como son las aguas residuales de curtiembres, textiles y electrodeposición, que contienen iones positivos y estos son atraídos hacia la superficie del material por intercambio iónico.

La cáscara de plátano tiene un uso importante en esta investigación debido a que es la base para elaborar el material biosorbente con la finalidad de utilizarlo en el tratamiento de aguas residuales de la industria de curtiembre mediante el proceso de biosorción, que es el mecanismo de remoción del contaminante principal. De manera que pueden retenerse cantidades considerables de Cromo VI y descontaminar los efluentes líquidos.

La elaboración del material biosorbente óptimo se llevó a cabo a partir de un proceso de lavado, secado, trituración y tamizado, obteniendo de esta manera el material en polvo que se colocó en el sistema de contacto sólido - líquido.

La variable respuesta a evaluar fue la concentración final de Cromo VI de las muestras de agua residual industrial. A nivel de laboratorio se obtuvo un 98 % de remoción máxima del analito de interés según la cantidad de material agregada y el tiempo de contacto. Además, a partir del análisis de resultados se determinó que el modelo isotérmico aplicable al material biosorbente fue el modelo de Freundlich y el modelo cinético fue el de Pseudo Segundo Orden.

Asimismo, se planteó una propuesta de gestión ambiental del material biosorbente a escala industrial donde se exponen las alternativas de disposición final según la disponibilidad de los recursos, equipos y personal; considerando los acuerdos que se pudieran establecer con las empresas prestadoras de los servicios requeridos.

<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b>	<b>Pág</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS. ....</b>	<b>4</b>
1.1. Definición de adsorción.....	4
1.1.1. Operaciones de adsorción.....	5
1.1.2. Materiales adsorbentes. ....	11
1.1.3. Cáscara de plátano como adsorbente de origen agrícola. ....	13
1.2. Generalidades del plátano ( <i>Musa sp.</i> ) .....	13
1.2.1. Origen del plátano. ....	14
1.2.2. Morfología del plátano. ....	14
1.2.3. Variedades de plátano.....	16
1.2.4. Composición química del fruto. ....	18
1.2.5. Composición química de la cáscara de plátano. ....	19
1.2.6. Antecedentes del cultivo de plátano en El Salvador. ....	22
1.2.7. Situación actual de la producción, comercio y aprovechamiento del cultivo del plátano en El Salvador.....	24
1.3. Definición de biosorción.....	25
1.3.1. Mecanismos de biosorción. ....	25
1.3.2. Parámetros que influyen en el proceso de biosorción. ....	29
1.3.3. Ventajas y desventajas de la biosorción.....	32
1.3.4. Modelos teóricos de la adsorción. ....	33
1.4. Características y comportamiento de metales pesados.....	36
1.4.1. Fuentes antrópicas de metales pesados en el medio ambiente. ....	38
1.4.2. Generalidades del Cromo.....	39
1.4.3. Fuente de exposición al Cromo. ....	41
1.4.4. Efectos del Cromo sobre el medio ambiente. ....	43
1.4.5. Efectos del Cromo sobre la salud humana. ....	44
1.4.6. Medidas de seguridad ante la exposición del Cromo. ....	45
1.4.7. Usos del Cromo a nivel Industrial. ....	46
1.5. Industria de Curtiembre. ....	48
1.5.1. Antecedentes de la industria curtiembre en El Salvador. ....	50
1.5.2. Producción y comercialización del cuero en El Salvador.....	51
1.5.3. Descripción de proceso productivo de la industria curtiembre.....	52

<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b>	<b>Pág</b>
1.6. Alternativas de gestión de sólidos utilizados.....	55
1.6.1. Ventajas y desventajas de las alternativas de gestión planteadas. ....	61
<b>CAPÍTULO 2. AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA DE CURTIEMBRE. ....</b>	<b>65</b>
2.1. Características fisicoquímicas del agua residual. ....	65
2.2. Impacto ambiental por efluentes industriales. ....	81
2.3. Métodos de tratamiento para la eliminación de metales en efluentes industriales.....	87
2.3.1. Métodos convencionales para el tratamiento de aguas residuales. ....	88
2.3.2. Métodos no convencionales para el tratamiento de aguas residuales.....	93
2.4. Aplicación del método de biosorción como tratamiento para iones metálicos.....	94
2.5. Caracterización de aguas residuales de la industria curtiembre. ....	98
2.5.1. Toma de muestras del agua residual.....	100
2.5.2. Determinación de parámetros de descarga de todo tipo de industria. ....	110
2.5.3. Métodos de análisis para determinación de parámetros de agua residual. ....	112
2.6. Gestión ambiental del agua residual de la industria de curtiembre. ....	116
<b>CAPÍTULO 3. ETAPA EXPERIMENTAL. ....</b>	<b>120</b>
3.1. Descripción del procedimiento para la elaboración del material biosorbente a partir de cáscara de plátano ( <i>Musa sp.</i> ).....	120
3.2. Descripción del análisis químico para la determinación de Cromo VI en el agua residual de la industria de curtiembre.....	123
3.2.1. Método seleccionado para la determinación de Cromo VI en agua residual. ....	123
3.2.2. Selección del material biosorbente óptimo a utilizar en los ensayos de filtración. ....	127
3.3. Estudio de la capacidad de adsorción de Cromo VI. ....	133
3.3.1. Influencia de la cantidad de material biosorbente en el proceso de biosorción. ....	134
3.3.2. Influencia del tiempo de contacto en el proceso de biosorción.....	137

<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b>	<b>Pág</b>
<b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>139</b>
4.1. Modelos isotérmicos y cinéticos de adsorción. ....	139
4.1.1. Modelos isotérmicos aplicados al material biosorbente.....	139
4.1.2. Modelos cinéticos aplicados al material biosorbente. ....	142
4.2. Análisis de la aplicación de los métodos de calibración.....	145
4.2.1. Coeficiente de correlación momento – producto de los modelos isotérmicos y cinéticos.....	146
4.2.2. Rectas de regresión no ponderadas de los modelos isotérmicos y cinéticos.....	150
4.2.3. Rectas de regresión ponderadas de los modelos cinéticos.....	155
<b>CAPÍTULO 5. DISPOSICIÓN FINAL DEL RESIDUO OBTENIDO DEL PROCESO DE BIOSORCIÓN. ....</b>	<b>160</b>
5.1. Evaluación del proceso discontinuo de biosorción para la aplicación del material biosorbente.....	160
5.1.1. Balance de masa de la elaboración del material biosorbente a partir de la cáscara de plátano ( <i>Musa sp.</i> ).....	162
5.1.2. Proceso discontinuo del material biosorbente y el efluente industrial.....	163
5.2. Propuesta de gestión ambiental del material biosorbente utilizado. ....	164
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>169</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>171</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>172</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>181</b>
<b>ANEXO B .....</b>	<b>184</b>
<b>ANEXO C .....</b>	<b>193</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág</b>
Tabla 1.1	Clasificación de los procesos de adsorción.....	5
Tabla 1.2	Composición química de la cáscara de plátano. ....	20
Tabla 1.3	Clasificación del tamaño de poro y microporo.....	30
Tabla 1.4	Principales ventajas y desventajas del uso de biomasa viva y muerta en el proceso de adsorción. ....	32
Tabla 1.5	Principales fuentes antrópicas de metales pesados en el medio ambiente. ....	39
Tabla 1.6	Propiedades generales del Cromo. ....	39
Tabla 1.7	Utilidad de los diferentes estados de oxidación del Cromo. ....	40
Tabla 1.8	Clasificación de actividades según la intensidad de exposición al Cromo. ....	47
Tabla 1.9	Composición química de la piel res.....	49
Tabla 1.10	Límites máximos permitidos de metales pesados en lodos.....	57
Tabla 1.11	Ventajas y desventajas de las diferentes alternativas de gestión de desechos sólidos.....	62
Tabla 2.1	Características Físicoquímicas de los efluentes del Sector Curtiembre en la Operación de Curtido.....	77
Tabla 2.2	Resumen de parámetros fisicoquímicos obtenidos en el sector de curtiembre de pieles de El Salvador.....	79
Tabla 2.3	Efluentes líquidos del proceso de curtiembre de pieles.....	79
Tabla 2.4	Contaminantes químicos y biológicos. ....	81
Tabla 2.5	Identificación de impactos ambientales.....	85
Tabla 2.6	Recomendaciones para el muestreo y preservación de muestras de acuerdo con los parámetros a determinar.....	107

<b>Tabla</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág</b>
Tabla 2.7	Comparación de valores máximos permisibles de parámetros para verter aguas residuales según Normas Salvadoreñas.....	111
Tabla 2.8	Métodos de análisis para la determinación de los parámetros contemplados en la norma. ....	113
Tabla 2.9	Rango de cantidades de materias primas utilizadas en cada etapa del procesamiento de pieles.....	114
Tabla 3.1	Datos para elaborar la curva de calibración a partir de la solución estándar de $K_2Cr_2O_7$ . ....	125
Tabla 3.2	Concentración inicial de la matriz de agua residual.....	127
Tabla 3.3	Cantidad retenida en tamices para cada tipo de material biosorbente. ....	128
Tabla 3.4	Resultados de la concentración final y porcentaje de remoción de Cromo VI para cada muestra. ....	131
Tabla 3.5	Prueba de las cantidades iniciales del material biosorbente. ....	134
Tabla 3.6	Disminución del volumen y de las cantidades utilizadas de material biosorbente. ....	135
Tabla 3.7	Masas de material biosorbente para saturación del volumen de agua residual.....	136
Tabla 3.8	Variación de las cantidades de material biosorbente. ....	137
Tabla 3.9	Variación del tiempo de contacto del sistema adsorbato-adsorbente. ....	138
Tabla 4.1	Resultados obtenidos a partir de la linealización de las isothermas de Langmuir y Freundlich.....	140
Tabla 4.2	Niveles de correlación para el estudio del modelo. ....	142
Tabla 4.3	Constantes de los modelos isotérmicos de Langmuir y Freundlich. ....	142
Tabla 4.4	Resultados obtenidos a partir de la linealización de los modelos de Pseudo – Primer Orden y Pseudo – Segundo Orden.....	143

<b>Tabla</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág</b>
Tabla 4.5	Constantes de los modelos cinéticos de Pseudo – Primer Orden y Pseudo – Segundo Orden.....	145
Tabla 4.6	Coefficiente de correlación momento – producto de los modelos isotérmicos. ....	147
Tabla 4.7	Coefficiente de correlación momento – producto de los modelos cinéticos. ....	148
Tabla 4.8	Distribución t de Student de los modelos isotérmicos y cinéticos.....	149
Tabla 4.9	Recta de regresión de “y” sobre “x” de los modelos isotérmicos y cinéticos. ....	151
Tabla 4.10	Errores en la pendiente y ordenada en el origen de los modelos isotérmicos. ....	152
Tabla 4.11	Errores en la pendiente y ordenada en el origen de los modelos cinéticos. ....	153
Tabla 4.12	Valores de la pendiente y ordenada en el origen ponderados de los modelos cinéticos. ....	157
Tabla 4.13	Rectas de regresión ponderadas y no ponderadas de los modelos cinéticos.....	159



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág</b>
Figura 1.1	Filtración por contacto. Arreglo esquemático para el tratamiento por lotes en una sola etapa de líquidos. ....	6
Figura 1.2	Adsorción en una sola etapa. ....	7
Figura 1.3	Equipo de Contacto de Higgins, esquemático (los sólidos se muestran sombreados). ....	9
Figura 1.4	La onda de adsorción. ....	11
Figura 1.5	Estructura química de la Galocatequina, principal compuesto antioxidante de la cáscara de plátano. ....	21
Figura 1.6	Esquema sobre la clasificación de los metales pesados según su funcionalidad en la materia viva. ....	37
Figura 1.7	Esquema de zonas de una piel fresca. ....	49
Figura 1.8	Tasa de Crecimiento de la Producción de Cuero y sus Productos. ....	52
Figura 1.9	Proceso productivo de la Industria de Curtiembre. ....	53
Figura 1.10	Procesos típicos de curtido vegetal y al cromo del cuero. ....	54
Figura 2.1	Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales. ....	74
Figura 2.2	Características químicas de las aguas residuales. ....	75
Figura 2.3	Biosorción de soluciones acuosas por biomasas. ....	95
Figura 2.4	Ciclo sorción – desorción. ....	97
Figura 2.5	Proceso discontinuo para el estudio de biosorción a) inicial, b) final. ....	98
Figura 2.6	Etapas para el desarrollo de una caracterización de aguas residuales. ....	100
Figura 2.7	Efectos de los errores cometidos en el muestreo. ....	101

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág</b>
Figura 2.8	Ejemplo de horario para sacar muestras.....	103
Figura 2.9	Etapas de la implementación de la ISO 14001. ....	117
Figura 3.1	Recolección de las cáscaras de plátano. ....	120
Figura 3.2	Preparación de las cáscaras de plátano. ....	120
Figura 3.3	Tratamiento de las cáscaras de plátano.....	121
Figura 3.4	Secado de las cáscaras de plátano.....	122
Figura 3.5	Trituración de las cáscaras de plátano.....	122
Figura 3.6	Tamizado del material biosorbente y almacenamiento según el número de malla. ....	123
Figura 3.7	Muestras preparadas para análisis en equipo colorimétrico. ....	125
Figura 3.8	Espectrofotómetro UV Visible Shimadzu UV-1700.....	125
Figura 3.9	Curva de calibración de la solución estándar de trabajo para el análisis de Cromo VI. ....	126
Figura 3.10	Agitación del sistema agua residual-material biosorbente. ....	129
Figura 3.11	Sistema de filtración y dilución de las muestras. ....	130
Figura 3.12	Envasado de las muestras. ....	130
Figura 3.13	Porcentaje de remoción de Cromo VI para los materiales biosorbentes STQCP y CTQSP. ....	133
Figura 4.1	Isoterma de Langmuir. ....	141
Figura 4.2	Isoterma de Freundlich.....	141
Figura 4.3	Modelo de Pseudo – Primer Orden.....	144
Figura 4.4	Modelo de Pseudo – Segundo Orden. ....	144
Figura 4.5	Gráfico de residuales de “y” para los cuatro modelos estudiados.....	155

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág</b>
Figura 5.1	Diagrama de bloques del proceso de producción de material biosorbente a partir de la cáscara de plátano ( <i>Musa sp.</i> ) y la aplicación del mismo para el tratamiento del efluente industrial. ....	161
Figura 5.2	Esquema de gestión final del material biosorbente utilizado en el tratamiento de aguas residuales de la industria de curtiembre. ....	166

## OBJETIVOS

### Objetivo General:

Elaborar un material biosorbente a partir de la cáscara de plátano (*Musa sp.*) para ser utilizado en la remoción de Cromo VI proveniente de las aguas residuales de la industria de curtiembre.

### Objetivos Específicos:

1. Realizar la recolección de las cáscaras de plátano en las cafeterías de la Ciudad Universitaria.
2. Realizar un tratamiento previo a las cáscaras de plátano recolectadas.
3. Determinar la temperatura óptima de secado de las cáscaras de plátano.
4. Aplicar un método de reducción de tamaño a las cáscaras de plátano previamente secadas.
5. Realizar pruebas de biosorción del metal Cromo VI en las muestras de agua residual de industria de curtiembre utilizando el biosorbente obtenido.
6. Establecer el modelo cinético e isotérmico de adsorción del material biosorbente.
7. Evaluar la efectividad del biosorbente en la retención de Cromo VI en aguas residuales de la industria de curtiembre.

## INTRODUCCIÓN

El Salvador presenta un grave problema en cuanto a la calidad de sus recursos hídricos y en los últimos años esta situación se ha visto agravada. Entre las principales fuentes de contaminación del agua y que la vuelven inútil para procesos establecidos, se pueden mencionar: naturales, artificiales, domésticos, industriales, agroindustriales y agrícolas. Por tanto, se hace necesario encontrar medidas que contribuyan a la mejora del tratamiento de aguas residuales industriales que son vertidas a los cuerpos receptores.

Una de las industrias de mayor reconocimiento a nivel nacional es la curtiembre, la cual se encarga del proceso de preparación de pieles hasta llegar al acabado para obtener cueros que sean destinados para diversos usos. Dentro de su proceso de producción se llevan a cabo procedimientos de limpieza y preparación de la materia prima, lavados, acabados, limpieza de equipos, entre otros; los que implicarán un fuerte gasto de agua para obtener un producto útil y de alta calidad que cumpla con los estándares establecidos. Para el proceso de curtido se agrega una considerable cantidad de reactivos a las pieles, los cuales por lo general contienen metales pesados que quedan remanentes en el agua utilizada.

Los tratamientos tradicionales aplicados en aguas contaminadas por metales pesados pueden incluir procesos de oxidación – reducción, precipitación química, filtración; utilizando medios porosos (arena, carbón activo, arena sílice), coagulación, floculación e intercambio iónico. Sin embargo, estos tratamientos resultan ser de costos elevados y en algunos casos el efluente tratado presenta concentraciones bajas de metales, por lo que resulta necesario buscar otras alternativas de tratamiento que ayuden a resolver esta problemática en los vertidos de este tipo de industria. Por esta razón, las medidas propuestas deben ser tales que puedan implementarse de manera oportuna y cumplan ciertos requisitos tales como: alta eficiencia en la remoción de contaminantes, bajo costo y sostenibilidad.

Según investigaciones realizadas recientemente tanto dentro como fuera del país sobre técnicas de remoción de contaminantes, pueden utilizarse residuos agrícolas para retener algunas sustancias tóxicas presentes en las aguas residuales o vertidos industriales. Y uno de esos residuos orgánicos agrícolas es la cáscara de plátano, ya que se ha encontrado que dicho desecho puede ser utilizado para la producción de un material biosorbente, siendo efectivo en la remoción de metales pesados de aguas sintéticas.

De acuerdo a lo anterior, la investigación se enfocará en la elaboración de un material biosorbente obtenido a partir de la cáscara de plátano, utilizándolo para remover el metal pesado presente en los efluentes del sector curtiembre (para este estudio se considera Cromo VI), ya que es una de las actividades que consume

grandes cantidades de agua en sus procesos de producción y genera aguas residuales con altos niveles de contaminación, debido a los desechos que posee y al contenido de metales pesados, los cuales son perjudiciales para el medio ambiente y el bienestar físico de las personas. El material biosorbente puede ser acondicionado para estar en contacto directo con el agua residual de curtiembre y filtrarse posteriormente esta para así analizar la concentración final del parámetro en estudio y de esa manera determinar el rendimiento del proceso de biosorción para el sistema adsorbato – adsorbente.

## **CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS.**

### **1.1. Definición de adsorción.**

El término de adsorción fue mencionado por primera vez por Kayser H. y E. Du Bois Reimond en 1882, desde su descubrimiento hasta ahora la adsorción ha sido muy usada en procesos de recuperación y purificación en el tratamiento de efluentes y el control de contaminantes en catálisis enzimática y secado de hidrocarburos.

La adsorción es la acumulación o aumento de la concentración de una sustancia en la frontera o región que separa dos fases, comúnmente llamada interfase. En el caso en el que una de las fases sea un sólido la adsorción se define como la transferencia selectiva de uno o más solutos de una fase fluida a la superficie del sólido adsorbente (Villanueva Carrillo, 2017). También puede definirse como el proceso de atracción y retención de una molécula, iones o átomos en la superficie de un material (Ordóñez Vinuesa y Moreno Farfán, 2013).

Hay que distinguir entre los procesos de adsorción y absorción. La absorción es un proceso por el cual un material (absorbente) es retenido por otro (absorbato); puede ser la disolución de un gas o líquido en un líquido o sólido; o en la retención mediante fuerzas físicas de las moléculas de un gas, líquido o sustancia disuelta a la superficie o a la masa de un sólido.

En una masa de material sólido o líquido, todos los enlaces del interior entre los átomos que lo constituyen están satisfechos, pero en su superficie aparece una discontinuidad en esos enlaces. Para esos enlaces insaturados, es energéticamente favorable interactuar con la materia presente en sus alrededores, lo que se produce de forma espontánea. Por este motivo se produce el fenómeno de la adsorción. El enlace que une los átomos de la sustancia con menor grado de ordenación con el material de mayor grado de ordenación depende de ambos materiales.

Algunas de las principales aplicaciones de la adsorción son las siguientes (García Barrera, 2016):

- i. Purificación de aguas residuales.
- ii. Descontaminación de gases.
- iii. Eliminación de olores, sabores o colores no deseados, por ejemplo, en aceites.
- iv. Deshumidificación de gasolinas.
- v. Secado de aire.
- vi. Ciencia forense (revelado de huellas dactilares).

### 1.1.1. Operaciones de adsorción.

Es única la naturaleza tan diversa de las aplicaciones de la adsorción. Por ejemplo, se aplica a una amplia variedad de procesos, como la recuperación de vapores a partir de mezclas diluidas con gases, recuperación del soluto y eliminación de contaminantes de la solución, y fraccionamiento de mezclas gaseosas y líquidas. Las técnicas utilizadas incluyen tanto los métodos por etapas como los de contacto continuo; estos se aplican en operaciones por lotes, continuas, o semicontinuas (Treybal, 1980).

En la Tabla 1.1 se indican las diferentes técnicas utilizadas para poner en contacto fluidos y sólidos.

**Tabla 1.1** Clasificación de los procesos de adsorción.

Técnica utilizada		Fluido	Método de operación	Ejemplo
Contacto por etapas		Líquido	Carga y continuo	Filtración de contacto
Contacto continuo	1) Estado estacionario Lecho móvil Lecho fluidificado Lecho descendente	Gases y líquidos	Continuo	Hipersorción Proceso Landmark para el CS <sub>2</sub>
	2) Estado no estacionario Lecho fijo		Semicontinuo	Recuperación de disolventes Secado de gases

Fuente: Parker, (2001).

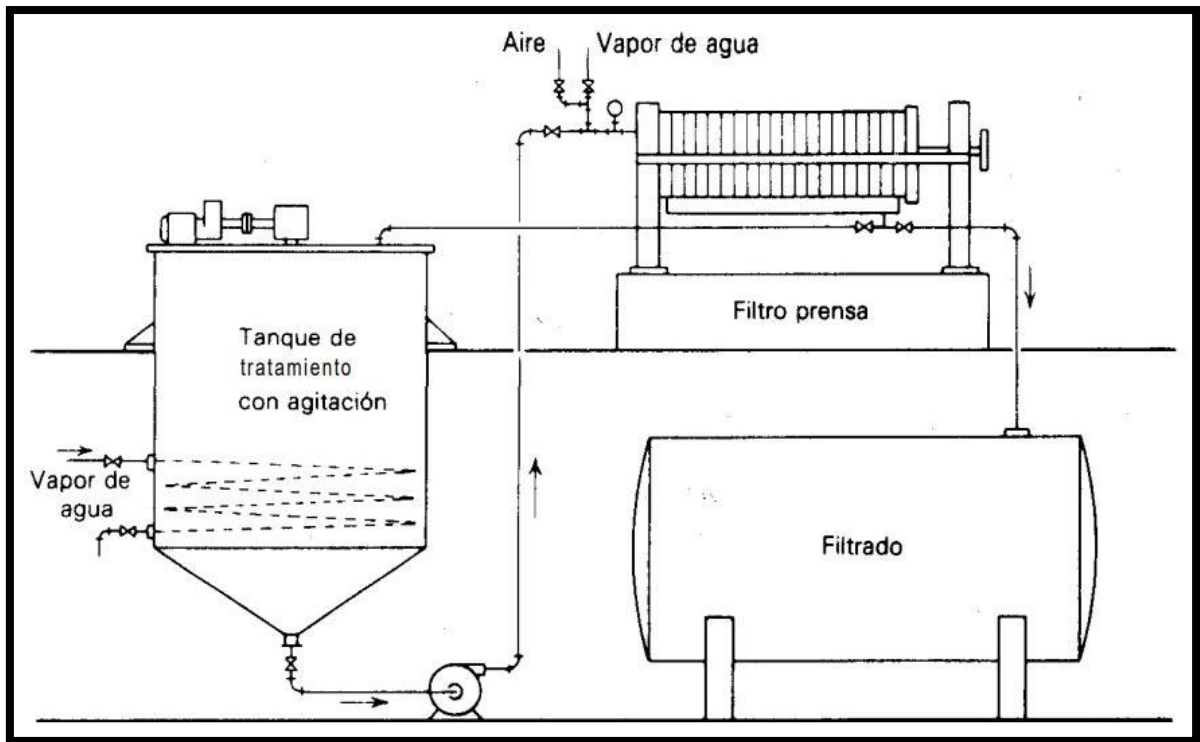
#### I. Operación por etapas (Treybal, 1980).

Las soluciones líquidas, en donde el soluto que se va a separar se adsorbe más o menos fuertemente en comparación con el resto de la solución, se tratan en operaciones por lotes, semicontinuas o continuas de manera análoga a las operaciones de mezclado-sedimentación en la extracción líquida (filtración por contacto). Las aplicaciones típicas del proceso incluyen:

- a) La recuperación de solutos valiosos a partir de soluciones diluidas.
- b) La eliminación de contaminantes indeseables de una solución.



Cada etapa requiere el contacto íntimo entre dos fases insolubles durante el tiempo suficiente para tener una aproximación razonable al equilibrio, contacto que va seguido de la separación física de las fases. En cuanto al equipo utilizado para aplicar estos principios a la adsorción es variado y depende de la aplicación del proceso. El equipo que se muestra en la Figura 1.1 es muy característico de muchas instalaciones que operan por lotes. El líquido que se va a procesar y el adsorbente están mezclados íntimamente en el tanque de tratamiento a la temperatura deseada y durante el período requerido; después se filtra la fina colada para separar el adsorbente sólido y el adsorbato que acompaña al líquido.



**Figura 1.1** Filtración por contacto. Arreglo esquemático para el tratamiento por lotes en una sola etapa de líquidos.

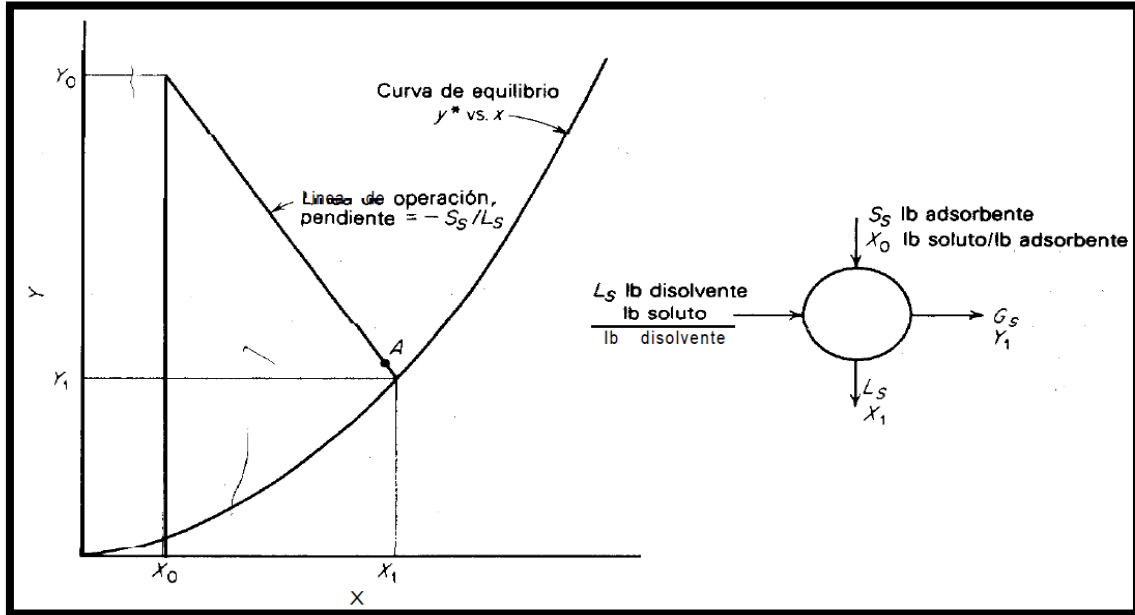
Fuente: Treybal, (1980).

El equipo se adapta fácilmente a la operación en varias etapas colocando tanto tanques y filtros adicionales como sea necesario.

El tipo de adsorbente utilizado depende de la solución por tratar. Con frecuencia, las soluciones acuosas se tratan con carbón activado, preparado especialmente para el uso que se le va a dar.

Otra variable importante en este fenómeno es que se debe utilizar la temperatura máxima adecuada durante el mezclado, puesto que la mayor viscosidad resultante del líquido aumenta tanto la rapidez de difusión del soluto como la facilidad con la

cual pueden moverse las partículas de adsorbente a través del líquido. Por lo común, la adsorción en el equilibrio disminuye ligeramente a mayores temperaturas, pero la disminución está más que compensada por la mayor rapidez de aproximación al equilibrio.



**Figura 1.2** Adsorción en una sola etapa.  
Fuente: Treybal, (1980).

En la Figura 1.2, está el círculo que representa todo el equipo y los procedimientos que constituyen una sola etapa. La operación es básicamente análoga a la absorción de gases en una sola etapa, en donde la solución que se va a tratar corresponde al “gas” y el adsorbente sólido al “líquido”. La solución que se va a tratar contiene L<sub>s</sub>, masa de sustancia no adsorbida o disolvente; la concentración de soluto adsorbido se reduce de Y<sub>0</sub> a Y<sub>1</sub>, masa soluto/masa disolvente. El adsorbente se agrega con la extensión S<sub>s</sub> masa sólido libre de adsorbato; el contenido en soluto adsorbato aumenta de X<sub>0</sub> a X<sub>1</sub> masa soluto/masa adsorbente. Si se utiliza adsorbente fresco, X<sub>0</sub> = 0; en los casos de operación continua L<sub>s</sub> y S<sub>s</sub> se miden en función de masa/tiempo.

El soluto separado del líquido es igual al recogido por el sólido.

$$L_s(Y_0 - Y_1) = S_s(X_0 - X_1) \quad (\text{Ecuación 1.1})$$

Sobre coordenadas X, Y esta ecuación representa una línea de operación recta, a través de los puntos de coordenadas (X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>) y (X<sub>1</sub>, Y<sub>1</sub>), de pendiente - S<sub>s</sub>/ L<sub>s</sub>. Si la etapa es una etapa teórica o ideal, las corrientes efluentes están en equilibrio, de forma que el punto (X<sub>1</sub>, Y<sub>1</sub>) cae sobre la isoterma de adsorción en equilibrio. El uso

de la Ecuación 1.1 supone que la cantidad de líquido retenido mecánicamente con el sólido (pero no adsorbido) después de la filtración o sedimentación es despreciable. Esto es bastante satisfactorio para la mayoría de las operaciones de adsorción, puesto que la cantidad de sólido empleado es generalmente muy pequeño con respecto a la del líquido tratado.

En cuanto a la operación a contracorriente en varias etapas, la eliminación de una cantidad dada de soluto puede lograrse con gran economía de adsorbente, si la solución se trata con pequeños lotes separados y no con un solo lote y se filtra entre cada etapa, conocido mayormente como “alimentación separada”, generalmente se realizar por lotes, aunque también es posible la operación continua.

## **II. Operación Contacto Continuo (Treybal, 1980).**

En estas operaciones, el fluido y el adsorbente están en contacto en todo el aparato, sin separaciones periódicas de las fases. La operación puede realizarse en forma estrictamente continua, en estado estacionario, caracterizada por el movimiento del sólido al igual que del fluido. De modo alternativo, a causa de la rigidez de las partículas del adsorbente sólido, también es posible operar, con ventajas, de manera semicontinua, caracterizada por un fluido móvil y un sólido estacionario. Esta operación tiene como resultado condiciones en estado no estacionario, en donde las composiciones en el sistema cambian con el tiempo.

### **a) Adsorbentes de lecho móvil de estado estacionario.**

Las condiciones del estado estacionario requieren del movimiento continuo, tanto del fluido como del adsorbente, a través del equipo a flujo constante, sin que la composición cambie con el tiempo en ningún punto del sistema. Si se utiliza flujo paralelo del sólido y los fluidos, el resultado neto es cuando mucho una condición de equilibrio entre las corrientes efluentes, o el equivalente de una etapa teórica.

Es el propósito de estas aplicaciones desarrollar separaciones equivalentes a varias etapas; por lo tanto, solo es necesario considerar las operaciones a contracorriente. Aplicaciones se efectúan en el tratamiento de gases y líquidos, con el fin de recuperar el soluto y el fraccionamiento, mediante la adsorción ordinaria y el intercambio iónico.

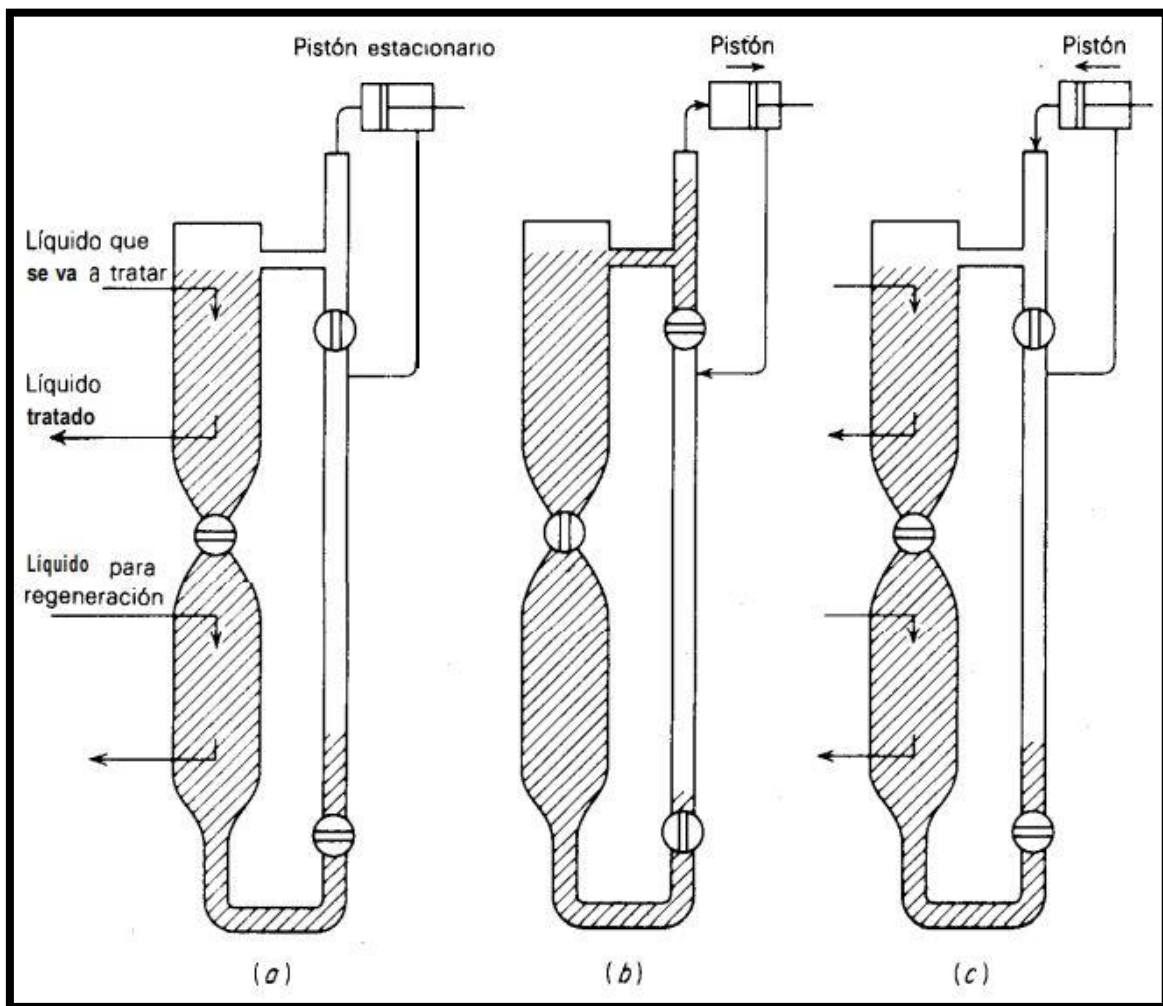
Recientemente se han creado aparatos satisfactorios a gran escala para el contacto continuo entre un sólido granular y un fluido. Grandes esfuerzos se han realizado para crear un aparato para el flujo a contracorriente de gas y sólido, con flujo de pistón del sólido en lugar de lechos fluidizados.

La hidráulica y mecánica exitosas de este aparato, dieron por resultado el Hypersorber, que se utiliza para el fraccionamiento de gases de hidrocarburos. El

aparato se parece a una columna de destilación contracorriente en que la fase sólida fluye en forma descendente, análoga al flujo ascendente de calor en la destilación.

En el caso del tratamiento de líquidos se han utilizado aparatos bastante menos elaborados. Los sólidos pueden introducirse por la parte superior de la torre mediante un alimentador de tornillo o simplemente por gravedad desde un recipiente. La separación de sólidos en el fondo puede lograrse mediante diferentes tipos de aparatos; por ejemplo, una válvula giratoria con compartimientos, similar a las puertas giratorias de los edificios; generalmente no es posible que los sólidos separados estén completamente libres de líquidos.

El equipo de contacto de Higgins que se diseñó inicialmente para el intercambio iónico, pero que generalmente es útil para el contacto sólido-líquido, es único por su naturaleza intermitente de operación, tal como se muestra en la Figura 1.3.



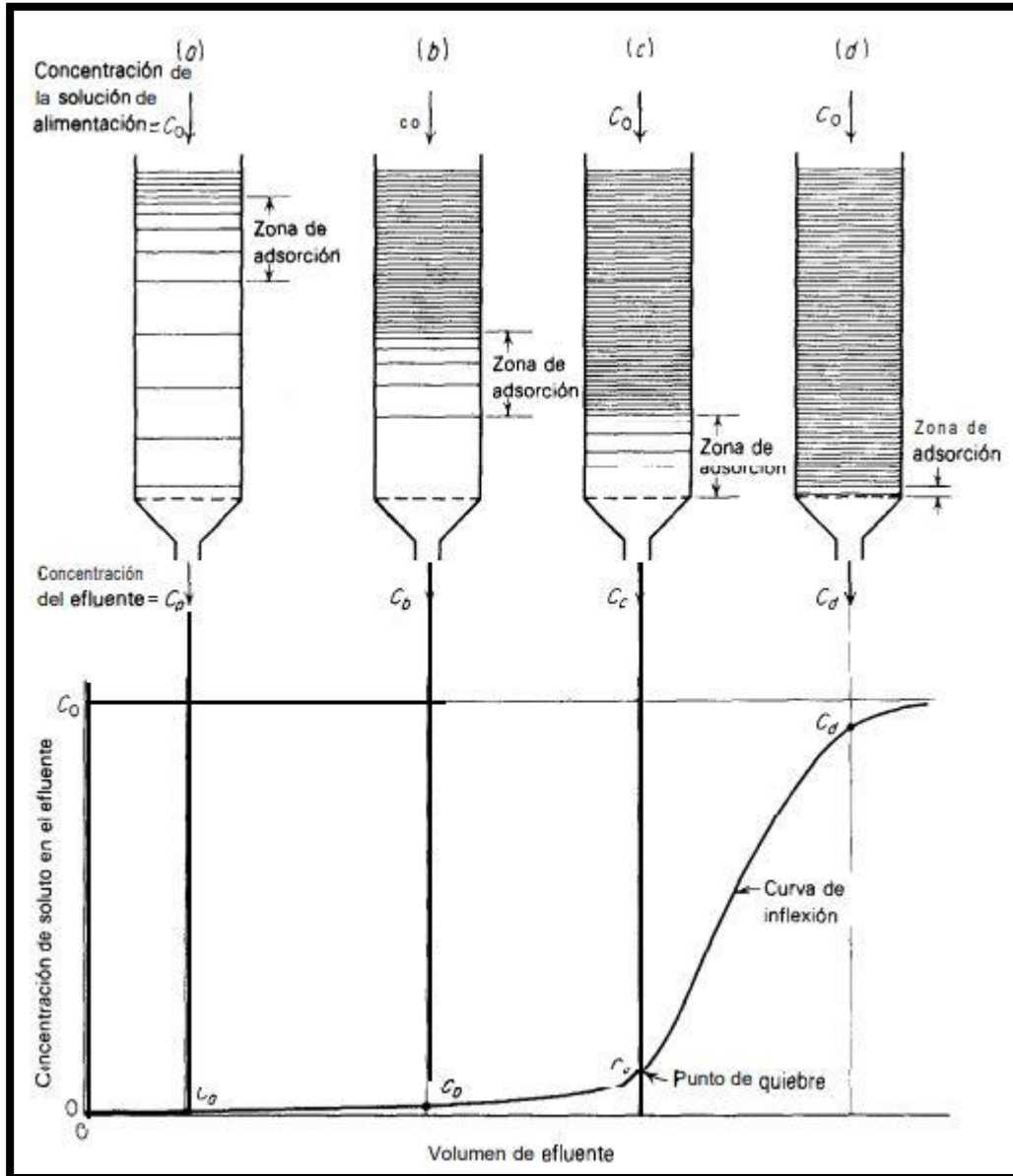
**Figura 1.3** Equipo de Contacto de Higgins, esquemático (los sólidos se muestran sombreados).

Fuente: Treybal, (1980).

### **b) Adsorbentes de lecho fijo de estado no estacionario.**

Debido a la inconveniencia y al costo relativamente alto de transportar continuamente partículas sólidas, lo cual es necesario en las operaciones en estado estacionario, frecuentemente es más económico pasar la mezcla de fluidos que se van a tratar a través de un lecho estacionario de adsorbente. Al aumentar la cantidad de fluido que pasa a través del lecho, el sólido adsorbe cantidades mayores de soluto y predomina un estado no estacionario.

La onda de adsorción considérese el caso de una solución binaria, ya sea gaseosa o líquida, que contiene un soluto fuertemente adsorbido en concentración  $C_0$ . El fluido se va a pasar continuamente a través de un lecho relativamente profundo de adsorbente que al principio está libre de adsorbato. La capa superior del sólido, en contacto con la fuerte solución entrante, adsorbe al principio el soluto rápido y efectivamente; el poco remanente de soluto en la solución queda prácticamente eliminado por las capas de sólido en la parte inferior del lecho. El efluente del fondo del lecho está prácticamente libre de soluto como en Figura 1.4 (c), en la parte inferior.



**Figura 1.4** La onda de adsorción.

Fuente: Treybal, (1980).

### 1.1.2. Materiales adsorbentes.

Las investigaciones sobre biosorción en estos últimos años han enfocado la atención sobre el aprovechamiento de los materiales residuales y los subproductos que se forman por los varios procesos que se llevan a cabo en las industrias por su variedad y bajo costo (Driss Alami, 2010).

En general los adsorbentes son materiales sólidos, naturales o sintéticos de estructura amorfa y microcristalina, es decir, son muy porosos y de gran superficie

de contacto. Físicamente son sustancias pulverizadas o granulares, de tamaño variable y superficie específica.

Todo material que se emplea en el proceso de adsorción presenta varias características, las cuales a su vez ayudarán a dilucidar qué es lo que está sucediendo en este fenómeno, a continuación, se mencionan las siguientes (Villanueva Carrillo, 2017):

- a) Área superficial y estructura porosa: A mayor área, mayor número de sitios activos disponibles y una mayor adsorción.
- b) Granulometría: La reducción del tamaño de partícula aumenta la velocidad de adsorción.
- c) Composición química: Dependiendo de los grupos funcionales en la superficie del adsorbente será la selectividad de la adsorción.
- d) Características en la adsorción de moléculas orgánicas:
  - i. La adsorción de moléculas orgánicas es más fuerte al aumentar su peso molecular, mientras el tamaño de la molécula no rebase al tamaño del poro.
  - ii. Las moléculas orgánicas no polares se adsorben con mayor fuerza que las polares.
  - iii. Las moléculas orgánicas ramificadas se adsorben con mayor fuerza que las lineales.
  - iv. La mayoría de las moléculas orgánicas que tienen ligados átomos de cloro, bromo o yodo se adsorben con mayor fuerza.
- e) Dureza: Si la partícula no resiste la abrasión durante el retrolavado y la regeneración se pierde una cantidad importante de sitios activos del sistema.

Los materiales adsorbentes se clasifican en tres tipos según su origen:

### **I. Adsorbentes de origen biológico.**

La biomasa en vivo son pequeñas partículas de baja densidad y poca rigidez, están altamente disponibles en el medio y en grandes cantidades, engloba algas, bacterias, hongos y levaduras (Veglio & Beolchini, 1997).

### **II. Adsorbentes de origen natural.**

Los biosorbentes de origen natural están conformados por un material que no ha pasado por procesos agrícolas ni industriales, es un tipo de biomasa inerte que se encuentra de forma natural en el medio ambiente, estos pueden ser arcillas, zeolitas, etc.

### **III. Adsorbentes de origen vegetal procedentes de procesos industriales o agrícolas.**

En este grupo el material se obtiene gratuitamente o a bajos precios, aquí se encuentra todo material obtenido después de un proceso industrial o agrícola, pueden ser cortezas de árboles, residuos de jardín o agroindustriales, etc. (Ordóñez Vinuesa y Moreno Farfán, 2013).

#### **1.1.3. Cáscara de plátano como adsorbente de origen agrícola.**

La industria platanera produce una gran cantidad de residuos vegetales, ya que de la planta solamente se aprovecha el fruto, teniendo que desechar las demás partes de la planta: pseudotallo, hojas y pinzote o raquis (parte de la planta que sostiene los manojos de frutos), las cuales están constituidas por fibras lignocelulósicas que podrían ser utilizadas como materia prima para la obtención de celulosa o en la obtención de materiales compuestos con lo que se les proporcionaría un valor agregado a dichos residuos.

La adsorción de la cáscara de plátano se debe en gran parte a la lignina que está constituida por polímeros insolubles. La cáscara de plátano cuenta en su composición con hidroxila y carboxilo de pectina, elementos capaces de adsorber metales pesados.

Los principales componentes de la cáscara son: celulosa (25%), hemicelulosa (15%) y lignina (60%). La cáscara de banano tiene una propiedad de adsorción. La cáscara molida tiene la capacidad para extraer iones de metales pesados del agua y de los parámetros que intervienen en este proceso. La adsorción de la cáscara de plátano se debe en gran parte a la lignina que son polímeros insolubles, presenta un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos (Villanueva Carrillo, 2017).

Por ello que se pretende ahondar más en el fruto del plátano porque es la principal materia prima para la elaboración del material biosorbente.

#### **1.2. Generalidades del plátano (*Musa sp.*)**

El plátano es un fruto perteneciente a la familia de las Musáceas y es considerado el cuarto cultivo más importante luego del arroz, trigo y maíz por tratarse de un producto básico, de exportación e importación, así como fuente de empleo e ingresos en muchos países del trópico y subtrópico.



### 1.2.1. Origen del plátano (Linnaeus, 1753).

El plátano tiene su origen en Asia meridional, siendo conocido en el Mediterráneo desde el año 650 d.C. La especie llegó a Canarias en el siglo XV y desde allí fue llevado a América en el año 1516.

El cultivo comercial se inicia en Canarias a finales del siglo XIX y principios del siglo XX. El plátano macho y el bananito son propios del Sudoeste Asiático, su cultivo se ha extendido a muchas regiones de Centroamérica y Sudamérica, así como de África subtropical; constituyendo la base de la alimentación de muchas regiones tropicales.

El plátano es el cuarto cultivo de frutas más importante del mundo. Los países latinoamericanos y del Caribe producen el grueso de los plátanos que entran en el comercio internacional, unos 10 millones de toneladas del total mundial de 12 millones de toneladas.

Es considerado el principal cultivo de las regiones húmedas y cálidas del Sudoeste Asiático. Los consumidores del norte lo aprecian solo como un postre, pero constituye una parte esencial de la dieta diaria para los habitantes de más de cien países tropicales y subtropicales.

### 1.2.2. Morfología del plátano (Linnaeus, 1753).

El desarrollo de una planta de plátano comprende los siguientes componentes:

- a) **Planta:** Herbácea perenne gigante, con rizoma corto y tallo aparente, que resulta de la unión de las vainas foliares, cónico y de 3.5 – 7.5 m de altura, terminado en una corona de hojas.
- b) **Rizoma o bulbo:** tallo subterráneo con numerosos puntos de crecimiento (meristemas) que dan origen a pseudotallos, raíces y yemas vegetativas.
- c) **Sistema radicular:** posee raíces superficiales que se distribuyen en una capa de 30 – 40 cm, concentrándose la mayor parte de ellas en los 15 – 20 cm.
- d) **Raíz:** Son de color blanco, tiernas cuando emergen y amarillentas y duras posteriormente. Su diámetro oscila entre 5 y 8 mm y su longitud puede alcanzar los 2.5 – 3 m en crecimiento lateral y hasta 1.5 m en profundidad. El poder de penetración de las raíces es débil, por lo que la distribución radicular está relacionada con la textura y estructura del suelo.
- e) **Tallo:** el verdadero tallo es un rizoma grande, almidonoso, subterráneo, que está coronado con yemas, las cuales se desarrollan una vez que la planta ha florecido y fructificado. A medida que cada chupón del rizoma alcanza la madurez, su yema terminal se convierte en una inflorescencia al ser

empujada hacia arriba desde el interior del suelo por el alargamiento del tallo, hasta que emerge arriba del pseudotallo.

- f) **Hojas:** se originan en el punto central de crecimiento o meristemo terminal, situado en la parte superior del rizoma. Al principio, se observa la formación del pecíolo y la nervadura central terminada en filamento, lo que será la vaina posteriormente. La parte de la nervadura se alarga y el borde izquierdo comienza a cubrir el derecho, creciendo en altura y formando los semilimbos. La hoja se forma en el interior del pseudotallo y emerge enrollada en forma de cigarro. Son hojas grandes, verdes y dispuestas en forma de espiral, de 2 – 4 m de largo y hasta 1.5 m de ancho, con un pecíolo de 1 m o más de longitud y un limbo elíptico alargado, ligeramente decurrente hacia el pecíolo, un poco ondulado y glabro. Cuando son viejas se rompen fácilmente de forma transversal por el azote del viento. De la corona de hojas sale, durante la floración, un escapo pubescente de 5 – 6 cm de diámetro, terminado por un racimo colgante de 1 – 2 m de largo. Este lleva una veintena de brácteas ovales alargadas, agudas, de color rojo púrpura, cubiertas de un polvillo blanco harinoso. De las axilas de estas brácteas nacen a su vez las flores.
- g) **Flores:** flores amarillentas, irregulares y con seis estambres, de los cuales uno es estéril, reducido a estaminodio petaloideo. El gineceo tiene tres pistilos, con ovario ínfero. El conjunto de la inflorescencia constituye el “régimen” de la platanera. Cada grupo de flores reunidas en cada bráctea forma una reunión de frutos llamada “mano”, que contiene de 3 a 20 frutos. Un régimen no puede llevar más de 4 manos, excepto en las variedades muy fructíferas, que pueden contar con 12 – 14.
- h) **Fruto:** baya oblonga. Durante el desarrollo del fruto estos se doblan geotrópicamente, según el peso de este, determinando esta reacción la forma del racimo. Los plátanos son polimórficos, pudiendo contener de 5 – 20 manos, cada una con 2 – 20 frutos, siendo su color amarillo verdoso, amarillo, amarillo-rojizo o rojo. Los plátanos comestibles son de partenocarpia vegetativa, o sea, desarrollan una masa de pulpa comestible sin ser necesaria la polinización. Los óvulos se atrofian pronto, pero pueden reconocerse en la pulpa comestible. La partenocarpia y la esterilidad son mecanismos diferentes, debido a cambios genéticos, que cuando menos son parcialmente independientes. La mayoría de los frutos de la familia de las Musáceas comestibles son estériles, debido a un complejo de causas, entre otras, a genes específicos de esterilidad femenina, triploidía y cambios estructurales cromosómicos, en distintos grados.

### 1.2.3. Variedades de plátano.

La mayoría de las variedades de plátano proceden exclusivamente de *Musa acuminata*. Entre las más importantes se destacan (Linnaeus, 1753):

- a) ***Pisang Jari Buaya***: es un diploide natural cuya característica más importante es su alta resistencia a nematodos. Esta condición la hace muy valiosa en los programas de mejoramiento genético en los que se desean incorporar resistencia a esta plaga.
- b) ***Gros Michel***: tiene unas extraordinarias cualidades en cuanto a manejo y a conservación. Es una variedad grande y robusta cuyo pseudotallo tiene una longitud de 6 – 8 m de coloración verde claro con tonos rosas en algunas partes. Su peciolo posee en la base manchas de color marrón oscuro y los limbos son verdes de 4 m de largo por 1 m de ancho. Los racimos son alargados de forma cilíndrica con 10 a 14 manos promedio. Los frutos de la fila interna se muestran erectos pues su curva se encuentra en el pedúnculo y en la parte basal del fruto. El ápice tiene forma de cuello de botella y el pedúnculo es más corto y robusto. La maduración es regular y homogénea y es muy susceptible a enfermedades como el mal de Panamá, por lo que hoy casi ha desaparecido.
- c) ***Lacatan***: se caracteriza por un crecimiento muy rápido, ya que fructifica en menos de 10 meses. Alcanza alturas de 4 – 6 m con racimos largos de forma cilíndrica y frutos curvados en su parte apical. Los pedúnculos son largos y frágiles, el fruto es muy sensible a parasitosis postcosecha y la maduración es delicada, siendo su fruto menos atractivo.
- d) ***Sucrier***: es un ejemplar diploide, con pseudotallo oscuro, de tono amarillento y apenas cerúleo, que produce racimos pequeños, de frutos de piel delgada y sumamente dulces.
- e) ***Dedo de Dama o Guineo Blanco***: es un banano de tronco delgado y fuerte sistema radicular, que produce racimos de entre 10 y 14 manos de 12 a 20 frutos. Es resistente a la sequía y a la enfermedad de Panamá, pero susceptible a la sigatoka.
- f) ***Cavendish***: se desarrolla en numerosas variedades:
  - i. **Cavendish Enano**: porte grande, con las hojas anchas, tolerante al viento y a la sequía y que produce frutos medianos de buena calidad, pero propensos a daños durante el transporte por la delgadez de su cáscara. Tiene la peculiaridad de tener flores masculinas indehiscentes.
  - ii. **Cavendish Gigante o Grand Naine**: porte medio, su pseudotallo tiene un moteado de color pardo, las bananas son de mayor tamaño que el Cavendish Enano, de cáscara más gruesa y sabor menos intenso.
- g) ***Robusta***: porte pequeño y resistente al viento.

- h) **Valery:** variante de Robusta más resistente a Sigatoka, pero cuyo fruto es menos firme y ligeramente cerúleo en textura.
- i) **Golden Beauty:** tiene la particularidad de su resistencia a la enfermedad de Panamá y a la Sigatoka. Son bananos pequeños, con racimos cortos, pero resistentes al transporte y de muy buen sabor.
- j) **Morado:** es resistente a las enfermedades, pero tarda más de 18 meses en fructificar. Es un banano de gran porte, con hojas y tallos de color morado intenso. Produce racimos compactos de unos 100 frutos de sabor intenso, tamaño medio y cuya coloración vira a naranja a medida que madura.

De origen exclusivamente de *Musa balbisiana* las variedades más importantes son:

- a) **Maricongo:** porte grande con fruta muy angulosa y de buen tamaño.
- b) **Saba:** es de menor calidad culinaria pero inmune a la Sigatoka negra.

Finalmente, existen cultivares híbridos diploides, triploides y tetraploides, de los cuales podemos destacar:

- a) **Burro u Orinoco:** planta alta, resistente, de pocos frutos largos y muy gruesos, con la pulpa ligeramente rosácea y comestible en crudo, aunque cocida es excelente.
- b) **Francés:** banano grande, vigoroso, con las flores masculinas indehiscentes.
- c) **Laknau:** híbrido triploide que se usa como material base para cruzamientos experimentales debido a que produce flores fértiles.
- d) **Macho:** bananos muy resistentes que producen poca fruta, comestible en crudo pero de sabor mucho más agradable tras la cocción.
- e) **Manzana:** banano muy grande, con solo una docena de manos por racimo y 16 – 18 frutas por mano, muy resistente a la Sigatoka pero susceptible a la enfermedad de Panamá. El fruto es muy fragante y ligeramente astringente antes de madurar aunque muy sabroso.
- f) **Mysore:** vigoroso, resistente a la sequía, inmune a la enfermedad de Panamá y poco susceptible a la Sigatoka. Produce racimos compactos de bananas de piel delgada y color amarillo brillante con sabor subácido.
- g) **Cenizo:** extremadamente alto, con un tallo floral elongado y pocas manos por racimo. Produce frutos angulosos, muy grandes, de piel cenicienta y pulpa muy blanca y con una alta concentración de azúcar.
- h) **Chato o Bluggoe:** resistente a las enfermedades, produce racimos de frutos de gran tamaño, distintivos por su estructura abierta.
- i) **Pelipita:** resistente a la Sigatoka negra, sus frutos tienen un sabor poco intenso.
- j) **Tiparot:** tetraploide desarrollado por su resistencia a las enfermedades, pero poco productivo.

- k) **Dominico:** híbrido caracterizado por su sabor dulce, aunque los dedos son cortos, delgados y rectos. El racimo se caracteriza por la presencia de la inflorescencia masculina.
- l) **FHIA 21:** tetraploide caracterizado por ser de porte mediano, con tallo de color verde y franjas rosado-amarillentas, hojas verdes y ligeramente duras y de un racimo largo con un promedio de 80 dedos.

En el año 2002, el Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA) evaluó alrededor de 38 materiales de musáceas, entre ellos diferentes cultivares de plátano. En plátano, algunos de los que han mostrado mejores características son:

- a) **Criollo o Usulután:** Son plantas vigorosas; alcanzan una altura promedio de 3.5 a 4.0 m; con un diámetro promedio de pseudotallo de 0.20 – 0.22 m a un metro de altura, es susceptible a la enfermedad Sigatoka Negra, resistente al transporte y posee buenas características culinarias; los racimos son cortos, con un número promedio de 27 – 30 frutos y un peso de 12.0 a 16.0 kg. La inflorescencia masculina (pichota) se atrofia y desaparece conforme va madurando el racimo.
- b) **Enano:** La planta tiene una altura promedio de 2.50 m, que la hace más resistente al acame, causado por el viento. Posee un pseudotallo grueso, con un diámetro mayor de 0.25 m con abundantes hojas anchas. Racimos cortos, con un promedio de 40 – 42 frutos y un promedio de 13.0 kg de peso. Los frutos poseen muy buen sabor y son de excelente calidad. El período de floración a cosecha es de 80 – 85 días. La cosecha se inicia entre 10 – 11 meses después de la siembra.

#### 1.2.4. Composición química del fruto.

La pulpa de plátano contiene diversas propiedades, como lo han demostrado estudios realizados sobre este. De manera general, la pulpa de plátano es una excelente fuente de potasio. El potasio se puede encontrar en una variedad de frutas, verduras o incluso carnes. Sin embargo, un solo plátano puede proporcionar hasta el 23% de potasio que se necesita al día. El potasio beneficia a los músculos, ya que ayuda a mantener su buen funcionamiento y evita los espasmos musculares.

Además, estudios recientes muestran que el potasio puede ayudar a disminuir la presión arterial y también reduce el riesgo de accidentes cerebrovasculares. El plátano es rico en vitaminas A, B<sub>6</sub>, C y D, dando beneficios especialmente a los huesos y músculos del cuerpo humano ya que uno solo de estos frutos contiene el 41% del requerimiento necesario de vitamina B<sub>6</sub> al día.

Estudios recientes han comprobado que el consumo de plátano ayuda a mejorar el humor para personas con depresión y síndrome pre-menstrual debido a su alto

contenido de vitaminas, específicamente la vitamina B<sub>6</sub> ya que está integrada por las moléculas de piridoxal, piridoxina y piridoxamina las cuales tienen un papel atenuante en el metabolismo de varios neurotransmisores (serotonina, norepinefrina, sistema colinérgico, dopamina y ácido  $\gamma$ -aminobutírico) cuya deficiencia permite el desarrollo de la depresión así como el síndrome premenstrual y el trastorno disfórico premenstrual (Blasco y López, 2014).

En estado inmaduro, el plátano posee una alta concentración de almidón (70%) a comparación de la fruta en estado maduro. Este almidón se degrada a una pequeña porción de monosacáridos mientras que el resto del almidón se degrada a sacarosa. El almidón es un polímero importante de origen natural con diversas aplicaciones en la ciencia de los alimentos y polímeros, la industria moderna de alimentos está aumentando la demanda del mismo por lo que se ha generado un interés por identificar nuevas fuentes de este polisacárido; de acuerdo a Bello-Pérez en 1999 se identificó hasta el 70% (base seca) de presencia de almidón en frutas en estado inmaduro o verde, específicamente en plátano y mango.

De acuerdo al estudio realizado por China et al. (2011) las flores también poseen una alta capacidad antioxidante y que pueden ser utilizadas como ingredientes con propiedades funcionales para la prevención del estrés oxidativo.

Se han realizado estudios sobre la capacidad antioxidante del pseudotallo y rizoma de la platanera específicamente en la elaboración de bebidas a partir de ellos, en los cuales se pudo comprobar por diferentes métodos analíticos (Fenoles totales y DPPH) que estos dos subproductos de la platanera pueden ser ocupados para generar nuevas bebidas funcionales (Blasco y López, 2014).

#### **1.2.5. Composición química de la cáscara de plátano.**

El principal subproducto del proceso industrial del plátano, es la cáscara la cual representa aproximadamente el 30% del peso del fruto; las aplicaciones potenciales para la cáscara de plátano dependen de su composición química. La cáscara de plátano es rica en fibra dietética, proteínas, aminoácidos esenciales, ácidos grasos poliinsaturados y potasio; entre los esfuerzos para utilizar la cáscara se han obtenido proteínas, metanol, etanol, pectinas y enzimas (Blasco y López, 2014).

La cáscara de banano maduro contiene aproximadamente 2.7% de fructosa, 3.2% de glucosa y 7.8% de sacarosa en base seca. La fibra cruda en la cáscara de banano maduro contiene 60% de lignina, 25% de celulosa y 15% de hemicelulosa (García Barrera, 2016).

En la Tabla 1.2 se presentan los componentes principales de la cáscara de plátano:

**Tabla 1.2** Composición química de la cáscara de plátano.

<b>Componentes</b>	<b>Cáscara de plátano verde</b>	<b>Cáscara de plátano maduro</b>
Energía bruta (kcal)	4383	4592
% Humedad	91.62	95.66
% Proteína cruda	5.19	4.77
% Fibra cruda	11.58	11.95
% Calcio	0.37	0.36
% Fósforo	0.28	0.23
% Ceniza	16.30	14.58

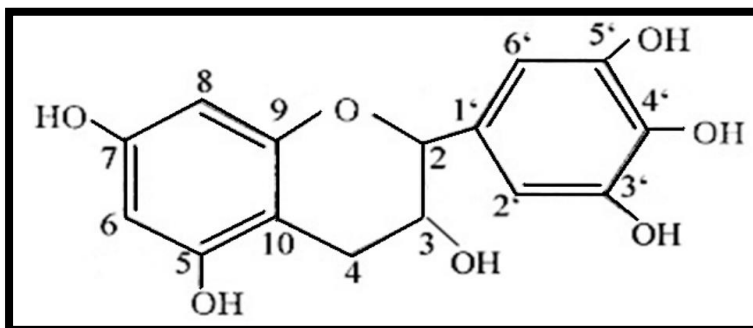
Fuente: García Barrera, (2016).

Entre otros usos se ha obtenido carbón vegetal, una fuente de combustible alternativa para cocinar. Kudan en 1962 reportó que la cáscara en conjunto con otras sustancias crea un ungüento para reducir los dolores causados por la artritis. Además, se considera que la cáscara de plátano puede ser una fuente potencial de sustancias antioxidantes y antimicrobianas, así como compuestos fitoquímicos con actividad contra radicales libres. Varios autores han analizado el efecto de los compuestos antioxidantes presentes en cáscara de plátano, para identificar el efecto sobre los radicales libres los cuales se producen continuamente en nuestro organismo ya sea de manera natural o por el estrés ambiental, así como otros factores relacionados con muchas enfermedades como el cáncer, aterosclerosis, artritis, enfermedad de Parkinson y Alzheimer.

Las células de los mamíferos poseen mecanismos de defensa elaborados que eliminan estos radicales, los compuestos antioxidantes son sustancias que eliminan los radicales libres y previenen el daño causado por ellos, por lo que se recomienda a su vez adquirir sustancias antioxidantes a partir de la dieta como lo son las frutas, verduras y granos; las cáscaras de una gran variedad de frutas han ganado atención como fuentes naturales de antioxidantes y contenido de fitoquímicos que son ricos en compuestos con actividad eliminadora de radicales libres.

La cáscara de plátano se considera una fuente natural de compuestos antioxidantes para la elaboración de alimentos funcionales con efecto en contra de enfermedades del corazón, así como el cáncer. Actualmente los estudios se han focalizado en el aislamiento, caracterización y utilización de antioxidantes naturales, la mayoría de los compuestos antioxidantes presentes en frutas y verduras provienen de compuestos como la vitamina C, vitamina E y  $\beta$ -caroteno; el plátano es uno de los frutos más consumidos a nivel mundial y se sabe que su pulpa, así como su cáscara contienen varios antioxidantes como la galocatequina y la dopamina.

El contenido total de compuestos fenólicos en la cáscara de plátano (*Musa acuminata* Colla AAA) varía de 0.9 a 3 g/100 g en base seca. Someya, Yoshiki & Okubo en el año 2002 identificaron la galocatequina (Figura 1.5) en concentraciones de 160 mg/100 g en base seca, siendo este compuesto al que se le relaciona la capacidad antioxidante de la cáscara.



**Figura 1.5** Estructura química de la Galocatequina, principal compuesto antioxidante de la cáscara de plátano.

Fuente: Someya et al. (2002).

La cáscara de plátano maduro también contiene otros compuestos tales como las antocianinas (delfinidina y cianidina) y catecolaminas. Así mismo, la cáscara de plátano contiene carotenoides, como el  $\beta$ -caroteno,  $\alpha$ -caroteno y diferentes xantofilas, estas han sido cuantificadas en un rango de 300-400  $\mu$ g de equivalentes de luteína/100 g, así mismo se han identificado esteroides y triterpenos, como el  $\beta$ -sitosterol, stigmasterol, campesterol, cicloeucalenol, cicloartenol y cicloartanol 24-metileno (Blasco y López, 2014).

El  $\beta$ -caroteno es el principal precursor de la vitamina A, la cual es el problema dietario más común que afecta a niños a nivel mundial. El Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF) ha estimado que mejorar el consumo de vitamina A podría prevenir la muerte anual de 2 millones de niños entre 1 y 4 años. La mejora del consumo de vitamina A mediante estudios elaborados por McLaren & Frigg en el 2001 mostró una disminución en la mortalidad de los niños en un 23%, por lo que la cáscara de plátano juega un papel importante en la salud al identificar que es rico en sustancias precursoras de la vitamina A, así como en otros carotenoides, además de que es un fruto que se encuentra presente tanto en países en desarrollo como en países desarrollados.

La cáscara de plátano tiene un alto contenido de fibra dietética (50 g/100g) por lo que es una buena fuente de este compuesto, se ha determinado que la maduración del plátano muestra un impacto positivo en la composición de fibra de la cáscara, compuesta principalmente de celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina, diversos estudios epidemiológicos han demostrado que las dietas con una ingesta



disminuida de fibra están relacionadas con la aparición de ciertas patologías como el cáncer de colon y la aterosclerosis; la fibra dietética ha cobrado interés en los últimos años debido a los efectos benéficos que presenta para la salud ya que ayuda a la reducción del colesterol en la sangre y desarrollo de la flora intestinal, mejora el control de la glucemia y la sensibilidad a la insulina en los individuos diabéticos, facilitando la pérdida de peso por lo que actualmente, es uno de los principales ingredientes en alimentos funcionales y se está incorporando progresivamente a todo tipo de alimentos y bebidas. En los últimos años, se han realizado estudios sobre la flor de la platanera, en los que se ha observado una alta presencia de fibra (lignina, celulosa y hemicelulosa) así como de minerales (potasio, sodio y calcio).

La cáscara de plátano es rica en aminoácidos esenciales siendo encontrados la leucina, valina, fenilalanina y treonina. La leucina se muestra promisoría en el ámbito de la regulación del metabolismo, ya que mejora la glucosa y la homeostasis de la insulina mediante la estabilización de los niveles de glucosa en sangre (Blasco y López, 2014).

La cáscara de plátano posee ácidos grasos poliinsaturados, que forman de un 2.2-10.9% del contenido lipídico total, teniendo ácidos grasos esenciales como el ácido linoleico y ácido  $\alpha$ -linolénico. Se recomienda el consumo de estos ácidos durante el embarazo, lactancia, cáncer, enfermedades oculares asociadas a la edad y Alzheimer, así como para las enfermedades cardiovasculares ya que en base a un estudio realizado en hombres y mujeres por Leitzman en el Instituto Nacional de Cáncer in Bethesda, Maryland se observó que aquellas mujeres que consumen un promedio de 1.4 g diarios de ácido  $\alpha$ -linolénico tienen la mitad del riesgo de morir por un ataque al corazón que aquellas mujeres que consumieron 0.7 g al día; para los hombres solo un 11% mostró un menor riesgo a desarrollar enfermedades coronarias en comparación con aquellos que consumieron una cantidad menor a 1.1 g al día.

#### **1.2.6. Antecedentes del cultivo de plátano en El Salvador.**

El plátano (*Musa sp.*) es un cultivo de mucha importancia en el trópico americano y en otras zonas tropicales del mundo. Es un cultivo de amplia distribución por su adaptación, tanto en los trópicos como subtrópicos. Sin embargo, las mayores plantaciones comerciales se encuentran en los trópicos húmedos.

En El Salvador, el área sembrada de plátano se estima en 1960 hectáreas; con una producción de 24,792,727 kilogramos de frutas, lo cual no satisface la demanda interna, teniendo que importar en el año 2000, un total de 15,003,780 kg, por un valor aproximado de \$2,469,333. Los precios a nivel de mayorista y minorista se mantienen prácticamente constantes todo el año, excepto en el mes de abril que experimentan precios más altos (CENTA, 2002).

La oferta nacional de plátano está constituida por la producción nacional, la cual está en función de la superficie cultivada y de la productividad. En El Salvador, la producción de plátanos se concentra en Ahuachapán y Sonsonate, las cuales ocupan el 50% de la superficie cultivada, donde los resultados en productividad son mayores al promedio nacional. La mayor productividad ha originado impactos positivos, pasando de 394,809.76 quintales durante 1995/1996 a 1,446,000.00 quintales en el ciclo 2000/2001. La producción durante el período en análisis muestra una tendencia creciente equivalente al 18% anual. Sin embargo, también ha experimentado disminuciones, particularmente en los ciclos 1996/97 y 1999/2000. La primera disminución fue producto de la reducción de la superficie cultivada, y la segunda por el Huracán Mitch.

Las importaciones de plátanos la realizan alrededor de 52 personas, que operan en las tres principales plazas del país, La Tiendona, en San Salvador, mercado La Terminal, en Santa Ana y en la ciudad de San Miguel. En los puntos fronterizos de La Hachadura y El Amatillo, se tiene la mayor afluencia de importadores, por La Hachadura ingresan un promedio de 10 camiones por día los cuales transportan un volumen promedio de 9 toneladas métricas equivalente a unas 30,000 unidades. Por El Amatillo, ingresan 3 camiones cada dos o tres días a la semana.

El Salvador históricamente ha sido un país deficitario de plátano; el saldo de la balanza comercial de plátano ha mostrado una fuerte tendencia negativa, incrementándose aún más a partir del año 1998. Hasta el año 2000 este significó US \$7,740.46 miles de dólares, cifra superior a la de 1995, donde significaron US \$501.70 miles de dólares.

El precio al productor de plátano en finca muestra diferencias de un lugar de producción a otro, los cuales están en función de las calidades y formas de comercialización. En el sector de Garita Palmera en el departamento de Ahuachapán oscila entre US \$5.71 por cada ciento de primera y \$3.43 por ciento el de segunda. En Lempa Acahuapa en el departamento de San Vicente, los precios varían de US \$6.85 por ciento el de primera y US \$5.71 por ciento el pequeño. En las áreas de los departamentos de Usulután y La Paz los precios son similares a los obtenidos en Lempa Acahuapa. En Atiocoyo departamento de La Libertad son levemente superiores, los que oscilan entre US \$6.93 y US \$5.40.

De acuerdo a la investigación en las plazas de San Salvador, San Miguel, Santa Ana, Sonsonate, Nueva San Salvador, Usulután, San Vicente y Zacatecoluca, los precios a nivel mayoristas se comportan muy similares, los cuales oscilan entre US \$8.0 y US \$9.14; la excepción se presenta en Sonsonate donde los precios se ubican en un 25% por debajo de las otras plazas. Es de mencionar que el Mercado La Tiendona es la que rige los precios al mayorista, a pesar de no ser el centro de acopio de plátano. La producción y la importación no se concentran en La Tiendona,

sino que los importadores llegan a las principales plazas principalmente en Zacatecoluca, Usulután, Nueva San Salvador; o bien en las principales plazas hay importadores que al mismo tiempo son mayoristas tal como se presenta en San Salvador, Santa Ana, San Miguel y Santa Rosa de Lima. En Sonsonate y San Vicente no se identificaron importadores, solamente una mayorista que consume plátano nacional quien maneja precios de entre US \$8.0 y US \$9.14 (Federación de Asociaciones de Regantes de El Salvador [FEDARES], 2002).

### **1.2.7. Situación actual de la producción, comercio y aprovechamiento del cultivo del plátano en El Salvador.**

En El Salvador, el área estimada de siembra de este cultivo es de aproximadamente 3,574 manzanas, con una producción de 78,000 Tm de frutas, lo cual no satisface la demanda interna ya que para 2007 se tuvo que importar 34,717 Tm representando una fuga de divisas de (U.S. \$3,005,082) (Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal “Enrique Álvarez Córdova” [CENTA], 2010).

La demanda de plátano en El Salvador es de dos tipos: consumo fresco y consumo de materia prima, para la elaboración de Snack en empresas como Industrias DIANA y BocaDeli; y artesanales realizado por grupos familiares o pequeños empresarios cuya producción la destinan principalmente a las ferias de los pueblos en el interior del país (FEDARES, 2002).

Todas las actividades realizadas en el establecimiento, manejo agronómico, fertilización, riego y control de plagas del plátano, inciden en la comercialización. Si esta es eficiente, todo valió la pena, si fuese lo contrario, todo fue un fracaso.

Algunos parámetros que se deben considerar para efectuar un eficiente proceso de comercialización son (CENTA, 2002):

- a) Consistencia firme.
- b) Color brillante.
- c) Libre de abolladuras y golpes.
- d) Buen estado de maduración.
- e) Buen sabor (dulce).
- f) Clasificado según tamaño.

Características del mercado de plátanos:

- a) Mercado nacional:
  - i. Gran demanda.
  - ii. Cercanía de los mercados.
  - iii. Factibilidad de incrementar producción.
  - iv. Factibilidad de disminuir las importaciones.

- b) Estacionalidad: Mejores precios marzo – abril y julio – agosto.
- c) Mercados internacionales:
  - i. No existen restricciones de plagas.
  - ii. El tratado con México impone 20% de impuestos.
- d) Importación: Se requiere certificado fitosanitario.

La producción y comercio de plátano en El Salvador genera una gran cantidad de residuos orgánicos en las plantaciones agrícolas, mercados, establecimientos alimenticios, hogares, etc. Y estos al no ser aprovechados de ninguna forma terminan en los depósitos de basura, lo que provoca una gran contaminación al mezclarse con otra clase de desechos cuando todavía tienen un valor de uso.

En vista de ello desde hace algunos años se han realizado investigaciones en el país para establecer formas de aprovechamiento de la biomasa residual platanera, como el uso de la cáscara y pulpa de plátano para la elaboración de suplementos alimenticios para consumo humano y animal. También la utilización de la cáscara de plátano y banano como material adsorbente para la eliminación de metales pesados en aguas contaminadas, los cuales han tenido resultados positivos en cuanto a la cantidad removida de metales pesados.

### **1.3. Definición de biosorción.**

La biosorción es un proceso fisicoquímico que incluye los fenómenos de adsorción y absorción de moléculas e iones. Este método poco convencional busca principalmente la remoción de metales pesados en aguas residuales provenientes del sector industrial, usando como sorbente diferentes materiales de origen biológico, tales como: algas, hongos, bacterias, cáscaras de frutas, productos agrícolas y algunos tipos de biopolímeros. Estos materiales son de bajo costo y se encuentran en gran abundancia en la naturaleza, además, su transformación a biosorbente no es un proceso costoso (Tejada Tovar, Villabona Ortiz y Garcés Jaraba, 2015).

La biosorción es una de las tecnologías más prometedoras para la retirada de metales tóxicos de las aguas residuales ya que, al tratarse de un proceso con características únicas, lo convierte en una alternativa potencial a los procesos convencionales, entre otras cuestiones, porque es un proceso generalmente rápido y que resulta muy interesante para la extracción de iones metálicos a bajas concentraciones de grandes volúmenes de agua (García, 2008).

#### **1.3.1. Mecanismos de biosorción.**

La necesidad de métodos económicos y efectivos para la eliminación de metales pesados ha tenido como resultado el desarrollo de nuevas tecnologías de separación, una de ellas es el proceso de biosorción.

El proceso de biosorción involucra una fase sólida (biomasa) y una fase líquida (agua) que contiene disueltos la sustancia de interés que será adsorbida (en este caso, los iones de los metales pesados). Para que el proceso de biosorción se pueda realizar con éxito, debe existir una gran afinidad entre los grupos funcionales de la biomasa y el contaminante, ya que este último debe ser atraído hacia el sólido y enlazado por diferentes mecanismos.

El fenómeno de biosorción de iones metálicos, usando materiales biológicos como adsorbentes, se puede realizar mediante diversos mecanismos fisicoquímicos y metabólicos en los cuales, el proceso de captación de los metales pesados puede diferir (Tejada Tovar et al., 2015).

Debido a la amplia gama de tipos de biomasa usada para la eliminación de los metales, los diferentes mecanismos de biosorción se han explicado en dos sentidos: un mecanismo basado exclusivamente en la captación pasiva de iones metálicos cuando se usa biomasa muerta (biosorción) y un mecanismo de transporte a través de la membrana celular que solo tiene lugar cuando se usan células vivas (bioacumulación).

La biosorción por microorganismos vivos abarca básicamente dos pasos: el primero consiste en una fijación rápida de los cationes por los grupos cargados negativamente en la superficie celular, el segundo es el enlace intracelular progresivo de los cationes, dependiendo del metabolismo de la célula.

En general, este mecanismo tiene varias etapas desde el primer contacto de las células con el contaminante:

- a) Desde la solución hasta la primera capa que rodea la pared celular.
- b) Desde la capa hasta la pared de la célula y su penetración a través de membranas.
- c) Desde la membrana celular a los puntos activos de enlace.
- d) Fases de enlace: complejación, adsorción y precipitación en la intramembrana.

La eliminación del metal de la solución puede ocurrir por la formación de un complejo en la superficie de la célula después de la interacción entre el metal y los grupos activos. La precipitación del metal puede ocurrir en la solución y en la superficie de la célula, puede ser dependiente del metabolismo de las células si en presencia de metales tóxicos, el microorganismo produce los compuestos que favorecen el proceso de la precipitación y puede ser independiente del metabolismo de las células, si ocurre después de una interacción química entre el metal y la superficie de la célula.

En cuanto al mecanismo de la biosorción usando biomásas inertes, existen muchos mecanismos que pueden explicar la fijación y la retención de los metales en el biosorbente utilizado (Driss Alami, 2010). Tres de los principales mecanismos son los siguientes (Aguirre, 2009):

### **I. Adsorción física.**

También conocida como fisisorción es la forma más simple de adsorción, y es debida a débiles fuerzas atractivas, generalmente fuerzas de Van der Waals. Es el fenómeno por el cual un compuesto químico se adhiere a una superficie, y en el que la especie adsorbida conserva su naturaleza química. La molécula adsorbida no está fija en un lugar específico de la superficie, sino más bien está libre de trasladarse dentro de la interfase, este tipo de adsorción predomina a bajas temperaturas.

En la adsorción física, las fuerzas que atraen a las moléculas a la superficie sólida del adsorbente son generalmente débiles, y el calor desprendido durante el proceso de adsorción es de 0.5 a 5 kcal/mol g. El equilibrio entre la superficie sólida y el adsorbato se alcanza generalmente con rapidez, siendo fácilmente reversible, debido a que los requerimientos de energía son muy pequeños.

Además, la adsorción física no depende de las irregularidades en la superficie del adsorbente. Este fenómeno superficial depende en mayor medida de la extensión o área superficial con la que cuenta el material adsorbente, ya que una mayor área superficial cuenta con un mayor número de sitios activos, los cuales son capaces de atraer a un mayor número de moléculas.

### **II. Adsorción química.**

Casi todos los sólidos tienen la propiedad de fijar o adsorber en su superficie las moléculas, átomos o iones que se encuentran a su alrededor. En la superficie de un material podemos encontrar átomos que presentan orbitales disponibles. El número y tipo de estos orbitales depende de las características y estructura del material adsorbente.

Cualquier átomo que tenga orbitales libres experimenta un conjunto de fuerzas no balanceadas. Esta situación conduce al fenómeno de energía libre superficial. Si alguna molécula con afinidad a estos orbitales libres se acerca lo suficiente, se produce un nuevo arreglo electrónico con el sistema, tal como se observa en una reacción química. El resultado es la fijación de la molécula en la superficie a través de una adsorción química o quimisorción. Algunas características de la quimisorción son:

- a) Hay especificidad, sólo algunos sitios superficiales adsorben ciertas moléculas.

- b) Hay una interacción de los estados electrónicos del adsorbato y del adsorbente, lo que se traduce en la formación de un enlace químico.
- c) Como consecuencia de la reacción química superficial (rompimiento y formación de enlaces) se desprende una cantidad elevada de calor.

### III. Intercambio iónico.

El intercambio iónico es una reacción química reversible, que tiene lugar cuando un ion de una disolución se intercambia por otro ion de igual signo que se encuentra unido a una partícula sólida inmóvil.

Los intercambiadores iónicos forman un grupo de materiales muy heterogéneo, cuya única característica común es que contienen una carga eléctrica fija capaz de enlazar iones de carga opuesta.

Los intercambiadores iónicos son matrices sólidas que contienen sitios activos con carga electrostática, positiva o negativa, neutralizada por un ion de carga opuesta. En estos sitios activos tiene lugar la reacción de intercambio iónico.

A medida que la disolución está en contacto con el material, los iones presentes en dicha disolución desplazan a los que estaban originalmente en los sitios activos. La eficiencia de este proceso depende factores como la afinidad del material por un ion en particular, el pH de la disolución si el grupo activo tiene carácter ácido o básico, la concentración de iones o la temperatura.

Para que se dé el intercambio iónico, los iones deben moverse de la disolución al material y viceversa, este movimiento se conoce como proceso de difusión. La difusión de un ion está en función de su dimensión, carga electrostática, temperatura y por la estructura y tamaño de poro de la matriz. El proceso de difusión tiene lugar entre zonas de distinta concentración de iones, del más concentrado al menos concentrado, hasta que se alcance así un equilibrio dinámico.

Los intercambiadores iónicos poseen los siguientes parámetros:

- a) **Capacidad de intercambio:** se define como la cantidad de iones que un material puede intercambiar en determinadas condiciones experimentales.
- b) **Capacidad específica teórica:** se denomina así al número máximo de sitios activos del intercambiador por gramo. Este valor suele ser mayor que la capacidad de intercambio, ya que no todos los sitios activos son accesibles a los iones en disolución.
- c) **Selectividad:** propiedad de los intercambiadores iónicos por la que un material muestra mayor afinidad por un ion que por otro. La selectividad depende de las interacciones electrostáticas que se establezcan entre el ion

y el intercambiador. La regla principal es que un intercambiador preferirá aquellos iones con los que forme los enlaces más fuertes.

### **1.3.2. Parámetros que influyen en el proceso de biosorción.**

Como cualquier fenómeno, la biosorción se ve afectada por una serie de factores que pueden favorecerla o limitarla y que podemos centrar en torno a tres ejes principales (Driss Alami, 2010):

- a) Factores internos del sistema adsorbente-adsorbato, como la composición fisicoquímica del adsorbente y adsorbato que determina automáticamente el mecanismo de la adsorción, la cantidad y la concentración de ambos.
- b) Factores externos al sistema adsorbente-adsorbato, como el pretratamiento, el tiempo de contacto, el sistema de contacto, en discontinuo (reactor tipo batch) o en continuo (filtros tipo columna); donde en el primer caso viene afectado por la velocidad de agitación y en el segundo por el caudal del agua a tratar, la temperatura del medio, la composición de la solución problema que aparte del adsorbato puede tener otros componentes que pueden interferir en la adsorción.
- c) El pH es un factor común en ambos casos porque tanto el adsorbente y el adsorbato como el resto de los componentes que pueden acompañar el adsorbato participan de una manera directa o indirecta en la modificación de pH que finalmente influye en la adsorción.

#### **A. Factores internos.**

##### **i. Composición fisicoquímica del adsorbente y adsorbato.**

Esta composición no solamente influye en la adsorción sino en el tipo de mecanismo de la misma; un adsorbente poroso ofrece más superficie y una variedad de poros para adsorber varios tipos de adsorbatos. Sin embargo, si se trata de un adsorbente menos poroso y su superficie tiene grupos funcionales, en este caso las interacciones del adsorbente con el adsorbato no son de tipo físico ya que pueden dominar otros mecanismos como el intercambio iónico o la complejación. Muchos trabajos de investigación recurren a técnicas analíticas para determinar la composición química de la biomasa como la técnica de Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) y espectroscopia de infrarrojo (IR).

##### **ii. Concentración del adsorbente y adsorbato.**

Tanto la concentración del adsorbato como la cantidad del adsorbente influyen de manera directa en la eficacia de la adsorción. El aumento de concentración de metales en una solución a tratar aumenta la capacidad de adsorción debido al gradiente de concentración del metal. Un aumento en la cantidad del adsorbente o



la biomasa empleada para eliminar cualquier tipo de contaminante provoca un aumento en la eficacia de la eliminación, ya que el adsorbente ofrece más poros si es un material poroso o en general más superficie de contacto (Driss Alami, 2010).

La clasificación de los poros de acuerdo a su disponibilidad a un fluido externo son los siguientes (Villanueva Carrillo, 2017):

**Poros cerrados:** totalmente aislados de sus vecinos. Influencian propiedades macroscópicas como la densidad, fortaleza mecánica y conductividad térmica, pero son inactivos en procesos como flujo de fluidos y adsorción de gases.

**Poros abiertos:** poseen canales continuos de comunicación con la superficie externa del material. Las geometrías más frecuentes de los poros son: poros cilíndricos, poros en forma de rendija o hendidura, espacios o huecos entre esferas de sólidos conectadas y poros en forma de botella de tinta (ink-bottle shaped).

En la Tabla 1.3 se presenta la clasificación del tamaño de poro y microporo propuesto por la IUPAC:

**Tabla 1.3** Clasificación del tamaño de poro y microporo.

<b>PORO</b>	
<b>Tipo de Poro</b>	<b>Diámetro de Poro, <math>D_p</math></b>
Microporo	$D_p \leq 2 \text{ nm}$
Mesoporo	$2 \text{ nm} \leq D_p \leq 50 \text{ nm}$
Macroporo	$D_p > 50 \text{ nm}$ (típicamente 200 a 2000 nm)
<b>MICROPORO</b>	
<b>Tipo de Poro</b>	<b>Diámetro de Poro, <math>D_p</math></b>
Ultramicroporo	$D_p \leq 0.7 \text{ nm}$
Supermicroporo	$0.7 \text{ nm} \leq D_p \leq 2 \text{ nm}$

Fuente: Villanueva Carrillo, (2017).

Los materiales porosos encuentran una amplia difusión en la naturaleza y un empleo extensivo en la industria. Las industrias de proceso emplean catalizadores, filtros y adsorbentes porosos, tales como sílica gel, carbón activado y zeolitas. La variedad de formas y tamaños de poros es tan grande como los tipos y orígenes de los materiales porosos. Los tamaños van desde espacios comparativamente grandes y fácilmente visibles hasta grietas de dimensiones moleculares. Sin embargo, la mayoría de los poros tienen formas irregulares para las cuales no hay una descripción geométrica simple. Las propiedades físicas de todos los materiales dependen fuertemente del número, tamaño y a menudo, de la forma de sus poros (Aguirre, 2009).

## **B. Factores externos.**

### **i. Pretratamiento del adsorbente.**

El pretratamiento del adsorbente es otro parámetro que en la mayoría de los casos tiene como objetivo mejorar y aumentar la capacidad de adsorción. El pretratamiento puede ser un lavado con agua, con ácidos o con bases, o aumento de temperatura (Driss Alami, 2010).

### **ii. Temperatura.**

El efecto de la temperatura está relacionado con el tipo de adsorción que tiene lugar tras la reacción del metal con la biomasa. Cuando el proceso de la adsorción es físico, es favorable a bajas temperaturas y cuando el proceso es químico, es favorable a temperaturas altas (Driss Alami, 2010).

Un aumento elevado de la temperatura puede causar un cambio en la textura del sorbente y un deterioro del material que desembocan en una pérdida de capacidad de sorción (Tejada Tovar et al., 2015).

### **iii. Interferencia de algunos metales en la adsorción de otros.**

La biosorción se utiliza principalmente para tratar aguas residuales en las que suelen estar presentes más de un tipo de iones de metales. La eliminación de un ion metálico puede verse influenciada por la presencia de otros iones de metales por lo que se puede hablar de competición del conjunto de metales para enlazar en los sitios activos ofrecidos por el adsorbente. La inhibición o el favorecimiento de la biosorción de un metal por otros depende de las condiciones del agua a tratar, de la concentración de los metales y de la reacción de la biomasa frente al conjunto de los iones metálicos (Driss Alami, 2010).

### **iv. Sistema de contacto.**

Para estudiar la adsorción de un compuesto químico en una disolución, se pueden utilizar dos técnicas de laboratorio: experimentos en batch (sistema discontinuo) o experimentos con columnas (sistema continuo). Los experimentos en batch consisten en mezclar y agitar una cantidad determinada de compuesto a adsorber con disoluciones a diferentes concentraciones del soluto estudiado. En la mayoría de los trabajos de investigación se trabaja en batch debido a la rapidez del proceso a la hora de sacar resultados y poder trabajar a escala muy reducida en cuanto al uso tanto del adsorbente como del adsorbato. Los experimentos en discontinuo permiten obtener los valores óptimos de los distintos parámetros que influyen en el proceso de adsorción y una vez obtenidos estos valores, en el proceso continuo se estudian las mejores condiciones de funcionamiento del proceso real (Driss Alami, 2010).

### C. Efecto del pH (Tejada Tovar et al., 2015).

El pH de la solución acuosa es un importante parámetro que controla los procesos de adsorción de metales en diferentes adsorbentes, debido al hecho, de que los iones hidrógeno se constituyen en un adsorbato fuertemente competitivo. La adsorción de iones metálicos depende tanto de la naturaleza de la superficie adsorbente como de la distribución de las especies químicas del metal en la solución acuosa. El valor del pH de la fase acuosa es el factor más importante tanto en la adsorción de cationes como de aniones, siendo el efecto distinto en ambos casos. Así, mientras que la adsorción de cationes suele estar favorecida para valores de pH superiores a 4.5, la adsorción de aniones prefiere un valor bajo de pH, entre 1.5 y 4.

#### 1.3.3. Ventajas y desventajas de la biosorción.

En la Tabla 1.4 se presentan las ventajas y desventajas utilizando biomasa muerta y biomasa viva en el proceso de adsorción.

**Tabla 1.4** Principales ventajas y desventajas del uso de biomasa viva y muerta en el proceso de adsorción.

	Ventajas	Desventajas
<b>Biomasa muerta</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ No necesita nutrientes.</li> <li>❖ Procesos no gobernados por limitaciones metabólicas.</li> <li>❖ La selección de la técnica de inmovilización no está gobernada por limitaciones de toxicidad.</li> <li>❖ Los metales pueden ser liberados fácilmente y recuperados.</li> <li>❖ Procesos rápidos y eficientes en la retirada de metales, la biomasa se comporta como un intercambiador de iones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Rápida saturación.</li> <li>❖ El secuestro por adsorción es sensible al pH.</li> <li>❖ El estado de valencia del metal no puede ser alterado biológicamente, por ejemplo, para dar formas menos solubles.</li> <li>❖ Las especies organometálicas no son susceptibles de degradación.</li> <li>❖ La mejora de estos procesos biológicos es limitada ya que las células no efectúan un metabolismo; la producción de agentes adsorbentes ocurre durante la etapa de crecimiento.</li> </ul>

continúa

**Tabla 1.4** Principales ventajas y desventajas del uso de biomasa viva y muerta en el proceso de adsorción (continuación).

	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Biomasa viva</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Las células pueden llegar a saturarse, el sistema se auto restablece debido al crecimiento.</li> <li>❖ Los metales se depositan en un estado químico alterado.</li> <li>❖ Forma económica de lograr cambios en estado de valencia o degradar compuestos organometálicos.</li> <li>❖ Se pueden mejorar las cepas por medio del aislamiento de mutantes o la manipulación genética, debido a que esta es una propiedad microbiana más que un producto bajo explotación.</li> <li>❖ Se pueden emplear dos o más organismos de manera sinérgica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Se necesitan nutrientes para el crecimiento.</li> <li>❖ Es necesario alimentar los flujos bajo condiciones fisiológicamente permisibles.</li> <li>❖ Sólo se pueden tratar los metales a bajas concentraciones.</li> <li>❖ Los productos metabólicos pueden formar complejos con los metales, impidiendo la precipitación.</li> <li>❖ La recuperación de los metales por desorción es limitada, debido a que pueden formar uniones intracelulares.</li> <li>❖ El modelado de un sistema no definido representa grandes dificultades matemáticas.</li> <li>❖ La deposición de los productos metabólicos y los nutrientes no consumidos.</li> </ul>

Fuente: Tejada Tovar et al. (2015).

#### **1.3.4. Modelos teóricos de la adsorción.**

Para el tratamiento de los datos experimentales obtenidos en las condiciones de equilibrio, y el análisis de los procesos de adsorción, los datos de equilibrio se expresan normalmente como isotermas de adsorción, relacionando analíticamente la cantidad de un determinado componente adsorbido en una interfase con la concentración de este componente en el seno de la fase.

Además, es necesario poder establecer la velocidad de la adsorción para alcanzar la separación. Los modelos cinéticos permiten darle explicación al fenómeno de adsorción dentro de un proceso específico, estableciendo la velocidad con la cual los contaminantes (iones metálicos) son retirados del medio acuoso (Tejada Tovar et al., 2015).

##### **A. Isotermas de adsorción.**

Los detalles del equilibrio del proceso, generalmente conocidos como isotermas de adsorción, describen el comportamiento de la interacción entre adsorbato-

adsorbente y proveen información sobre la capacidad del adsorbente estudiado (Figueroa, Moreno y Hormaza, 2015).

El análisis del ajuste de los datos experimentales obtenidos en el proceso a los distintos modelos de isothermas existentes, permiten estimar el grado de purificación que puede ser alcanzado, la cantidad de adsorbente requerido, y la sensibilidad del proceso respecto a la concentración del producto (Tejada Tovar et al., 2015).

Los principales modelos de isothermas estudiados en los procesos de adsorción de metales pesados usando biomazas como material adsorbente son los siguientes (Figueroa et al., 2015):

- i. **Isoterma de Langmuir.** Es un modelo teórico válido para la adsorción en una monocapa sobre una superficie completamente homogénea con un número finito de sitios idénticos y específicos de adsorción y con una interacción despreciable entre las moléculas. Este modelo describe el equilibrio entre las fases sólido líquido de los sistemas como un equilibrio químico reversible entre especies. La ecuación de Langmuir es la siguiente:

$$q = \frac{q_{max}K_L C_f}{1+K_L C_f} \quad (\text{Ecuación 1.2})$$

Donde:

q: capacidad de adsorción (mg/g).

$q_{max}$ : constante que denota la capacidad máxima de adsorción (mg/g).

$K_L$ : afinidad del adsorbato por el adsorbente (L/mg).

$C_f$ : concentración de equilibrio (mg/L).

- ii. **Isoterma de Freundlich.** Es una ecuación empírica que no asume homogeneidad en la energía de los sitios en la superficie y sin límite en la carga máxima de adsorción, y muestra una consistencia de una distribución exponencial de centros activos característicos de una superficie heterogénea. La ecuación de Freundlich es la siguiente:

$$q = K_F C_f^{\frac{1}{n}} \quad (\text{Ecuación 1.3})$$

Donde:

q: capacidad de adsorción (mg/g).

$K_F$ : parámetro de la ecuación relacionado con la afinidad del biosorbente por los iones metálicos ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})^{-1/n}$ ).

$C_f$ : concentración de equilibrio (mg/L).

n: parámetro de la ecuación congruente con la intensidad de la adsorción.

## B. Cinética de adsorción.

En la adsorción, como proceso dependiente del tiempo, es necesario conocer su rapidez para el diseño y evaluación de adsorbentes. Para representar los modelos cinéticos de adsorción se emplean dos criterios: la concentración de la solución o la carga en el adsorbente (Figuroa et al., 2015).

Los modelos cinéticos que describen el mecanismo por el que transcurre el proceso de biosorción son los siguientes:

- i. **Modelo de pseudo-primer orden.** También conocido como modelo de Lagergren, es uno de los modelos más sencillos y de los más aplicados para el estudio de la cinética de adsorción de contaminantes en solución acuosa (Driss Alami, 2010).

La expresión matemática correspondiente a la cinética de primer orden reversible se basa en la suposición de que a cada ion metálico se le asigna un sitio de adsorción del material adsorbente, lo cual en términos de velocidad de reacción se expresa como (Pinzón Bedoya y Vera Villamizar, 2009):

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (\text{Ecuación 1.4})$$

Donde:

$q_e$ : capacidad de adsorción en el equilibrio (mg/g).

$q_t$ : capacidad de adsorción en tiempo  $t$  (mg/g).

$k_1$ : constante de la velocidad de la ecuación de pseudo-primer orden ( $\text{min}^{-1}$ ).

Por integración de esta expresión entre las condiciones límite  $t=0$  con  $q_t=0$  y  $t=t$  con  $q_t=q_t$  se obtiene:

$$q_t = q_e(1 - e^{-tk_1}) \quad (\text{Ecuación 1.5})$$

- ii. **Modelo de pseudo-segundo orden.** Este modelo fue desarrollado por Ho y McKay y dado a conocer en 1999. En él se supone que el adsorbato se adsorbe en dos sitios activos de la biomasa. A partir de esta fecha, muchas más investigaciones han reportado un mejor ajuste de los datos experimentales obtenidos a este modelo, con coeficientes de correlación superiores a los de los otros modelos ensayados. En este caso, la ecuación de velocidad de la cinética de adsorción se expresa como (Pinzón Bedoya et al., 2009):

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (\text{Ecuación 1.6})$$

Donde:

$q_e$ : concentración del soluto fijada por adsorción en el equilibrio (mg/g).

$q_t$ : concentración de soluto fijada por adsorción en la superficie del adsorbente en un tiempo  $t$  (mg/g).

$k_2$ : constante de la ecuación de pseudo-segundo orden ( $g \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$ ).

Por integración de esta ecuación entre las condiciones límite  $t=0$  con  $q_t=0$  y  $t=t$  con  $q_t=q_t$  se puede obtener:

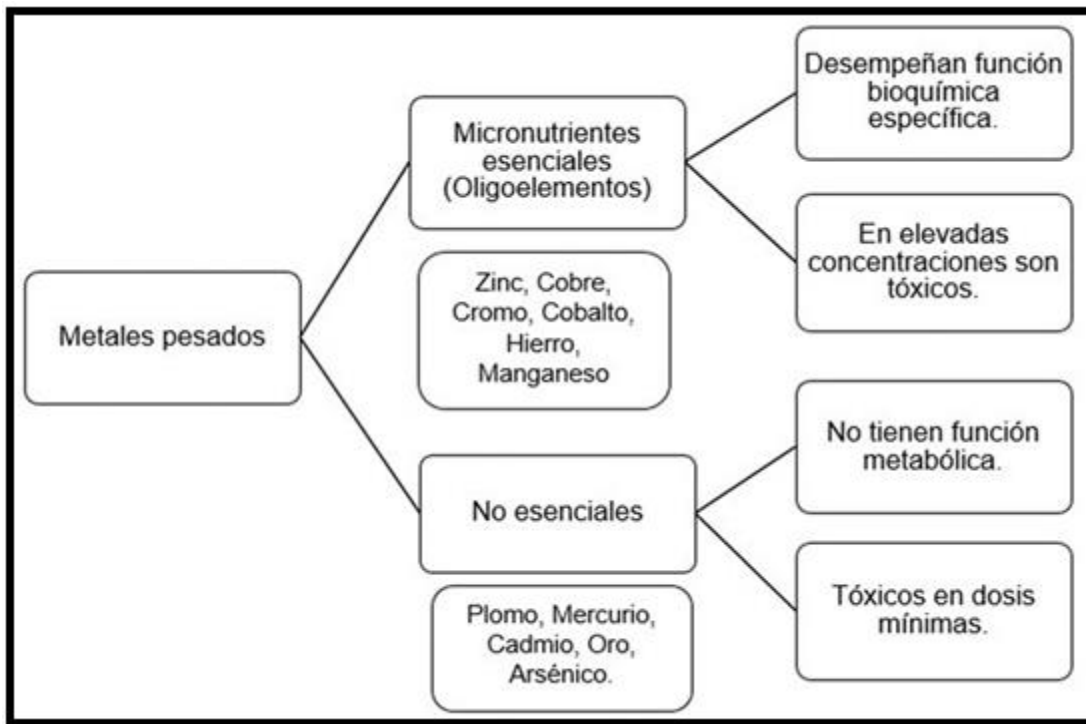
$$q_t = \frac{t}{\frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}} \quad (\text{Ecuación 1.7})$$

#### 1.4. Características y comportamiento de metales pesados.

Los metales pesados son componentes naturales de la corteza terrestre es por ello que no pueden ser degradados ni destruidos en su totalidad debido a que tienen un papel importante en los organismos al ser parte fundamental de sus funciones bioquímicas y fisiológicas, es decir, son esenciales para mantener el metabolismo del cuerpo humano.

Dentro de la química del agua se conoce como metales pesados a aquellos con número atómico mayor a 20, excepto los alcalinos, alcalinotérreos, lantánidos y actínidos. Cabe mencionar que junto a estos hay otros elementos químicos que, aunque son metales ligeros o bien no metales se suelen englobar con ellos porque presentan orígenes y comportamientos asociados siendo el caso del Arsénico, Boro, Bario y Selenio.

Los metales pesados se pueden clasificar en dos grupos los cuales se presentan en la Figura 1.6. Primeramente, los llamados micronutrientes esenciales que se encuentran en pequeña cantidad en la materia viva, desempeñando una función bioquímica específica pero que si se elevan las concentraciones resultan tóxicos. Además, la disponibilidad baja o muy baja de los oligoelementos producen un déficit en la función que desempeña llegando a provocar la muerte; y si superan los valores óptimos la funcionalidad se pierde por el efecto tóxico del exceso, que de igual manera provoca la muerte del organismo si la ingesta supera la dosis letal. Por otro lado, aquellos metales que no tienen funciones metabólicas conocidas y son tóxicos en condiciones mínimas (Sánchez Pina, 2014).



**Figura 1.6** Esquema sobre la clasificación de los metales pesados según su funcionalidad en la materia viva.

Los metales pesados tienen varias características, pero para establecer que un elemento químico pertenece a ellos se basa en el criterio del peso atómico, es decir, si un elemento químico se encuentra entre 63.55 (Cu) y 200.59 (Hg); otra manera se refiere a los metales de densidad entre 4 g/cm<sup>3</sup> hasta 7 g/cm<sup>3</sup> y también hay otra clasificación referida al número atómico. Este grupo lo constituyen aproximadamente 40 elementos de la tabla periódica y a pesar que muchos de ellos son esenciales para el crecimiento también se han reportado efectos tóxicos sobre las células principalmente como resultado de su capacidad para alterar o desnaturalizar las proteínas.

Los metales pesados se caracterizan por (Abud, Trujillo y Navarro, 2013):

- i. No son biodegradables.
- ii. Tienen tendencia a bioacumularse en los organismos provocando trastornos y en ocasiones la muerte.
- iii. Son altamente tóxicos.
- iv. Tienen efectos carcinogénicos.

La toxicidad de estos elementos depende de una serie de factores descritos a continuación (Sánchez Pina, 2014):



- a) Forma química del metal.** La disponibilidad y/o toxicidad de los metales para los organismos depende de la forma química en que está presente, por ejemplo, para los metales divalentes como Cobre, Cadmio y Zinc la toxicidad de los iones metálicos libres es generalmente superior a la de sus complejos. En el caso de elementos como Mercurio y Estaño, que forman preferentemente complejos orgánicos, estos últimos generalmente muestran efectos tóxicos superiores a los de los compuestos inorgánicos. La toxicidad de otros elementos también depende, entre otras causas, de su estado de oxidación; así, por ejemplo, el  $\text{Cr}^{6+}$  es generalmente más tóxico que el  $\text{Cr}^{3+}$ .
- b) Factores externos.** Son los que pueden influir en la toxicidad y que están relacionados con la biodisponibilidad de una sustancia con: pH, temperatura, oxígeno disuelto, solubilidad, entre otros.
- c) Dosis y tiempo de exposición.** En este factor se pueden distinguir efectos:
- i. Efectos tóxicos agudos que son el resultado de una exposición a cantidades relativamente elevadas del tóxico en una dosis única. Son bastantes dramáticos los efectos que se manifiestan tras el contacto del tóxico con el cuerpo llegando hasta causar la muerte.
  - ii. Efectos tóxicos crónicos siendo el resultado de una exposición frecuente o infrecuente a niveles bajos del tóxico durante largo período de tiempo. Son menos obvios, pero a largo plazo son letales o subletales.
- d) Especie biológica expuesta.** Las diferentes especies difieren en su susceptibilidad a distintas sustancias. Estas diferencias pueden deberse a múltiples factores entre los que se encuentran las velocidades y modelos de metabolismo, diferencias genéticas, diferencias en la dieta, edad, entre otros.

#### **1.4.1. Fuentes antrópicas de metales pesados en el medio ambiente.**

Cierta parte de los metales pesados presentes en el medio ambiente están por causas naturales como lo son la actividad volcánica, la erosión y los incendios forestales. A pesar de ello, los seres humanos en las actividades diarias son la causa principal de contaminación medioambiental producida por los metales pesados realizando actividades agrícolas e industriales como por ejemplo operaciones mineras y de fundición, tratamientos electrolíticos, vertidos de aguas industriales, fabricación de plástico, pigmentos, baterías, uso de fertilizantes y pesticidas, entre otros (Díaz Rengifo, 2001).

En la Tabla 1.5 se muestran las principales fuentes antrópicas de metales pesados en el medio ambiente.

**Tabla 1.5** Principales fuentes antrópicas de metales pesados en el medio ambiente.

<b>Fuente</b>	<b>Porcentaje de contribución</b>
Cenizas de combustión	74 %
Desechos urbanos	9 %
Turba	6 %
Residuos metalúrgicos	6 %
Residuos de materia orgánica	3 %
Fertilizantes	2 %

Fuente: Díaz Rengifo, (2001).

Puesto que el tema de esta investigación es enfocado a un tratamiento de aguas contaminadas con metal pesado Cromo, es necesario que se profundice en cómo afecta este parámetro al medioambiente y la salud humana, tomando en cuenta las diferentes fuentes de exposición y las técnicas de eliminación de este contaminante en las aguas industriales.

#### **1.4.2. Generalidades del Cromo.**

El Cromo elemental (Cr) no se encuentra como tal en la naturaleza; el único mineral de cromo importante es la espinela, cromita o piedra de cromo hierro, que es cromito ferroso ( $\text{FeOCr}_2\text{O}_3$ ) y está ampliamente distribuida en la corteza terrestre (Cespón Romero, 2008). Algunas propiedades generales del Cromo como metal pesado se describen a continuación.

**Tabla 1.6** Propiedades generales del Cromo.

<b>Nombre</b>	Cromo
<b>Apariencia</b>	Elemento blanco azulado, muy duro
<b>Grupo</b>	VI B, Metales de transición
<b>Número atómico</b>	24
<b>Peso atómico</b>	51.996 g/gmol
<b>Densidad</b>	7.19 g/cm <sup>3</sup>
<b>Valencias</b>	+2,+3,+6
<b>Punto de fusión</b>	2130 K (1857 °C)
<b>Punto de ebullición</b>	2945 K (2200 °C)

Fuente: Cespón Romero, (2008).

El Cromo forma diferentes compuestos en distintos estados de oxidación los cuales se presentan en la siguiente Tabla 1.7 descritos de una manera breve.

**Tabla 1.7** Utilidad de los diferentes estados de oxidación del Cromo.

Estado de oxidación	Descripción y/o utilidad.
<b>Divalente (Cromosos) +2</b>	❖ Es básico, inestable y se oxida rápidamente al estado crómico, es por esta inestabilidad que se limita el uso de compuestos cromosos (Nordberg, 1998).
<b>Trivalente (Crómicos) +3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Estables y forman muchos compuestos con aplicaciones comerciales principalmente el óxido crómico, sulfato básico de Cromo (Nordberg, 1998).</li> <li>❖ Nutriente esencial para los seres humanos debido a que promueve la acción de la insulina (Palacios y América, 1997), y tiene también un papel importante en los factores de tolerancia a la glucosa (Galváo y Corey, 1987), es decir, ayuda al cuerpo a utilizar el azúcar, la grasa y las proteínas (ATDRS, 2006).</li> <li>❖ Se encuentra en la cromita, pero al entrar en contacto con el oxígeno del aire, se oxida y se convierte en Cromo hexavalente (Nordberg, 1998).</li> </ul>
<b>Hexavalente (Cromatos) +6</b>	❖ Tiene mayor aplicación industrial por sus propiedades ácidas y oxidantes que reducen con facilidad al estado +3. Dentro de los cromatos los más importantes son dicromato sódico, dicromato potásico y trióxido de Cromo, la mayoría de cromatos se obtienen industrialmente utilizando dicromato como fuente Cromo hexavalente. Capacidad para formar sales muy coloreadas e insolubles (Nordberg, 1998).

#### **A. Compuestos de Cromo (III) (Nordberg, 1998).**

El óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , u óxido crómico), se obtiene por reducción del dicromato sódico, ya sea con carbón o con azufre. La reducción con azufre se emplea principalmente cuando el óxido crómico se va a utilizar como pigmento. Con fines metalúrgicos se utiliza habitualmente la reducción con carbón.

El material comercial suele ser sulfato crómico básico  $[\text{Cr}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_5]\text{SO}_4$ , que se elabora a partir del dicromato sódico por reducción con carbohidratos en presencia de ácido sulfúrico, en una reacción muy exotérmica. La reducción de una solución de dicromato sódico con dióxido de azufre produce sulfato crómico básico, que se emplea en el curtido del cuero; el precio del material depende del contenido de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , que oscila entre el 20,5 y el 25 %.

## **B. Compuestos de Cromo (VI) (Nordberg, 1998).**

El dicromato sódico puede convertirse en su sal anhidra. Este es el punto de partida para la preparación de compuestos de cromo. El trióxido de cromo o anhídrido crómico, algunas veces denominado "ácido crómico", aunque el verdadero ácido crómico no puede aislarse de una solución, se obtiene tratando una solución concentrada de un dicromato con un exceso de ácido sulfúrico concentrado. Es un violento oxidante y, en solución, constituye el principal componente del cromado.

### **1.4.3. Fuente de exposición al Cromo.**

Según el Dr. Luiz Augusto Cassanha Galvão en el manual Serie de Vigilancia 5 menciona las fuentes de contaminación del Cromo haciendo énfasis en aquellas que son las relacionadas con el ambiente ocupacional, principalmente debido a la presencia del cromo en los polvos metálicos. Dichas fuentes de contaminación, según el ambiente de donde se originan son dos; primeramente, en el ambiente ocupacional, y por otro lado las del ambiente general que se detallan a continuación.

#### **I. Fuentes de contaminación en el ambiente ocupacional.**

Estas fuentes son también responsables en gran parte de la contaminación del ambiente general, lo que determinará en gran medida la exposición de la población por actividades ocupacionales. Dentro de estas fuentes se encuentran las siguientes:

- a) Minería:** Principalmente en actividades como la extracción de la cromita ( $\text{FeOCr}_2\text{O}_3$ ), la cual es la fuente más evidente y que puede causar las concentraciones más altas de polvo de cromo. Esta fuente no solo se exponen los mineros, sino también otros individuos no mineros que trabajan en las mismas instalaciones o lugares cercanos a esta.
- b) Industria:** Por sus características químicas y por los beneficios que brindan en la elaboración de múltiples productos, los compuestos del Cromo son utilizados principalmente en diversos procesos industriales con el objetivo de obtener protección por revestimiento de los metales, de fines estéticos y de decoración, de cambios de color en varios tipos de materiales; además es un importante agente en los procesos de curtido de pieles.

Las industrias que presentan mayor riesgo por la presencia del Cromo, según su rama o tipo son:

- a) Material refractario y cementera:** Empleo en la elaboración de materiales refractarios para procesos industriales a alta temperatura o para ambientes corrosivos, como por ejemplo en incineradores, hornos de cemento y fundición.

- b) Colorantes:** Se utiliza para manufactura de colorantes y pigmentos para la industria textil y fabricación de pinturas principalmente las anticorrosivas.
- c) Construcción:** Empleo en la conservación de la madera, fabricación de anticorrosivos, fabricación de vidrios.
- d) Curtiembre:** Empleado como uno de los métodos en el curtido de cuero.
- e) Galvanoplastia:** El uso de los compuestos del Cromo en la formación de recubrimientos para proteger otros materiales como en la galvanización, proceso en el cual se emplean soluciones de electrolitos fuertes de Cromo (dicromatos) que son reducidos a Cromo elemental por electrodeposición en un metal generalmente más barato.
- f) Material fotográfico.**
- g) Metalurgia** (producción de acero y otras aleaciones metálicas).
- h) Pinturas**, principalmente las anticorrosivas.

La contaminación por emisiones de Cromo (VI) a la atmósfera principalmente es responsabilidad de la actividad industrial de la producción de cromatos, que además de generar residuos sólidos que al no ser tratados adecuadamente se convierten en contaminantes potenciales del suelo y del agua. Las industrias de cromado y del curtido de pieles son las principales fuentes de contaminación del agua con Cromo. Siendo la primera industria en donde las partes cromadas son enjuagadas con agua, la cual se reemplaza con agua fresca al contaminarse con la solución de cromatos que se empleó en el proceso. Y por otro lado en el proceso de curtido de pieles, se obtiene Cromo (VI) como subproducto del proceso y junto con las sales de Cromo (III) que no son fijadas al colágeno son descargadas en aguas y suelos (Villanueva Carrillo, 2017).

## **II. Fuentes de contaminación en el ambiente general.**

Las fuentes importantes de contaminación de cromo son aquellas relacionadas con el ambiente ocupacional. Con el crecimiento de las actividades industriales, las fuentes de contaminación del medio por cromo y otros metales han aumentado considerablemente.

Existen varias fuentes bibliográficas que señalan cuál es el origen del Cromo en el ambiente, pero la más aceptada es la que menciona la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) y se muestran a continuación:

- a) Aire.** Cada individuo está expuesto a niveles muy bajos de cromo al respirar aire que lo contiene. El cromo se puede liberar al aire desde industrias que usan o manufacturan cromo, sitios de desechos peligrosos que contienen cromo, humo de cigarrillo. El aire rural o suburbano generalmente contiene concentraciones de cromo más bajas que el aire urbano, menos de 10 ng/m<sup>3</sup> en áreas rurales y de 0 a 30 ng/m<sup>3</sup> en áreas urbanas. Como consecuencia

de fumar, la concentración de cromo dentro del cuerpo humano puede ser 10 a 400 veces más alta que al aire libre. En el aire del ámbito laboral un número alto de trabajadores están potencialmente expuestos al cromo. La probabilidad de exposición más alta ocurre en las industrias metalúrgicas y de curtido, en donde los trabajadores pueden estar expuestos a cantidades altas de cromo en el aire.

- b) Agua y suelo.** Ocasionalmente se detecta cromo en muestras de agua subterránea, agua potable o de suelo. La exposición al cromo puede ocurrir: bebiendo agua y bañándose en agua que contiene cromo. El acuífero está protegido por una capa superficial que se denomina acuitardo. Los depósitos arcillosos que habían sido considerados como impermeables y que por lo tanto representaban una protección a largo plazo para los acuíferos, no proporcionan tal protección. El transporte de contaminantes a través de dicho medio puede provocar serias alteraciones de los recursos de agua subterránea.
- c) Alimentos.** La población general tiene mayor probabilidad de exposición a niveles muy bajos de cromo en los alimentos que consumen. Niveles bajos de cromo (III) ocurren naturalmente en una variedad de alimentos tales como frutas, hortalizas, nueces, bebidas y carnes. La humedad de la tierra y de los sedimentos en equilibrio con el oxígeno atmosférico proporcionan las condiciones necesarias para que la reducción y la oxidación ocurran simultáneamente. Las especies de Cr(III) pueden ser oxidadas a Cr(VI) por compuestos oxidantes que existen en la tierra, como por ejemplo el dióxido de manganeso. Al mismo tiempo las especies de Cr(VI) pueden ser reducidas también a Cr(III) en presencia del óxido de manganeso reducido (MnO) y ácidos orgánicos presentes en la materia orgánica de la tierra. La reducción de Cr(VI) a Cr(III) en la tierra solo se producirá como resultado de una reducción en presencia de materia orgánica, hierro soluble (Fe II) o compuestos de sulfuro reducidos.

#### **1.4.4. Efectos del Cromo sobre el medio ambiente.**

Hay varias clases diferentes de Cromo que difieren de sus efectos sobre los organismos. El Cromo presente en el aire, suelo o agua, resulta de procesos naturales y actividades humanas. Las emisiones del mismo por chimeneas, sólidos y aguas industriales, pueden incrementar su contenido en el medio ambiente. La lluvia y la nieve ayudan a remover el Cromo presente en el aire, siendo el tiempo medio de permanencia en este, menor a 10 días. Los compuestos de Cromo soluble pueden permanecer por largo tiempo en el agua antes de sedimentar. Los peces no acumulan Cromo en su cuerpo aun estando en contacto con este por períodos prolongados.

La mayor parte del Cromo presente en el suelo, es insoluble en agua; solo pequeñísimas cantidades podrían disolverse, pero el movimiento del mismo, depende fundamentalmente de la forma en que este sea dispuesto (Garófalo y Ramírez, 2002).

A pesar de que los cultivos contienen sistemas para gestionar la toma de Cromo para que esta sea lo suficientemente baja como para no causar cáncer. Pero cuando la cantidad de Cromo en el suelo aumenta, esto puede aumentar las concentraciones en los cultivos. La acidificación del suelo puede también influir en la captación de Cromo por los cultivos. Las plantas usualmente absorben solo Cromo (III). Esta clase de Cromo probablemente es esencial, pero cuando las concentraciones exceden cierto valor, efectos negativos pueden ocurrir.

#### **1.4.5. Efectos del Cromo sobre la salud humana.**

Los efectos adversos del Cromo para la salud dependen, especialmente, del grado de valencia de este elemento en el momento de la exposición y de la solubilidad del compuesto. Las únicas formas de importancia en toxicología son el cromo VI y el cromo III las cuales presentan los efectos detallados a continuación (Aguilar Casas, Cordovez Wandurraga y Molina Montoya, 2010).

- a) **Cromo (III).** Puede causar irritación mecánica en los ojos y en tracto respiratorio. Si se presenta inhalación se presenta tos.
- b) **Cromo (VI).** El cromo hexavalente posee dos características que explican el grado de toxicidad. Primeramente, las membranas celulares son permeables al cromo VI, pero no al cromo III. Y por otro lado, se reduce a cromo III en el interior de las células, tanto de las mitocondrias como en el núcleo. Por dicha toxicidad produce los siguientes efectos en la salud humana:
  - i. ***Dermatitis.*** Los compuestos de Cr(VI) ocasionan tanto irritación cutánea como sensibilización. En la mayoría de los casos, la irritación desaparece rápidamente y no reincide. Así como también, cuando se encuentra como compuesto en los productos de la piel, puede causar reacciones alérgicas, por ejemplo, erupciones cutáneas, dermatitis, llagas en la piel. El carácter crónico de la dermatitis puede deberse al hecho de que el complejo antígeno anticuerpo que se forma al penetrar en la piel el Cr(VI) por medio de las glándulas sudoríparas, este se reduce a Cr(III) y este reacciona con proteínas formando dicho complejo, y este se elimina más lentamente que si la reacción tuviera lugar en la epidermis.
  - ii. ***Úlceras por cromo.*** Este tipo de lesiones era bastante frecuente como resultado de la exposición profesional a los compuestos de Cr(VI). Las úlceras se deben a la acción corrosiva del Cr(VI), que penetra en la piel a través de cortes y abrasiones. La lesión comienza como una pápula

indolora, habitualmente localizada en las manos, antebrazos y pies, que posteriormente se ulcera.

- iii. **Efectos respiratorios agudos.** Al ser respirado causa irritación de las mucosas, sistema respiratorio, la nariz y sangrado de esta, daños en los pulmones y síntomas de tipo asmático. A concentraciones elevadas, la aparición de estornudos, rinorrea, lesiones del tabique nasal y enrojecimiento de la garganta.
- iv. **Ulceración del tabique nasal.** Cuando la exposición a los compuestos de Cr (VI) son elevadas causan este efecto nocivo siendo resultado del depósito de partículas con Cr(VI) o pequeñas gotas de niebla en el tabique nasal, que producen úlceras en la parte cartilaginosa, seguidas en muchos casos de la perforación en el lugar de la úlcera. En estos casos, la costumbre de hurgarse la nariz puede favorecer la perforación.
- v. **Efectos en otros órganos.** Se ha descrito necrosis renal, malestar de estómago, hemorragia gastrointestinal grave debida a la ulceración de la mucosa intestinal, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, alteración del material genético. La ingesta de sales de este puede ocasionar lesiones graves, quemaduras en los ojos o incluso la muerte.
- vi. **Efectos cancerígenos.** De acuerdo con la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC) este compuesto junto con el Níquel es clasificado en el grupo 1 de elementos carcinógenos. Además de ellos, según lo establecido en la Norma 29 CFR 1910.1200 de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) Los compuestos de Cromo VI, compuestos de níquel y vapores de soldadura, se deben considerar carcinógenos potenciales.

Los trabajadores que por las actividades laborales se exponen a los cromatos tienen el riesgo que se produzca cáncer de pulmón, y también aumentar el riesgo de cáncer en los senos nasales y el tracto digestivo.

#### **1.4.6. Medidas de seguridad ante la exposición del Cromo (Nordberg, 1998).**

Desde el punto de vista técnico, la prevención de la exposición al cromo depende de un diseño adecuado de los procesos, de la existencia de sistemas de extracción adecuados y de la supresión de los polvos y nieblas que contengan cromo hexavalente. También son necesarias las medidas de control incorporadas, pues son las que requieren la menor actuación por parte de los operarios o del equipo de mantenimiento.

Siempre que sea factible, deberán utilizarse métodos de limpieza en húmedo. En otros lugares, la única alternativa aceptable es el uso de aspiradores. Las



salpicaduras o derrames de líquidos o sólidos deben eliminarse inmediatamente para evitar la dispersión de polvo en el aire.

La vigilancia médica de las personas empleadas en procesos en los que existan compuestos de Cromo VI debe comprender la formación sobre las propiedades tóxicas y cancerígenas de los compuestos de Cromo VI y Cromo III y las diferencias entre ambos grupos de compuestos. Al inicio de la actividad laboral y a intervalos regulares a lo largo de la misma deberá informarse sobre los riesgos de la exposición y el riesgo consiguiente de varias enfermedades, como el cáncer de pulmón, haciendo especial hincapié en la necesidad de observar un alto grado de higiene personal.

Todos los efectos nocivos de la exposición al cromo se pueden evitar. Las úlceras cutáneas por cromo se pueden prevenir eliminando las fuentes de contacto y las lesiones cutáneas. Los cortes y abrasiones cutáneos, aunque sean pequeños, deben limpiarse de inmediato y tratarse con un ungüento de EDTA sódico al 10%. Tras la ingestión accidental de compuestos de Cromo VI, la ingestión inmediata de ácido ascórbico también puede reducir rápidamente el Cr VI. El lavado cuidadoso de la piel tras el contacto, y el cuidado de evitar la fricción y la sudoración son importantes para la prevención y el control de la irritación primaria por cromatos. Hace unos años, se aplicaba un ungüento de EDTA sódico al 10 % regularmente en el tabique nasal antes de la exposición. Este tratamiento preventivo podía ayudar a mantener el tabique intacto. La aplicación regular de este ungüento cuando aparecen las molestias nasales y la ulceración precoz también puede contribuir a la curación sin que se produzca la perforación.

#### **1.4.7. Usos del Cromo a nivel Industrial.**

El Cromo se utiliza principalmente en aleaciones con Hierro, Níquel o Cobalto a las que se les proporciona dureza y resistencia. En los aceros inoxidables, constituyen el 10% de la composición final. Debido a la dureza, la aleación de Cromo, Cobalto, Wolframio se emplea para herramientas de corte rápido de metales. Al depositarse electrolíticamente, el Cromo proporciona acabados brillantes y resistentes. Es por ello que se aplica a gran escala en el acabado de vehículos y en muchos utensilios. El amplio uso del compuesto cromita como refractante se debe a su alto punto de fusión, su moderada dilatación térmica y la estabilidad de su estructura cristalina.

El Cromo hexavalente también se encuentra en algunos componentes de equipos eléctricos como piezas recubiertas de Zinc, placas de circuitos y tubos de rayos catódico, fabricación del latón, industria de la pintura, fotografía, manufactura de pigmentos y la curtiembre. Cuando aparece Cr(VI) en aguas residuales suele ser el resultado de emisiones de estas industrias en cuyas aguas residuales se pueden encontrar entre un 0.5 a 270 mg/L. También el Cr(VI) se usa en las estaciones de

comprensión del gas natural en el recubrimiento de las torres de enfriamiento para evitar la oxidación de la maquinaria, y por ende el agua utilizada en el proceso de transporte a los gaseoductos contiene cantidades de Cromo (Nordberg, 1998).

Según lo mencionado anteriormente son diversos los usos del Cromo a nivel industrial por lo que en la siguiente Tabla 1.8 se presentan algunas ocupaciones con exposición potencial al Cromo clasificadas según la intensidad de exposición.

**Tabla 1.8** Clasificación de actividades según la intensidad de exposición al Cromo.

<b>Exposición alta (actividades de alto riesgo)</b>	<b>Exposición mediana (actividades de mediano riesgo)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Cromadores.</li> <li>❖ Trabajadores de cromatos.</li> <li>❖ Terminadores de cuero.</li> <li>❖ Curtidores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Trabajadores de alumbre de cromo.</li> <li>❖ Electro galvanizadores.</li> <li>❖ Fotograbadores, Fotógrafos.</li> <li>❖ Procesadores de pieles.</li> <li>❖ Fabricantes de pigmentos, de productos químicos fotográficos.</li> </ul>
<b>Exposición baja (actividades de bajo riesgo)</b>	<b>Exposición muy limitada (actividades de muy bajo riesgo o nulo riesgo)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Fabricantes de aleaciones.</li> <li>❖ Trabajadores de aleaciones de Cromo, de cemento, construcción.</li> <li>❖ Fabricantes de colorantes de madera, de colores secos, de pinturas.</li> <li>❖ Fabricantes de juegos artificiales, de vidrio y de vidrios coloreados.</li> <li>❖ Trabajadores de inhibidores de corrosión y de oxidación.</li> <li>❖ Trabajadores de laboratorios químicos.</li> <li>❖ Perforadores de pozos de petróleo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Fabricantes de abrasivos.</li> <li>❖ Blanqueadores de aceite de palma, purificadores de aceites.</li> <li>❖ Trabajadores de acero inoxidable, de adhesivos, de esmaltes, de fertilizantes.</li> <li>❖ Fabricantes de bujías (velas) coloreadas, de pantalla de seda para serigrafía.</li> <li>❖ Desincrustadores de caucho.</li> <li>❖ Trabajadores de preservadores para madera, de cerámica.</li> <li>❖ Impresoras de papel para murales.</li> <li>❖ Fabricantes de fibra de vidrio, entre otros.</li> </ul>

Fuente: Galváo y Corey, (1987).

El Cromo VI tiene aplicaciones diversas en la industria y el nivel de exposición a este dependerá de las actividades realizadas. Una de las industrias que utiliza en grandes cantidades el Cromo es la Curtiembre, que será el sector de estudio en el que se enfocará el trabajo de investigación.

## 1.5. Industria de Curtiembre.

La industria de curtiembre se originó antiguamente con la capacidad de observación del hombre prehistórico que puso en evidencia lo siguiente: si una piel de animal (cuero crudo) entraba en contacto con algún tipo de corteza, madera u hojas de ciertas plantas, esta se manchaba y, curiosamente, las partes afectadas resultaban resistentes a la putrefacción. A consecuencia de esto, el hombre inició el desarrollo de la industria del curtido de cuero en base a la utilización del tanino. Y es así que, mediante la evolución del hombre, surgen las tenerías o curtiembres que son las fábricas que poseen capacidad de convertir las pieles frescas de ganado vacuno, porcino y otros animales de sangre caliente y ciertos reptiles como culebras, iguanas o garrobos, en un producto terminado conocido como cuero.

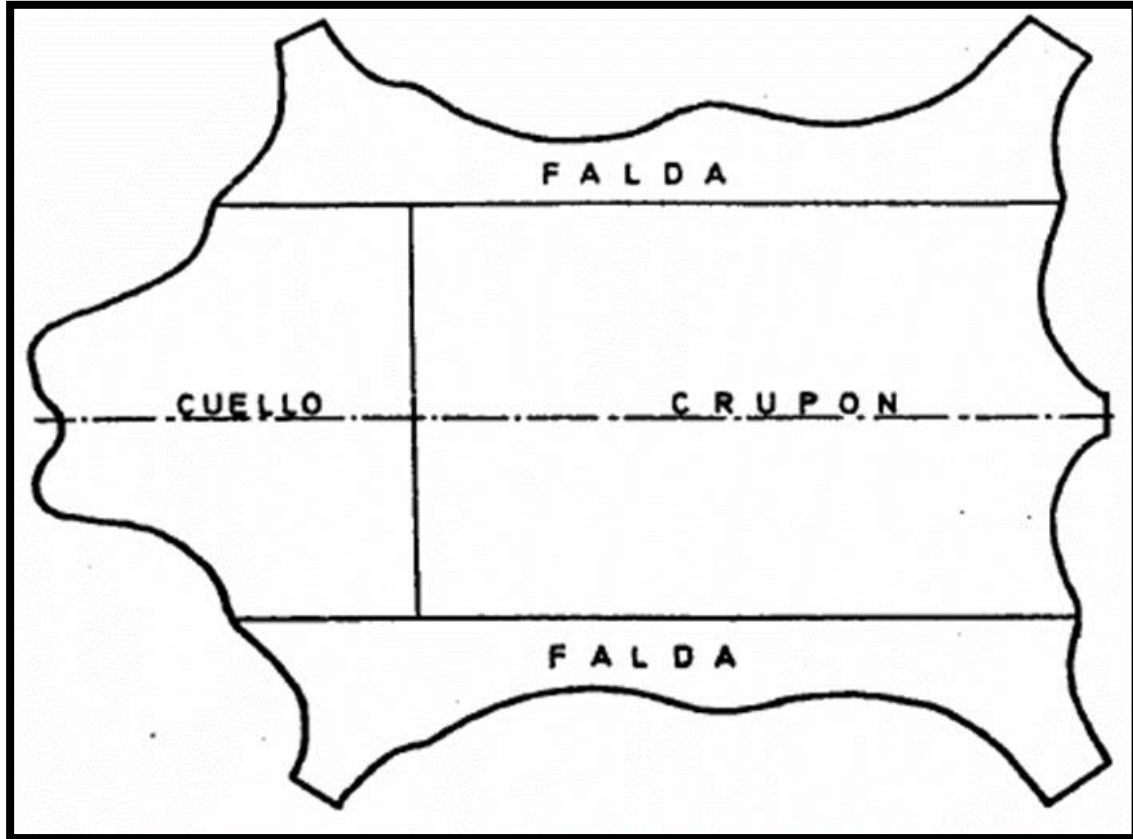
Además, es considerado un producto de mucha utilidad comercial debido a que es la materia prima para la elaboración de calzado, carteras, cinchos y otros artículos de uso del ser humano.

Para el procesamiento de curtiembre de pieles se cuenta con una gran cantidad de materias primas entre las cuales se puede mencionar:

- a) Piel en bruto, siendo este tipo bovino (piel de res) o porcino (piel de cerdo), las cuales provienen de los diferentes rastros municipales o mataderos existentes. Considerándose esta como la principal fuente de materia prima para el sector de curtiembre de pieles.
- b) Uso de químicos, el sector curtiembre para dicho procesamiento utiliza estos químicos los cuales son utilizados para la preparación de dichas pieles en las diferentes etapas que así lo requieran utilizando también insumos como agua, energía eléctrica los cuales son indispensables para que se lleve a cabo dicho proceso y obtener como producto final el cuero terminado o acabado el cual es materia prima necesaria para el proceso de elaboración de productos a base de cuero como zapatos, cinchos carteras entre otros.

Siendo la piel la materia básica en el proceso de fabricación. Es una materia heterogénea que forma la envoltura externa del cuerpo de los animales y ejerce funciones de protección, regulación de la temperatura del cuerpo, eliminación de sustancias perjudiciales, almacén de sustancias grasas, albergue de los órganos sensoriales, entre otros.

En una piel se distinguen tres zonas: El crupón que es la parte más homogénea y su peso aproximado es del 46% respecto al total de la piel fresca, la piel de cuello representa el 26% y las faldas el 28% (ver Figura 1.7). Dentro de una misma especie las pieles pueden representar grandes diferencias en función de la raza, las regiones de procedencia y condiciones de vida de los animales.



**Figura 1.7** Esquema de zonas de una piel fresca.

Fuente: Muñoz García, Urrutia Vásquez y Vaquero Andrade, (2005).

En la Tabla 1.9 se presenta un resumen de la composición química de la piel en forma general:

**Tabla 1.9** Composición química de la piel res.

Substancia	%
Agua	64
Proteínas	33
Grasas	2
Substancias Minerales	0.5
Otras substancias	0.5

Fuente: Muñoz García et al., (2005).

En cuanto al uso de químicos para la conservación de la piel depende del método que se emplea en esta para conservarla. La piel en el matadero sufre una degradación en función de la temperatura, bacterias y el tiempo que se encuentra

sometido a estos factores. La degradación presenta su máxima acción en el período comprendido entre el desuello del animal y el inicio de la conservación.

### **1.5.1. Antecedentes de la industria curtiembre en El Salvador.**

Las pieles y el cuero fabricados a partir de pellejos curtidos de animales se utilizan desde hace miles de años para confeccionar prendas de vestir. Con las pieles se fabrican gran variedad de prendas exteriores, como abrigos, chaquetas, sombreros, guantes y botas, así como adornos para otros tipos de prendas como la tapicería para automóviles y muebles, y una amplia gama de artículos de piel, como correas de reloj, bolsos, artículos de viaje y el calzado siendo otro producto tradicional del cuero.

Como se mencionó anteriormente en el apartado 1.4.7 uno de los usos del Cromo es la aplicación en la industria de curtiembre, siendo este uno de los métodos para la curtición del cuero para la elaboración de una gama de productos, pero con mayor énfasis en la producción de calzado.

El origen e historia del calzado en El Salvador, como en toda cultura, nace de una necesidad básica del hombre por proteger los pies de la inclemencia del tiempo, los caminos y sobre todo el trabajo del hombre mismo. Desde la época de la colonia ya era utilizado el calzado, aunque no se encuentran fuentes de información del tiempo en que se inició su manufactura, los primeros estilos fueron los que trajeron los españoles. Siendo las primeras formas de calzado denominadas “caites”, que básicamente era un calzado de piel de animal, el cual se obtenía mediante la caza de los mismos, posteriormente se fueron usando otros materiales como las llantas y algunas telas.

La fabricación de calzado en El Salvador inició en 1930 en una época en donde el producto se elaboraba tradicionalmente a base de cuero auténtico y siendo elaborados exclusivamente a mano por artesanos locales, los cuales empleaban sus propios estilos y creatividad para vestir y combinar a hombres y mujeres de mediados del siglo veinte. Algunas ciudades que se destacaron por poseer las mejores producciones de la época fueron: San Vicente, Usulután, San Miguel, Santa Ana, Ahuachapán, Sonsonate y San Salvador (Vásquez García, 2011).

En El Salvador la Industria ha sufrido considerables cambios en las últimas décadas distinguiéndose varias etapas durante su evolución y desarrollo tecnológico. A principios del siglo XX, el desarrollo de la Industria se basa fundamentalmente en la producción y exportación de bienes agrícolas. Posteriormente se pasa por una etapa basada en el modelo de sustitución de importaciones, entre los años 1945 a 1952 el sector industrial experimenta un notable crecimiento e incluye productos

como: el calzado y textiles, que pasan de ser pequeños talleres artesanales con tecnología doméstica a sistemas mecanizados.

En la década de los 50's es donde comienza la inversión de las fábricas de calzado, las cuales eran capaces de producir 2,000 pares de zapatos diarios, y que competían con una artesanía y una producción manufacturera simple que monopolizaba el sector; una de estas fábricas es la que se construyó con el nombre de "Calzado Salvadoreño S.A. ", la cual hoy en día se conoce con las siglas de "ADOC, S.A."

El Salvador se ha centrado siempre en el calzado de cuero, lo que le da una oportunidad con respecto a China, que produce calzado de calidad media o baja. Aun así, de 1997 a 2004, más de 450 pequeñas y medianas empresas cerraron por no poder hacer frente a la competencia asiática. El problema es que El Salvador tenía muchas pequeñas empresas dedicadas a la producción de calzado que actúan independientemente, por lo que no se pueden aprovechar de sinergias o de economías de escala.

Sin embargo, tanto ADOC, S.A. como Industrias Caricia S.A. de C.V, se han convertido en una historia de perseverancia en la Industria del Calzado, al ser de las pocas empresas que lograron sobrevivir al mantener sus operaciones y llegar a convertirse hoy en las empresas más grandes que fabrican y distribuyen calzado en El Salvador y Centro América, donde esperan mayor crecimiento con la apertura de los Tratados de Libre Comercio (Benítez Montenegro, Morales Candell y Renderos Portillo, 2012).

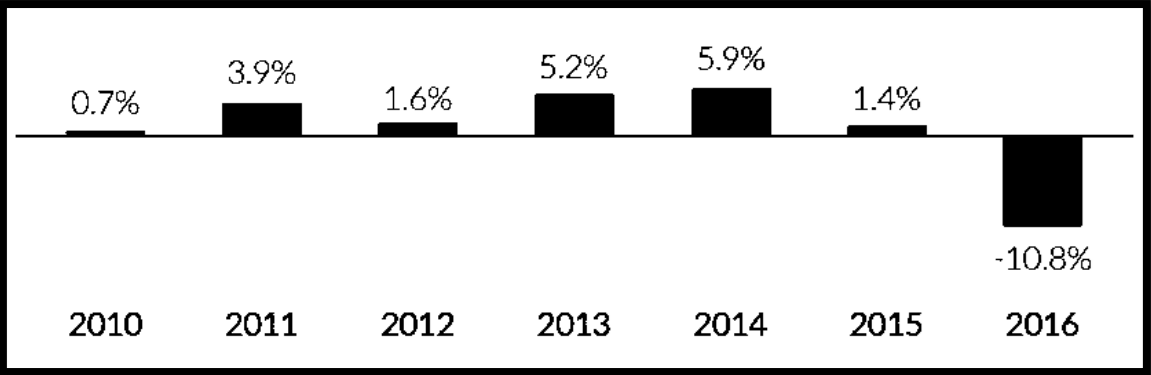
Actualmente, la materia prima por excelencia sigue siendo la piel de res, así también, lo que se conoce como pieles sintéticas: plástico, neolite, charol y telas.

#### **1.5.2. Producción y comercialización del cuero en El Salvador (Asociación Salvadoreña de Industriales [ASI], 2018).**

La producción de cuero y sus productos sirve como una aproximación a la del sector calzado, tomando en cuenta que la mayor parte de calzado producido y exportado en el país utiliza este insumo. El sector de cuero y sus productos registró un decrecimiento durante 2016 (-10.8%), equivalente a una disminución de la producción en US\$10.3 millones con respecto a 2015. No obstante, el sector sigue constituyendo una parte importante en la economía al representar un 3.5% del PIB de la industria manufacturera.

De forma general, la reducción en la producción podría explicarse por la disminución en el desempeño de las exportaciones en 2016 y 2017. El sector ha presentado estos últimos 7 años una tasa de crecimiento promedio de 1.1%, convirtiéndose

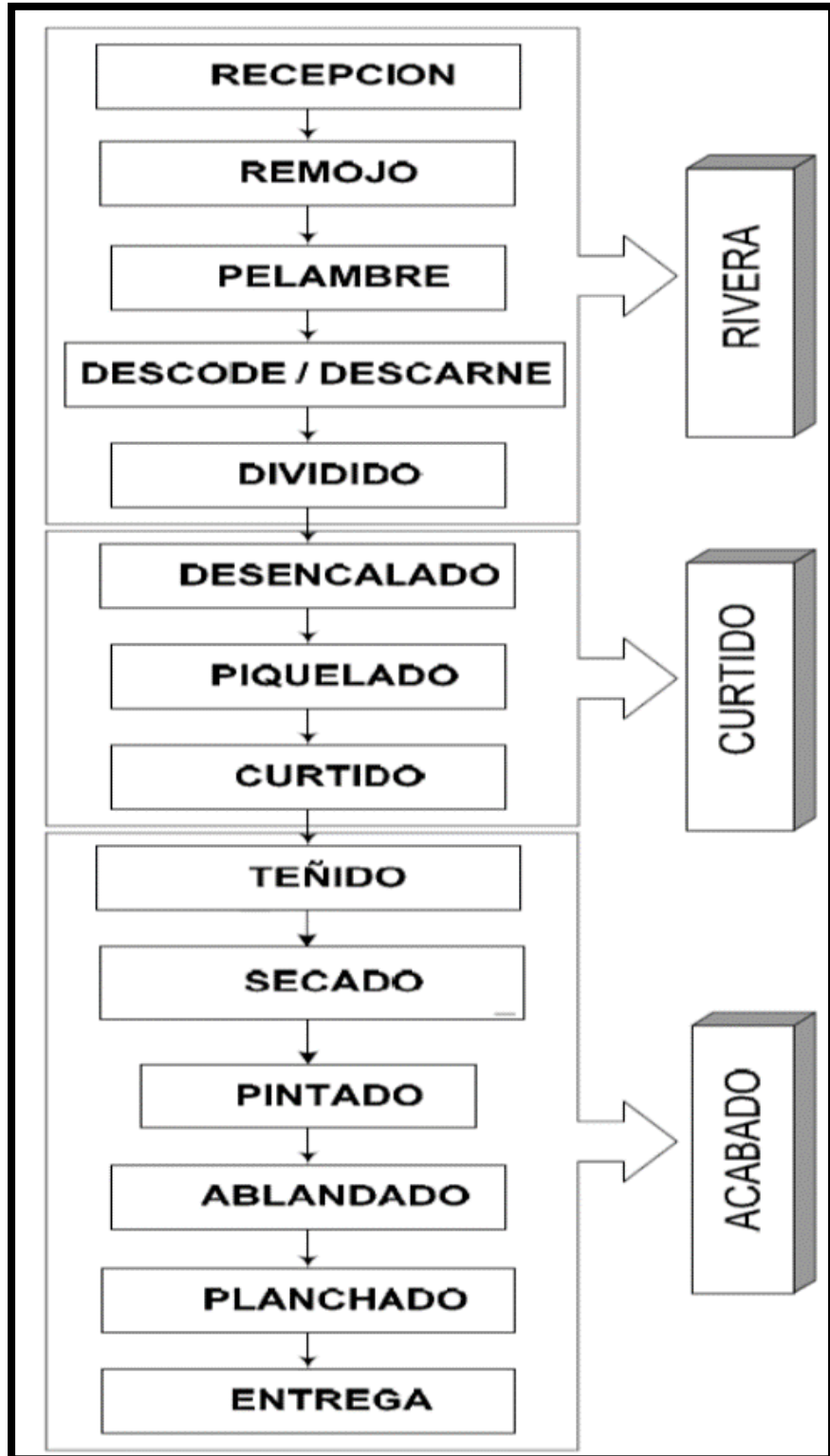
2016 en el único año, en el período analizado, con crecimiento negativo, como se presenta en la Figura 1.8.



**Figura 1.8** Tasa de Crecimiento de la Producción de Cuero y sus Productos.  
Fuente: ASI, (2018).

**1.5.3. Descripción de proceso productivo de la industria curtiembre.**

La producción de piel puede dividirse en tres fases principales (véase Figura 1.9): preparación del cuero para el curtido (Ribera) que incluye procesos como la eliminación del pelo y la carne adherida; proceso de curtido y proceso de acabado. El acabado incluye tareas mecánicas para dar forma y alisar la piel, y métodos químicos para colorear, lubricar, suavizar y aplicar un acabado superficial a la piel (Mc Cann, 1998).



**Figura 1.9** Proceso productivo de la Industria de Curtiembre.  
Fuente: Muñoz García et al., (2005).



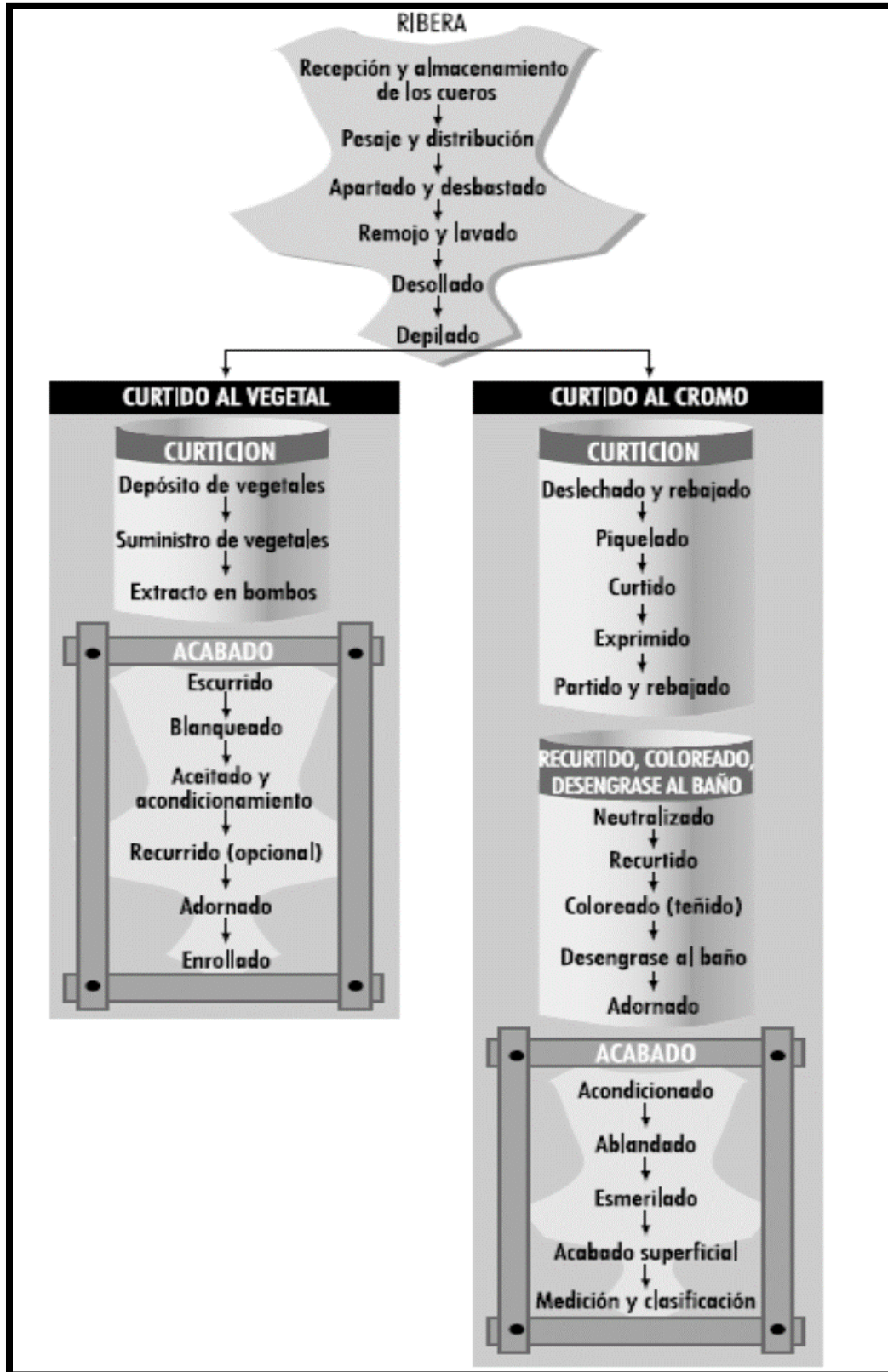


Figura 1.10 Procesos típicos de curtido vegetal y al cromo del cuero.  
Fuente: Mc Cann, (1998).

## **1.6. Alternativas de gestión de sólidos utilizados.**

La eliminación de metales pesados de aguas residuales industriales mediante el uso de materiales biosorbentes ha sido efectiva para concentrar el ion metálico en una fase sólida. Por lo que, es necesario plantearse la gestión de los sólidos utilizados, debido a que tendrán altas concentraciones de contaminantes; y en ocasiones estos materiales pueden conducir a serios problemas medioambientales. Sin embargo, existen diversas alternativas para gestionar adecuadamente los desechos sólidos como se exponen a continuación:

### **A. Desorción del metal adsorbido.**

Muchos autores han optado por esta opción, tratando los sólidos agotados con disoluciones ácidas para concentrar los metales en pequeños volúmenes de líquido, recuperando el metal y reduciéndose así la cantidad de residuo a gestionar (Sánchez Pina, 2014).

La regeneración del biosorbente con un mínimo porcentaje de metal residual y consecuentemente su reutilización en sucesivos ciclos de biosorción-desorción, es un aspecto importante a tener en cuenta a la hora de implementar un proceso de biosorción a escala industrial. No obstante, el interés en la regeneración dependerá de aspectos como el coste y disponibilidad del biosorbente, el valor del metal recuperado, el coste del propio tratamiento de regeneración, etc.

La desorción del metal retenido por el material biosorbente suele ser llevada a cabo utilizando agentes desorbentes que emplean diferentes mecanismos para retirar el metal adsorbido al sólido. Generalmente estos agentes suelen ser disoluciones de ácidos (HCl, HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) o bases (NaOH, KOH), que presentan diferente comportamiento en función del sistema biosorbente-metal que se trate.

El estudio de la regeneración del biosorbente incluye dos etapas: un estudio preliminar en discontinuo, para analizar la regeneración del biosorbente (elección del agente desorbente y de su concentración óptima) y el estudio de los ciclos sorción-desorción (Ronda Gálvez, 2016).

### **B. Lombricultura.**

La Corporación Nacional Forestal de la República de Chile (CONAF) plantea alternativas de gestión de residuos sólidos, dentro de las cuales menciona la lombricultura que utiliza como herramienta una especie domesticada de lombriz, la cual recicla todo tipo de materia orgánica. Con esta lombriz, existen dos líneas de producción: la lombricultura que la reproduce y cría las lombrices con el objeto de producir carne de lombriz y, el vermicompostaje que maneja las lombrices para producir principalmente humus, el cual es un fertilizante orgánico de mejor calidad

y mayor valor agregado que el compost. Para reciclar residuos agrícolas y forestales, se recomienda el vermicompostaje.

La lombricultura, tiene por objeto la reconversión de residuos biodegradables transformándolos en fertilizantes orgánicos. Se utiliza la lombriz roja californiana para realizar este proceso de transformación, las lombrices ingieren todos los residuos y pasan por su tracto digestivo, sus excreciones se convierten en "lombricomposta" o "humus de lombriz", siendo este el fertilizante orgánico de mayor importancia en el reino vegetal. El humus de lombriz, es inodoro, parecido a la borra del café. La cría y reproducción de las lombrices rojas californianas se efectúa en cunas apropiadas de materiales diversos, el alimento para las lombrices puede ser a base de diferentes tipos de estiércoles de animales, pastos, forrajes secos, biosólidos generados de las plantas de tratamiento de aguas residuales y residuos orgánicos en general debidamente composteados. Con esta actividad, se genera el desarrollo sustentable de los recursos naturales y al mismo tiempo un producto económicamente rentable, que debe ser manejado con criterios y normas uniformes de producción.

Las características del humus dependen de la composición del sustrato con que se alimenta la lombriz. Dentro de los elementos nutritivos que se deben monitorear en la lombricomposta están el pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno total, relación C/N, calcio, magnesio, potasio, fósforo, hierro, cobre, zinc, manganeso, cadmio, plomo, arsénico, mercurio, níquel y cromo. El humus debe ser soluble en agua, de esta manera se garantiza que los elementos nutritivos lleguen a las plantas. Si el humus presenta metales pesados, su empleo no será recomendado en cultivos destinados al consumo humano, sólo se utilizará en cultivos forestales y ornamentales (Cruz Ramales, Ramírez Perucho, Torres López, Coyotl Castillo y Silveti Loeza, 2010).

El vermicomposteo es el método de procesamiento de materia orgánica, utilizando diferentes especies de lombriz de tierra. Este es un compost con una mejor estructura y un mayor contenido de nutrientes, con respecto al compost obtenido sin la intervención de las lombrices. La presencia de este humus en los suelos garantiza la reserva de sustancias nutritivas para las plantas, favorece la absorción y retención del agua, facilita la circulación del aire, limita los cambios bruscos de temperatura y humedad, bloquea a muchos compuestos tóxicos y provee alimentos a incontables y minúsculos animales que son la base de la cadena alimenticia.

El método de vermicomposteo consiste en la crianza intensiva de lombrices que se alimentan de los desechos que contienen los lodos, y es tal la depuración, que los convierten en biosólidos, y como consecuencia, en excelentes mejoradores de suelos.

Durante el proceso de vermicomposteo existe la principal de la lombriz de tierra y la más utilizada es la Eisenia fétida ya que favorece la producción de fertilizantes al vivir sobre el suelo.

Aproximadamente en el mundo existen 8000 especies de lombrices, de las cuales solo se conoce un 50%, y muy pocas son utilizadas para actividades económicas como la especie Eisenia foetida (lombriz roja californiana) siendo la más usada para el proceso de Vermicompostaje, debido a que tiene una capacidad extraordinaria de reproducción y permite al lombricultor amortizar el capital invertido en un plazo razonable.

Se pueden usar diferentes sustratos para el desarrollo de la lombriz. El estiércol, ya que funciona como una fuente de microorganismos y promoviendo reducción en el tiempo de maduración del compostaje, favorece la descomposición de los residuos.

En la Tabla 1.10 se presentan las disposiciones existentes en Estados Unidos (EPA) sobre límites máximos de metales contaminantes en el compost a partir de Residuos Sólidos Urbanos; por esta razón, debe buscarse que los materiales orgánicos sean aprovechados de una manera segura y eficiente.

**Tabla 1.10** Límites máximos permitidos de metales pesados en lodos.

Metal	Tierras agrícolas y forestales, sitios públicos, recuperación de suelos.		Límites máximos permitidos en compost (mg/kg-peso seco)
	Concentración máxima (mg/kg)	Aplicación máxima (kg/ha)	
Arsénico	75	41	54
Cadmio	85	39	18
Cromo	3000	3000	1200
Cobre	4300	1500	1200
Plomo	840	300	300
Mercurio	57	17	300
Molibdeno	75	18	20
Níquel	420	420	180
Selenio	100	100	14
Zinc	7000	2800	1800

Fuente: Serpa Juli, (2017).

La importancia de regular la concentración de metales en los biosólidos radica en la posibilidad de incrementar la disponibilidad de algunos de ellos que pueden causar

problemas de fitotoxicidad o acumulación en los cultivos, sin embargo, el riesgo de lixiviación de metales a los acuíferos es poco probable siempre y cuando los biosólidos no contengan altas concentraciones de ellos. A pesar de esto, los registros de numerosos sitios con aplicaciones agrícolas de biosólidos demuestran que la asimilación de los metales por las plantas es mínima. Además, el incremento en la concentración de metales en el suelo no será significativo sino hasta después de diversas aplicaciones de biosólidos (Serpa Juli, 2017).

### **C. Aprovechamiento energético como combustible alternativo (Sánchez Pina, 2014).**

Utiliza el calor generado en la combustión de los residuos. Muchas cementeras cuentan ya con instalaciones para el aprovechamiento energético de residuos y subproductos de otras actividades, minimizando asimismo el impacto ambiental del proceso de valorización.

Para que un residuo sea considerado apto para su utilización como combustible alternativo debe reunir las características que lo hagan compatible con el proceso productivo, tales como:

- i. Poder calorífico suficiente.
- ii. Ausencia de interferencias en las características del clínker.
- iii. Emisiones controladas, sin provocar aumentos significativos en las emisiones contaminantes y los respectivos límites de emisión.

La valorización de residuos en hornos industriales, en especial de cementeras, es una técnica fuertemente implantada en los países desarrollados. En particular, el uso de los residuos como alternativa a los combustibles fósiles convencionales es una práctica habitual que ha sido ampliamente ensayada en los países industriales (USA, Canadá, Francia, Suiza, Bélgica, entre otros países).

Debido a las enormes cantidades de energía térmica involucradas en la producción de clínker, la industria cementera está en permanente búsqueda de nuevas fuentes energéticas. La utilización de residuos como combustible alternativo, en hornos de clinkerización, constituye una práctica que se ajusta a la política comunitaria en materia de gestión de residuos: prevención, recuperación y eliminación.

Las autoridades ambientales competentes establecen en los permisos de las cementeras las limitaciones en cuanto a composición y cantidad de los vertidos, de forma que se garantice la compatibilidad ambiental de la actividad. Así, el principal impacto medioambiental de una cementera son las emisiones a la atmósfera del horno de clínker, que no genera residuos sólidos, ni vertidos líquidos.

La cocción de las materias primas en el horno de clínker tiene lugar por contacto directo de estas con los gases de combustión que circulan en contracorriente. Las emisiones a la atmósfera provenientes del horno de cemento tienen su origen en las reacciones químicas provocadas por la cocción de las materias primas, y en los procesos de combustión. Antes de ser emitidos a la atmósfera, los gases provenientes de los hornos de clínker se desempolvan en filtros, y el polvo recogido se alimenta de nuevo al proceso de fabricación.

En cuanto a los metales, igual que ocurre con todos los demás elementos químicos, no se destruyen en los hornos industriales. Los metales incorporados al horno de cemento, a través de las materias primas o de los combustibles, estarán presentes en el clínker o en las emisiones a la atmósfera.

Los numerosos estudios realizados sobre el comportamiento de los metales han demostrado que son retenidos mayoritariamente en el clínker. Salvo para metales relativamente volátiles como el mercurio y el talio, la retención alcanza cifras muy próximas al 100%, lo que garantiza que los gases emitidos a la atmósfera respetan rigurosamente los límites de emisión más estrictos.

Los metales pesados presentes en el cemento están incorporados a la estructura mineralógica del clínker y químicamente ligados mediante las reacciones alcalinas que tienen lugar cuando el cemento reacciona con el agua para dar a sus productos derivados la resistencia mecánica que les caracteriza. Esta fijación química, además de la alta densidad y baja permeabilidad del hormigón, da como resultado un potencial muy bajo de liberación de metales al medio acuoso (lixiviación).

En cuanto a los metales volátiles (Hg y Tl), éstos escapan a la acción del horno y son emitidos en parte a la atmósfera. Su contenido en los combustibles alternativos debe ser por tanto objeto de vigilancia y control.

#### **D. Incineración.**

Por otro lado, la incineración es un proceso de combustión controlada que transforma la fracción orgánica de los residuos sólidos en materiales inertes y gases. No es un sistema de eliminación total, pues genera cenizas, escorias y gases, pero con él se consigue una importante reducción de peso y volumen del residuo sólido. Con este tratamiento los metales pesados quedarían estabilizados en las cenizas o podrían ser recogidos por filtros de manga o precipitadores electrostáticos (Sánchez Pina, 2014).

La incineración de los residuos, especialmente si hablamos de residuos peligrosos, siempre ha sido un tema muy debatido por los ciudadanos y por organizaciones

ambientales debido a estudios realizados, problemas y accidentes ocurridos a lo largo de la historia.

La incineración es debida al creciente volumen de residuos tanto industriales como urbanos y la sobreexplotación de los vertederos, por ello, es necesario usar otros métodos de gestión de residuos que impliquen la reducción del volumen y la inertización de dichos vertidos.

Sin embargo, la incineración no es modelo seguro totalmente, si no se realiza un mantenimiento adecuado y no se dispone de los dispositivos de seguridad apropiados puede dar lugar a vertidos líquidos, gases contaminantes y generación de residuos. He aquí el problema, dichos vertidos, gases y residuos afectarán al entorno donde este situada la instalación incineradora, ya que muchos países no tienen una normativa estricta sobre estas operaciones o no son controlados eficazmente, por tanto, muchas empresas ahorrarán costes no motorizando o gestionando adecuadamente los dispositivos para la eliminación de los contaminantes, sin olvidar los accidentes puntuales (Barrera Trujillo, 2016).

#### **E. Depósito en vertedero controlado.**

Según RECÍCLAME (2018) la deposición ordenada de los residuos sólidos en lugares preparados para tal fin, debe cumplir las disposiciones legales vigentes en cuanto a regulación, control y autorizaciones.

La principal función de los vertederos controlados es la eliminación de residuos complejos en condiciones tales que se minimizan o desaparecen los posibles efectos negativos sobre el entorno. Aunque las sustancias vertidas no se pueden aprovechar, se consigue la degradación de la materia orgánica que posibilita el aprovechamiento de los gases generados y la futura reutilización de la zona.

El último paso en la gestión de los residuos sólidos es su eliminación. Hasta este punto deben llegar sólo aquellos que son verdaderos residuos, siendo este el lugar de salida de los mismos del sistema económico hacia el sistema natural.

Aquellos residuos destinados a ser almacenados se deben diferenciar en dos grandes grupos los cuales son (Plataforma Educativa Aragonesa, 2016):

##### **a) Residuos sin problemas serios de toxicidad, peligrosidad o radioactividad (residuos inertes y no especiales).**

Siendo este grupo en donde se encuentra la mayoría de los residuos que se generan y el sistema más habitual de almacenado que se realiza para ellos es el vertedero controlado.

En estos vertederos los residuos se van depositando en capas, alternándolas con capas de tierra, para intentar evitar problemas sanitarios y malos olores.

Estos vertederos se intentan situar sobre terrenos impermeables o se realiza la impermeabilización previa del fondo y de las paredes de los mismos, para poder garantizar que los lixiviados (líquidos formados por la disolución de los componentes de los residuos con las aguas de infiltración y que contienen gran cantidad de contaminantes) sean drenados, recogidos y tratados de forma controlada en depuradoras de aguas residuales, evitando así que se filtren en el suelo y contaminen los acuíferos.

Además, se instalan unos sistemas de tuberías por todo el vertedero para permitir la salida de los gases que se generan por los procesos de fermentación anaeróbica de los residuos orgánicos, para evitar así que se produzcan explosiones o incendios, incluso después de que el vertedero sea clausurado.

Estos gases constituyen el denominado biogás, cuyo principal componente es el gas metano (50%). Existen vertederos donde se recuperan estos gases para producir energía, son los llamados vertederos con recuperación de energía.

Una vez cerrado o clausurado un vertedero controlado, se suelen colmatar y recubrir de capas de tierra que hacen posible rehabilitar dicho espacio para otros fines.

#### **b) Residuos tóxicos, peligrosos o radioactivos (Residuos especiales).**

Estos residuos requieren tratamientos físico-químicos especiales de detoxificación o de control, por lo que habrán sido previamente desviados a plantas específicas de tratamiento, en muchos casos, desde las mismas industrias productoras.

Después serán almacenados en lugares que presenten una seguridad y control muy exigentes, con sistemas que los aislen del entorno y suficientemente seguros.

#### **1.6.1. Ventajas y desventajas de las alternativas de gestión planteadas.**

En la Tabla 1.11 se presentan las ventajas y desventajas de las diferentes alternativas para gestionar adecuadamente los desechos sólidos, según las alternativas mencionadas en la sección anterior.



**Tabla 1.11** Ventajas y desventajas de las diferentes alternativas de gestión de desechos sólidos.

Alternativas	Ventajas	Desventajas
Desorción del metal adsorbido	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Recuperación del metal adsorbido.</li> <li>❖ Reducción de la cantidad de residuo a gestionar, debido a que el material biosorbente al ser tratado con pequeños volúmenes de líquido (ácidos o bases) disminuye la concentración del metal adsorbido en este.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Posibles pérdidas de propiedades adsorbentes luego de la utilización de agentes desorbentes (ácidos o bases) que emplean diferentes mecanismos para retirar el metal adsorbido al sólido.</li> <li>❖ El material biosorbente debe ser lo suficientemente robusto para no desintegrarse luego de la desorción.</li> <li>❖ Disminución del peso del sólido biosorbente agotado después del tratamiento con ácidos o bases para lograr la desorción del metal de interés.</li> <li>❖ Elevado costo por el equipo necesario para llevar a cabo el proceso de desorción.</li> </ul>
Lombricultura	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Las lombrices ayudan a que los residuos como lodos de plantas de tratamientos de aguas residuales industriales se transformen en fertilizantes, debido a que estas producen metalotioneína, proteína diseñada especialmente para recubrir los metales, y por medio del ciclo de vida de las mismas, digieren los metales y el excremento se convierte en un alimento rico en proteínas y de gran utilidad.</li> <li>❖ Mejora las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo.</li> <li>❖ Minimiza la descarga directa de lodos provenientes de las plantas de tratamientos de aguas residuales industriales a los cuerpos receptores de agua.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Requiere de prolongada inversión de tiempo para el tratamiento de residuos, aun siendo combinado con otras materias orgánicas.</li> </ul>

continúa

**Tabla 1.11** Ventajas y desventajas de las diferentes alternativas de gestión de desechos sólidos (continuación).

Alternativas	Ventajas	Desventajas
Combustibles alternativos	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Las altas temperaturas (hasta 2000 °C) y los largos tiempos de residencia en atmósfera rica en oxígeno garantizan la completa destrucción de los compuestos orgánicos presentes en los residuos.</li> <li>❖ La interacción de los gases de combustión con la materia prima presente en el horno garantiza que la parte no combustible del residuo quede retenida en el proceso y se incorpore al clínker de forma prácticamente irreversible.</li> <li>❖ Se reduce el consumo de combustibles tradicionales no renovables, tales como el carbón o derivados del petróleo, lo que es una vía de diversificación de fuentes energéticas especialmente atractiva.</li> <li>❖ No se generan residuos que deban ser tratados posteriormente, ni se afecta negativamente las emisiones a la atmósfera.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Disminución de las propiedades características del clínker debido a la incorporación de dichos metales en el mismo.</li> </ul>
Incineración	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Recuperación de energía del sólido agotado proporcionando un ahorro de combustibles fósiles.</li> <li>❖ Reducción del volumen del hasta más o menos un 90% del volumen original.</li> <li>❖ Reducción de las emisiones de metano que se desprenden en los vertederos.</li> <li>❖ Fijación de los metales pesados en las escorias como sales estables.</li> <li>❖ El espacio de la instalación incineradora no se agota por acumulación de los residuos, tal como sucede en un depósito controlado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Posible contaminación y acumulación de sustancias en la cadena trófica.</li> <li>❖ Generación de cenizas que son consideradas peligrosas y deben ser confinadas en un depósito de control adecuado.</li> <li>❖ Emisión de gases que deben ser tratados, puesto que son contaminantes como compuestos volátiles.</li> <li>❖ Elevados costes ambientales, económicos de construcción y funcionamiento, razón por la cual no tendría que ser opción prioritaria de tratamiento de sólido agotado.</li> </ul>

continúa

**Tabla 1.11** Ventajas y desventajas de las diferentes alternativas de gestión de desechos sólidos (continuación).

Alternativas	Ventajas	Desventajas
Depósito en vertedero controlado	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Es la última opción, para aquellos residuos que no pueden ser utilizados, reciclados, ni valorizados de otra forma, así como para los rechazos de los sistemas de tratamiento (compostaje e incineración).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Utilizan grandes superficies de terreno.</li> <li>❖ Emisiones de biogás (CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, básicamente).</li> <li>❖ Proliferación de organismos indeseables (roedores, insectos, gaviotas y entre otros).</li> <li>❖ Filtración de lixiviados de sales, metales pesados, compuestos orgánicos persistentes y biodegradables en aguas subterráneas o ríos.</li> <li>❖ Contaminación por la acumulación de sustancias peligrosas en el subsuelo, de aguas subterráneas y cadena trófica.</li> <li>❖ Dispersión de residuos y polvo.</li> <li>❖ Incendios o explosiones incontroladas debido a los gases formación del biogás.</li> <li>❖ Escurrimiento de tierras de residuos inestables.</li> <li>❖ Daño a la salud humana, a la flora y fauna de los alrededores.</li> <li>❖ Tiempo de funcionamiento limitado.</li> </ul>

## **CAPÍTULO 2. AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA DE CURTIEMBRE.**

El suelo, el agua y el aire son los grandes receptores de los residuos causados no solamente por la actividad del hombre, sino también por los animales y la naturaleza; estos medios pueden asimilar cierta cantidad de residuos antes de llegar a estar contaminados, pero una cantidad excesiva de cualquier tipo de contaminante conlleva a un creciente deterioro de los recursos naturales, situación que se ha visto favorecida por la industrialización, la urbanización incontrolada, la ausencia de planes de ordenamiento territorial, entre otros factores de cuyas consecuencias actuales y futuras no se tiene conciencia.

Históricamente las aguas residuales no han sido consideradas un factor intrínseco de la producción, se ha supuesto que el medio ambiente las absorbe y las somete a un tratamiento natural; el progreso cultural e industrial ha llevado esta práctica a situaciones límite, sin considerar la importancia que el recurso hídrico representa para la vida humana. Para hacer frente a este problema, es necesaria una gestión correcta de los recursos hídricos, mejorando los sistemas de irrigación, promoviendo el reciclado de las aguas gracias a la construcción de infraestructuras adecuadas para su tratamiento, poniendo en práctica los fundamentos de política para el manejo integral del agua, políticas de producción limpia y aplicando las mejores tecnologías disponibles en las industrias para el ahorro del agua; para lo que se requiere de inversión económica, conocimiento claro acerca de las características de las aguas residuales, tratamiento y efectos que su vertimiento ocasiona en el cauce receptor (Cury Regino, 2004).

### **2.1. Características fisicoquímicas del agua residual.**

Según Características de aguas residuales (2018), el conocimiento de las características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales es esencial para el proyecto y funcionamiento de las instalaciones de tratamiento. Por ello es importante saber en qué consiste cada una de ellas y los parámetros que la conforman:

**A. Características físicas:** Las más importantes del agua residual son el contenido total de sólidos, término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta. Otras características físicas importantes son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad. A continuación, se define cada variable que pertenece a las características físicas:

**a) Sólidos Totales:** Analíticamente, se define el contenido de sólidos totales como la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación entre 103 y 105 °C. Los sólidos

sedimentables se definen como aquellos que sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono de Imhoff) en el transcurso de un período de 60 minutos. Los sólidos sedimentables, expresados en unidades de mL/L, constituyen una medida aproximada de la cantidad de fango que se obtendrá en la decantación primaria del agua residual. Los sólidos totales, o residuo de la evaporación, pueden clasificarse en filtrables o no filtrables (sólidos en suspensión) haciendo pasar un volumen conocido de líquido por un filtro. La fracción filtrable de los sólidos corresponde a sólidos coloidales y disueltos. La fracción coloidal está compuesta por las partículas de materia de tamaños entre 0.001 y 1 micrómetro. Los sólidos disueltos están compuestos de moléculas orgánicas e inorgánicas e iones en disolución en el agua. No es posible eliminar la fracción coloidal por sedimentación. Normalmente, para eliminar la fracción coloidal es necesaria la oxidación biológica o la coagulación complementadas con la sedimentación. Cada una de las categorías de sólidos comentadas hasta ahora puede ser, a su vez, dividida en función de su volatilidad a 550 +/- 50 °C. A esta temperatura, la fracción orgánica se oxidará y desaparecerá en forma de gas, quedando la fracción inorgánica en forma de cenizas.

- b) Olores:** Normalmente, los olores son debidos a los gases liberados durante el proceso de descomposición de la materia orgánica. El agua residual reciente tiene un olor peculiar, algo desagradable, que resulta más tolerable que el del agua residual séptica. El olor más característico del agua residual séptica es el debido a la presencia del sulfuro de hidrógeno que se produce al reducirse los sulfatos a sulfitos por acción de microorganismos anaerobios. Las aguas residuales industriales pueden contener compuestos olorosos en sí mismos, o compuestos con tendencia a producir olores durante los diferentes procesos de tratamiento.
- c) Temperatura:** La temperatura del agua residual suele ser siempre más elevada que la del agua de suministro, hecho principalmente debido a la incorporación de agua caliente procedente de las casas y los diferentes usos industriales. Dado que el calor específico del agua es mucho mayor que el del aire, las temperaturas registradas de las aguas residuales son más altas que la temperatura del aire durante la mayor parte del año, y sólo son menores que ella durante los meses más calurosos del verano.
- d) Densidad:** Se define la densidad de un agua residual como su masa por unidad de volumen, expresada en kg/m<sup>3</sup>. Es una característica física importante del agua residual dado que de ella depende la potencial formación de corrientes de densidad en fangos de sedimentación y otras instalaciones de tratamiento.

- e) **Color:** Históricamente, para la descripción de un agua residual, se empleaba el término condición junto con la composición y la concentración. Este término se refiere a la edad del agua residual, que puede ser determinada cualitativamente en función de su color y su olor. El agua residual reciente suele tener un color grisáceo. Sin embargo, al aumentar el tiempo de transporte en las redes de alcantarillado y al desarrollarse condiciones más próximas a las anaerobias, el color del agua residual cambia gradualmente de gris a gris oscuro, para finalmente adquirir color negro. Llegado este punto, suele clasificarse el agua residual como séptica. Algunas aguas residuales industriales pueden añadir color a las aguas residuales domésticas. En la mayoría de los casos, el color gris, gris oscuro o negro del agua residual es debido a la formación de sulfuros metálicos por reacción del sulfuro liberado en condiciones anaerobias con los metales presentes en el agua residual.
- f) **Turbiedad:** La turbiedad, como medida de las propiedades de transmisión de la luz de un agua, es otro parámetro que se emplea para indicar la calidad de las aguas vertidas o de las aguas naturales en relación con la materia coloidal y residual en suspensión. La medición de la turbiedad se lleva a cabo mediante la comparación entre la intensidad de la luz dispersada en la muestra y la intensidad registrada en una suspensión de referencia en las mismas condiciones. La materia coloidal dispersa o absorbe la luz, impidiendo su transmisión. Aun así, no es posible afirmar que exista una relación entre la turbiedad y la concentración de sólidos en suspensión de un agua no tratada. No obstante, sí están razonablemente ligados la turbiedad y los sólidos en suspensión en el caso de efluentes procedentes de la decantación secundaria en el proceso de fangos activados.

**B. Características químicas:** El estudio de las características químicas de las aguas residuales se aborda en los siguientes cuatro apartados: la materia orgánica, la medición de contenido orgánico, materia inorgánica y gases. El hecho de que la medición del contenido en materia orgánica se realice por separado viene justificado por su importancia en la gestión de la calidad del agua y en el diseño de las instalaciones de tratamiento de aguas. A continuación, se explica de manera breve cada uno de los apartados en lo que se divide las características químicas:

- a) **La materia orgánica:** Proviene generalmente de sólidos y líquidos de los reinos animal y vegetal, así como de actividad de los humanos relacionada con la síntesis de orgánicos. Los compuestos orgánicos están formados normalmente por orgánicos volátiles, es decir, compuestos que se oxidan a  $\text{CO}_2$  en presencia de oxígeno y temperaturas elevadas. En un agua residual de intensidad media, un

75% de los sólidos suspendidos y un 40% de los sólidos filtrables son de naturaleza orgánica. Los compuestos orgánicos están formados generalmente por una combinación de carbono, hidrógeno y oxígeno, con la presencia, en determinados casos, de nitrógeno. También pueden estar presentes otros elementos como azufre, fósforo o hierro.

**b) La medición del contenido orgánico:** Existen diferentes ensayos para determinar el contenido de orgánicos en las aguas residuales. Pueden clasificarse en dos grupos, los empleados para determinar concentraciones elevadas de compuestos orgánicos y para determinar trazas. Los ensayos más utilizados a nivel industrial y en la legislación ambiental son la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), que es la medición del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica y la demanda química de oxígeno (DQO) que es el ensayo en el que se emplea un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse.

**c) La materia inorgánica:** Varios componentes inorgánicos de las aguas residuales tienen importancia para el establecimiento y control de la calidad del agua. Las concentraciones de las sustancias inorgánicas en el agua aumentan por las aguas residuales tratadas o sin tratar que se descargan a ella, también porque el proceso natural de evaporación elimina parte del agua superficial y deja la sustancia inorgánica en el agua. Por lo tanto, conviene analizar la naturaleza de los siguientes constituyentes:

**i. pH:** La concentración de ion hidrógeno es un parámetro de calidad de gran importancia tanto para el caso de aguas naturales como residuales. El intervalo de concentraciones adecuado para la adecuada proliferación y desarrollo de la mayor parte de la vida biológica es bastante estrecho y crítico. El agua residual con concentraciones de ion hidrógeno inadecuadas presenta dificultades de tratamiento con procesos biológicos, y el efluente puede modificar la concentración de ion hidrógeno en las aguas naturales si ésta no se modifica antes de la evacuación de las aguas. La concentración de ion hidrógeno presente en el agua está muy estrechamente relacionada con la cuantía en que se disocian las moléculas de agua.

**ii. Cloruros:** Otro parámetro de calidad importante es la concentración de cloruros. Los cloruros que se encuentran en el agua natural proceden de la disolución de suelos y rocas que los contengan y que están en contacto con el agua. En el caso de aguas costeras, su presencia también es debida a la intrusión de aguas saladas. Otra

fuentes de cloruros es la descarga de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales a aguas superficiales.

- iii. **Alcalinidad:** La alcalinidad de un agua residual está provocada por la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, el magnesio, el sodio, el potasio o el amoníaco. De entre todos ellos, los más comunes son el bicarbonato de calcio y el bicarbonato de magnesio. La alcalinidad ayuda a regular los cambios del pH producido por la adición de ácidos. Normalmente, el agua residual es alcalina, propiedad que adquiere de las aguas de tratamiento, el agua subterránea, y los materiales añadidos en los usos domésticos.
- iv. **Nitrógeno:** Los elementos nitrógeno y fósforo son esenciales para el crecimiento de protistas y plantas, razón por la cual reciben el nombre de nutrientes o bioestimuladores. Trazas de otros elementos, tales como el hierro, son necesarios para el crecimiento biológico. No obstante, el nitrógeno y el fósforo son, en la mayoría de los casos, los principales elementos nutritivos. Puesto que el nitrógeno es absolutamente básico para la síntesis de proteínas, será preciso conocer datos sobre la presencia del mismo en las aguas, y en qué cantidades, para valorar la posibilidad de tratamiento de las aguas residuales domésticas e industriales mediante procesos biológicos. Cuando el contenido de nitrógeno sea insuficiente, será preciso añadirlo para hacer tratable el agua residual. En aquellos casos en los que sea necesario el control del crecimiento de algas en la masa de agua receptora para preservar los usos a que se destina, puede ser necesaria la eliminación o reducción del nitrógeno en las aguas residuales antes del vertido.
- v. **Formas del nitrógeno:** El contenido total en nitrógeno está compuesto por nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito y nitrato. El contenido en nitrógeno orgánico se determina con el método Kjeldahl. Se hierva la muestra acuosa con el objeto de eliminar el amoníaco, para dar paso al proceso de digestión en el que el nitrógeno orgánico se convierte en amoníaco. El nitrógeno Kjeldahl total se determina del mismo modo que el nitrógeno orgánico, con la diferencia de que no se elimina el amoníaco presente antes del proceso de digestión. Por lo tanto, el nitrógeno Kjeldahl total incluye ambas formas de nitrógeno, el orgánico y el amoniacal.
- vi. **Fósforo:** El fósforo también es esencial para el crecimiento de algas y otros organismos biológicos. Debido a que en aguas superficiales tienen lugar nocivas proliferaciones incontroladas de algas, actualmente existe mucho interés en limitar la cantidad de compuestos



de fósforo que alcanzan las aguas superficiales por medio de vertidos de aguas residuales domésticas, industriales, y a través de las escorrentías naturales.

- vii. Azufre:** El ion sulfato se encuentra, de forma natural, tanto en la mayoría de las aguas de abastecimiento como en el agua residual. Para la síntesis de proteínas, es necesario disponer de azufre, elemento que posteriormente será liberado en el proceso de degradación de las mismas. Los sulfatos se reducen químicamente a sulfuros y a sulfuros de hidrógeno ( $H_2S$ ) bajo la acción bacteriana en condiciones anaerobias.
- viii. Compuestos tóxicos inorgánicos:** Algunos cationes son de gran importancia de cara al tratamiento y evacuación de aguas residuales. Muchos de dichos compuestos están clasificados como contaminantes prioritarios. El cobre, el plomo, la plata, el cromo, el arsénico y el boro son tóxicos en mayor o menor grado para los microorganismos, razón por la cual deben ser considerados en el proyecto de plantas de tratamiento biológico. El funcionamiento de muchas de ellas se ha visto alterado por la presencia de estos iones, hasta el extremo de provocar la muerte de los microorganismos, obligando a detener el tratamiento.
- ix. Metales pesados:** Como constituyentes importantes de muchas aguas, también se encuentran cantidades, a nivel de traza, de muchos metales. Entre ellos podemos destacar el níquel (Ni), el manganeso (Mn), el plomo (Pb), el cromo (Cr), el cadmio (Cd), el cinc (Zn), el cobre (Cu), el hierro (Fe) y el mercurio (Hg). Muchos de estos metales también están catalogados como contaminantes prioritarios. Algunos de ellos son imprescindibles para el normal desarrollo de la vida biológica, y la ausencia de cantidades suficientes de ellos podría limitar el crecimiento de las algas, por ejemplo. Debido a su toxicidad, la presencia de cualquiera de ellos en cantidades excesivas interferirá con gran número de los usos del agua. Es por ello que, a menudo, resulta conveniente medir y controlar las concentraciones de dichas sustancias. Los métodos para la determinación de las concentraciones de estas sustancias varían en complejidad en función de las sustancias causantes de interferencias potencialmente presentes.
- d) Los gases presentes en el agua residual:** Los gases más frecuentemente encontrados en el agua residual sin tratar son nitrógeno, oxígeno, anhídrido carbónico que son gases comunes de la atmósfera y se encuentran en todas las aguas que están expuestas al aire, mientras que

el sulfuro de hidrógeno, amoníaco, y metano proceden de la descomposición de la materia orgánica presente en el agua residual.

**C. Características biológicas:** Los aspectos biológicos incluyen el conocimiento de los grupos principales de microorganismos que se encuentran en las aguas superficiales y residuales, así como aquellos que intervienen en el tratamiento biológico y el de los organismos utilizados como indicadores de polución. En seguida se definen las principales características biológicas:

- a) Microorganismos:** Los principales grupos de organismos presentes tanto en aguas residuales como superficiales se clasifican en organismos eucariotas, eubacterias y arqueobacterias. La mayoría de los organismos pertenecen al grupo de las eubacterias. La categoría protista, dentro de los organismos eucariotas, incluye las algas, los hongos y los protozoos. Las plantas tales como los helechos, los musgos, las plantas hepáticas y las plantas de semilla están clasificadas como eucariotas multicelulares. Los vertebrados y los invertebrados están clasificados como animales eucariotas multicelulares. Los virus, también presentes en el agua residual, se clasifican en función del sujeto infectado.
- b) Bacterias:** Las bacterias se pueden clasificar como eubacterias procariotas unicelulares. En función de su forma, las bacterias pueden clasificarse en cuatro grandes grupos: esferoidales, bastón, bastón curvado y filamentosas. Las bacterias esferoidales, que reciben el nombre de cocos, tienen un diámetro aproximado de entre 1 y 3 micras. Las bacterias de forma de bastón, conocidas como bacilos, tienen tamaños muy variables, entre 0.5 y 2 micras de ancho por entre 1 y 10 micras de largo. Las bacterias del tipo de bastón curvado tienen dimensiones que pueden variar entre 0.6 y 1.0 micras de ancho por entre 2 y 6 micras de longitud. Las bacterias con forma de espiral pueden alcanzar longitudes del orden de las 50 micras, mientras que las filamentosas pueden llegar a superar las 100 micras. El papel que desempeñan las bacterias en los procesos de descomposición y estabilización de la materia orgánica, tanto en el marco natural como en las plantas de tratamiento, es amplio y de gran importancia.
- c) Hongos:** Los hongos son protistas eucariotas aerobios, multicelulares, no fotosintéticos y quimioheterótrofos. Muchos de los hongos son saprófitos; basan su alimentación en materia orgánica muerta. Juntos con las bacterias, los hongos son los principales responsables de la descomposición del carbono en la biosfera. Desde el punto de vista ecológico, los hongos presentan ciertas ventajas sobre las bacterias: pueden crecer y desarrollarse en zonas de baja humedad y en ámbitos con pH bajos. Sin la colaboración de los hongos en los procesos de

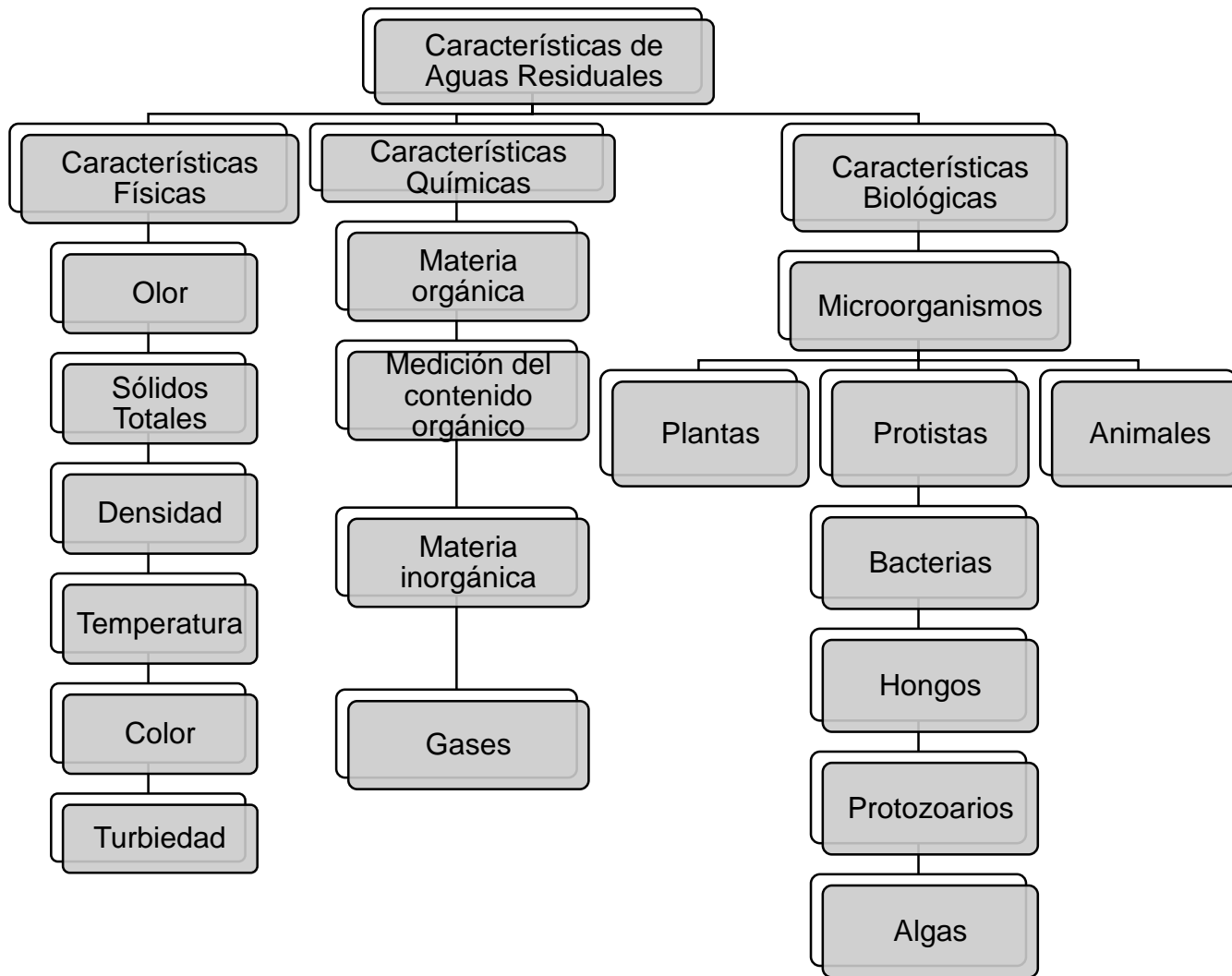
degradación de la materia orgánica el ciclo del carbono se interrumpiría en poco tiempo, y la materia orgánica empezaría a acumularse.

- d) Algas:** Las algas pueden presentar serios inconvenientes en las aguas superficiales, puesto que pueden reproducirse rápidamente cuando las condiciones son favorables. Este fenómeno, que se conoce con el nombre de crecimiento explosivo, puede conducir a que ríos, lagos y embalses sean cubiertos por grandes colonias flotantes de algas. Los crecimientos explosivos son característicos de los llamados lagos eutróficos, que son lagos con gran contenido en compuestos necesarios para el crecimiento biológico. Puesto que el efluente de las plantas de tratamiento del agua residual suele ser rico en nutrientes biológicos, la descarga del efluente en los lagos provoca su enriquecimiento y aumenta su tasa de eutrofización. En los ríos pueden producirse efectos análogos. La presencia de algas afecta al valor del agua de abastecimiento, ya que puede originar problemas de olor y de sabor. En cuanto a los usos del agua relacionados con el ocio, las algas también pueden alterar el valor de las aguas superficiales debido al crecimiento de ciertas especies de peces y formas de vida acuáticas.
- e) Protozoos:** Los protozoos son microorganismos eucariotas cuya estructura está formada por una sola célula abierta. La mayoría de los protozoos son aerobios o facultativamente quimioheterótrofos anaerobios, aunque se conocen algunos anaerobios. Los protozoos de importancia para el ingeniero sanitario son las amebas, los flagelados y los ciliados libres y fijos. Los protozoos se alimentan de bacterias y otros microorganismos microscópicos. Tienen una importancia capital, tanto en el funcionamiento de los tratamientos biológicos como en la purificación de cursos de agua ya que son capaces de mantener el equilibrio natural entre los diferentes tipos de microorganismos. Ciertos protozoos son también patógenos.
- f) Plantas y animales:** Las diferentes plantas y animales tienen tamaños muy variados: desde los gusanos y rotíferos microscópicos hasta crustáceos macroscópicos. El conocimiento de estos organismos resulta útil a la hora de valorar el estado de lagos y corrientes, al determinar la toxicidad de las aguas residuales evacuadas al medio ambiente, y a la hora de determinar la efectividad de la vida biológica en los tratamientos secundarios empleados para destruir los residuos orgánicos.
- g) Virus:** Los virus son partículas parasíticas formadas por un cordón de material genético ácido desoxirribonucleico (ADN) o ácido ribonucleico (RNA) con una capa de recubrimiento proteínico. No tienen capacidad para sintetizar compuestos nuevos. En lugar de ello, invaden las células del cuerpo vivo que los acoge y reconducen la actividad celular hacia la

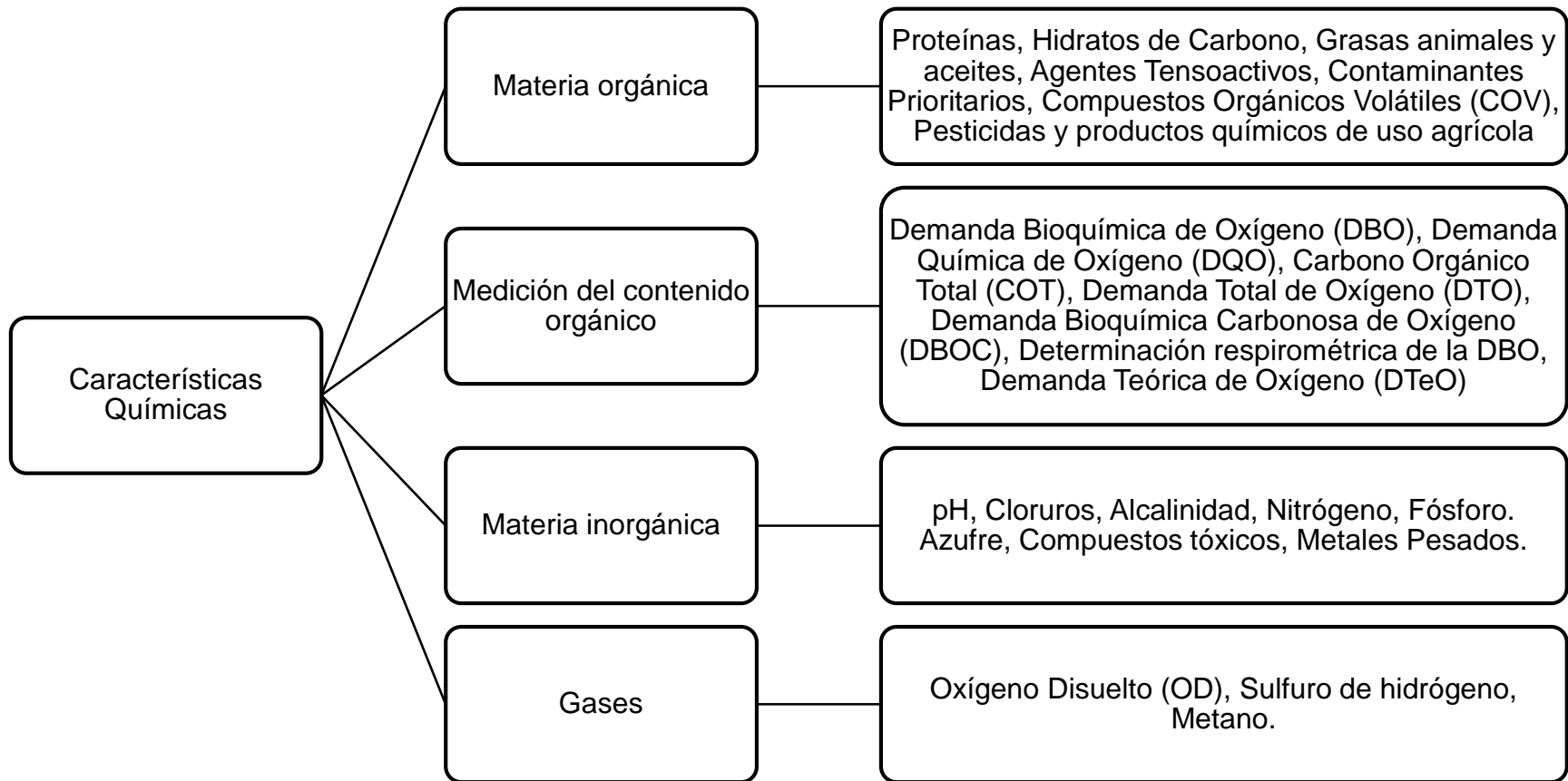
producción de nuevas partículas virales a costa de las células originales. Cuando muere la célula original, se liberan gran cantidad de virus que infectarán células próximas.

El proceso de curtición por tratarse de una actividad muy antigua y arraigada en muchas ciudades, en su gran mayoría sus industrias se localizan en el interior de las poblaciones. Por consiguiente, las industrias deben realizar los correspondientes pretratamientos, cuya implantación se ve dificultada por la falta de espacio físico o la aplicación de nueva tecnología para lograr procesos más limpios (Cury Regino, 2004).

En forma general las características de las aguas residuales se presentan en la Figura 2.1 y las características químicas que pueden analizarse en el laboratorio se desglosan en la Figura 2.2 según la información presentada en esta sección.



**Figura 2.1** Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales.



**Figura 2.2** Características químicas de las aguas residuales.

En la industria de las curtiembres se manejan residuos sólidos, líquidos y gaseosos. Los residuos sólidos se producen tanto en la curtición como en los productos terminados e influyen en la caracterización de los residuos líquidos producidos. Se consideran de mayor interés: la sal utilizada en la conservación de las pieles hasta su tratamiento, el pelo, los descarnes (crudos y apelmbrados) y los lodos. Algunos gases están relacionados con los procesos químicos que se utilizan en esta industria (Corredor Rivera, 2006).

Para que la piel en bruto se transforme en cuero acabado se utilizan cantidades importantes de agua, que varían de acuerdo al tipo de piel, su estado de conservación y el tipo de curtición aplicada. Además, cabe resaltar que el volumen y la calidad de las aguas residuales de una curtiembre varía ampliamente de una empresa a otra; diferenciándose básicamente de si se realiza todo el proceso de producción a partir de la piel en bruto hasta una fase intermedia o hasta finalizar con la piel acabada, o si reciben las pieles parcialmente elaboradas para finalizar las piezas. Es decir, el curtidor puede recibir la piel en tripa, piqueladas, en wet-blue o en pasta. En cada uno de los casos, los volúmenes de agua y productos químicos aplicados son muy diferentes; por lo tanto, las aguas residuales obtenidas, serán también muy diferentes en cuanto a calidad y caudal. Se estima que una curtiembre, que trabaja con piel pequeña y aplica un completo proceso de fabricación, utiliza alrededor de 200 litros de agua por cada kg de piel, la polución del agua residual obtenida en el proceso de curtición puede ser originada por una contaminación inherente a la propia piel, o por un exceso de productos químicos añadidos durante la transformación de la piel.

Teniendo en cuenta las grandes fluctuaciones en la naturaleza de los residuos de las curtiembres, se puede diferenciar 3 tipos:

- a) Proteínas y residuos de la propia piel separada de la res en el matadero.
- b) Sustancias minerales aplicadas para la conservación de la piel.
- c) Productos añadidos durante el proceso de fabricación.

Un aspecto importante a tener en cuenta para determinar las características de las aguas residuales es que, parte de la contaminación que generan las curtiembres procede de la propia piel, es decir, que cuando la piel en bruto llega a la industria de curtido procedente del matadero trae adheridos una cantidad significativa de residuos de los cuales se pueden mencionar el estiércol, restos de sangre, arena y también proteínas globulares y queratinas que contienen la piel en bruto que solubilizan en las etapas iniciales del proceso (Cury Regino, 2004).

Cuando se analizan los residuos líquidos de las curtiembres, diferentes autores manejan con diferentes conceptos cuáles son las variables que se deben considerar con mayor interés (Corredor Rivera, 2006). Realmente es muy difícil caracterizar las

aguas residuales de las curtiembres dado su diversidad tanto en cantidad como en calidad, en cada proceso y en cada etapa del mismo, pero se ha demostrado que tienen en común una elevada cantidad de materias en suspensión que corresponden a fibras y proteínas precipitadas.

Para tener un conocimiento fundamental del agua residual industrial se debe identificar el efluente, caracterizarlo en forma cualitativa y cuantitativa, destacando los parámetros relevantes de caracterización (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2007):

- ❖ Composición y concentración (mg/L, g/m<sup>3</sup>):
  - ✓ Sólidos, DBO<sub>5</sub>, DQO, pH, Temperatura, etc.
- ❖ Volumen (m<sup>3</sup>, L).
- ❖ Caudal (m<sup>3</sup>/h, L/min).
- ❖ Carga:
  - ✓  $Carga \times producción (kg/ton_{\text{cuero crudo}}) = Q (m^3/ ton_{\text{cuero crudo}}) * C(kg/m^3)$ .

La composición de las aguas residuales de las tenerías es difícil de predecir, sin un estudio previo, ya que los efluentes son diferentes según sean los tipos de piel manipuladas y la tecnología aplicada. Como característica general se puede indicar que poseen un elevado contenido en proteínas, conjuntamente con importantes restos de productos químicos. En la Tabla 2.1 se muestra una comparación de la caracterización fisicoquímica de las aguas generadas en el proceso de curtiembre para la operación de curtido ya sea al cromo o vegetal; mientras que en la Tabla 2.2 se muestra la caracterización fisicoquímica para cada una de las operaciones en el procesamiento de pieles.

**Tabla 2.1** Características Fisicoquímicas de los efluentes del Sector Curtiembre en la Operación de Curtido.

<b>Parámetro/ Tipo de Curtido</b>	<b>Curtido Vegetal (mg/litro)</b>	<b>Curtido al Cromo (mg/litro)</b>
DBO <sub>5</sub>	1000	900
DQO	3000	2500
Sulfuro de amonio	160	160
Sulfato de cromo	2000	2000
Cloruro de sodio	2500	2500
Nitrógeno Total	120	120
Aceites y grasas	200	200
Fósforo	1	1
Cromo 3+		70

continúa



**Tabla 2.1** Características Físicoquímicas de los efluentes del Sector Curtiembre en la Operación de Curtido (continuación).

<b>Parámetro/ Tipo de Curtido</b>	<b>Curtido Vegetal (mg/litro)</b>	<b>Curtido al Cromo (mg/litro)</b>
Sólidos Totales	10000	10000
Sólidos Suspendidos	1500	1500
Sólidos Sedimentables	50	100
pH	9	9
Ceniza Total	6000	6000

Fuente: Muñoz García et al., (2005).

La carga contaminante procede, en parte de los productos químicos adicionados en el proceso. La contaminación del agua puede tener dos orígenes:

- a) **Contaminación del agua por vía Intrínseca:** Esta es debido a la propia constitución de la piel, y trata sobre los componentes de la piel que no se aprovechan. Parte de los mismos son insolubles y constituyen los residuos sólidos o materiales de desecho, y la otra parte que es soluble pasa a formar parte del agua.
- b) **Contaminación del agua por vía extrínseca:** Es debida a los distintos productos químicos que son necesarios para el proceso y que en mayor o menor medida pueden pasar a formar parte de las aguas residuales o emisiones gaseosas. Estos compuestos son distintos para diferentes tipos de piel.

En general en El Salvador el sector curtiembre de pieles a través de la Asociación de Teneros de El Salvador ha realizado grandes esfuerzos para mejorar su proceso productivo y que esta sea más amigable con el medio ambiente, en el año 2003 dicha asociación trabajó con el Centro Nacional de Producción Más Limpia de El Salvador en la implementación de un proyecto denominado “Calendario la Empresa Eficiente” el cual tenía por objetivo primordial trabajar mes a mes en una mejor gestión ambiental de sus recursos, materias primas y mejor manejo de sus desechos.

En la Tabla 2.2 se muestran los resultados de la caracterización de las aguas de las diferentes etapas que comprenden el procesamiento de pieles, realizado en El Salvador en el año 2003 por Santos C., para la Asociación de Teneros de El Salvador (ATES). Las aguas residuales de la industria de curtido tienen altas concentraciones de materia orgánica, compuestos de nitrógeno, sulfuros, pH variable que puede ser ácido en algunas etapas o básico en otras, sólidos suspendidos y compuestos de cromo.

**Tabla 2.2** Resumen de parámetros fisicoquímicos obtenidos en el sector de curtiembre de pieles de El Salvador.

<b>Operación</b>	<b>pH</b>	<b>DBO<sub>5</sub></b>	<b>DQO</b>	<b>DBO/DQO</b>	<b>Sulfuro</b>
Remojo	7-9	9100	16900	0.54	60
Pelambre	12	2500	22500	0.11	2500
Desencalado	7-8	1625	8900	0.18	350
Curtido	4	>1000	>2500	0.4	>100
Re-curtido					
Engrase-teñido	4	10520	12675	0.82	85
Promedio	5-7	5950	15250	0.4	750

Fuente: Muñoz García et al., (2005).

La alta carga de materia orgánica provoca la creación de condiciones anaerobias de biodegradación, debido al elevado consumo de oxígeno disuelto. Estas condiciones, además de afectar la vida acuática, favorecen la producción de algunos gases nocivos como el hidrógeno sulfurado, dióxido de carbono y metano.

Algunos residuos líquidos poseen un valor de pH de carácter básico (entre 9 y 11) y sulfatos. Estos residuos cuando son descargados directamente a los sistemas de alcantarillado los cuales producen corrosión en las cañerías. Por otro lado, la presencia en los efluentes de compuestos sulfurados puede provocar la producción de sulfuro de hidrógeno gaseoso, al mezclarse este efluente alcalino con otros efluentes ácidos o neutros en el alcantarillado.

En la Tabla 2.3 se muestra el tipo de contaminantes y los residuos líquidos del proceso de curtiembre de pieles que se producen en las operaciones consideradas como las más contaminantes, las cuales son: operación de Ribera, Curtido, Tintura y Engrase.

**Tabla 2.3** Efluentes líquidos del proceso de curtiembre de pieles.

<b>Operación Básica</b>	<b>Ribera</b>	<b>Curtido</b>	<b>Tintura y Engrase</b>
<b>Parámetro</b>			
Caudal (m <sup>3</sup> )	18	7	5
pH	11-13	6-7	4-5
DQO (ppm)	5000	500-900	500-900

Fuente: Muñoz García et al., (2005).

Desde su origen, los suministros de agua se clasifican en tres categorías: aguas superficiales, aguas subterráneas y aguas meteorológicas. Desde el punto de vista del tratamiento de las aguas residuales, estas pueden ser las aguas utilizadas por el hombre para cubrir sus necesidades, o las aguas que se han emitido como residuos líquidos después de su utilización. El agua pura no se encuentra en forma natural. Cuando el agua entra en contacto con el aire, suelo, o el hombre, adquiere impurezas y se contamina; lo que ocasiona enfermedades y perjuicios al ser humano.

El agua que ha sido retirada y retornada, estará contaminada de un modo u otro. El agua de retorno agrícola contiene pesticidas, fertilizantes y sales; el retorno municipal arrastra desechos humanos, farmacéuticos y detergentes; las centrales eléctricas descargan agua que está a temperaturas elevadas. De todos ellos, el sector industrial contribuye con contaminantes químicos y de residuos orgánicos.

Los contaminantes del agua en función a la calidad o las características del agua se clasifican en físicos, químicos y biológicos. Estas impurezas por lado de las características químicas deben su origen a contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Los contaminantes orgánicos dan como resultado la disminución del oxígeno, producto de la degradación biológica de los compuestos. En el caso de los contaminantes inorgánicos, el resultado es su posible efecto tóxico.

La degradación biológica de sustancias orgánicas produce ácidos grasos, carbohidratos, aminoácidos e hidrocarburos; y las sustancias inorgánicas en el caso de metales tóxicos, de material particulado como arcillas y sedimentos; y de microorganismos como bacterias y protozoos.

Los metales tóxicos son constituyentes naturales de la corteza de tierra; no pueden ser degradados o ser destruidos. Todos los suelos poseen metales pesados como consecuencia de los procesos geológicos y edafogenéticos. Los metales pesados son bioacumulables, porque alcanzan concentraciones más altas comparadas con la de otros metales que normalmente se acumulan en el medio ambiente.

A través de la cadena trófica, los metales tóxicos se van acumulando en los tejidos y músculos de los seres vivos, debilitando las defensas y provocando una serie de enfermedades; llegando en los seres humanos a provocar lesiones graves, inclusive la muerte (Raffo Lecca y Ruiz Lizama, 2014).

En la Tabla 2.4 se presentan los contaminantes químicos y biológicos según las características del agua.

**Tabla 2.4** Contaminantes químicos y biológicos.

<b>Químicos</b>	Químicos corrientes	Metales tóxicos, como el hierro, manganeso, plomo, mercurio, arsénico, cadmio, cobre, entre otros.
		Compuestos nitrogenados, como amoníaco, nitrato y nitrito, carbonato o bicarbonato de calcio y magnesio.
		Aniones, como fluoruro, sulfato y silicatos.
		Sustancias orgánicas.
	Carácter antropogénica	Cianuros y fenoles.
<b>Biológicos</b>	Bacteria	Salmonella typhi, leptospira, escherichia coli, yersinia, vibrio cholerae, Shigella.
	Virus	Adenovirus, rotavirus.
	Hongos	Aspergillus fumigatus, candida albicans.
	Helmintos	Ascaris lumbricoides, fasciola hepatica, Taenia saginata, trichuris trichura.

Fuente: Raffo Lecca y Ruiz Lizama, (2014).

## 2.2. Impacto ambiental por efluentes industriales.

Los recursos hídricos están continuamente expuestos a la contaminación, por ser un medio comúnmente empleado como conducto para hacer desaparecer los desechos producto de todo tipo de actividades, aprovechando el enorme poder de biodegradación de las aguas; sin considerar que al superar ciertos límites de concentración de sustancias orgánicas y químicas las aguas no pueden regenerarse bajo los efectos de las bacterias; es posible que esta tendencia se ha generalizado puesto que para una cantidad de contaminantes dada, cuanto mayor sea la cantidad de agua receptora, mayor será la dilución de los mismos, y la pérdida de calidad será menor lo cual sería razonable de no ser porque las consecuencias

de la contaminación de las aguas aparecen de manera más directa y suelen ser más graves que las provocadas en el medio atmosférico, dado que se trata de un medio receptor más limitado.

Es muy claro que las aguas residuales son un producto inevitable de la actividad humana, su volumen, composición y condiciones de calidad, varían de acuerdo al tipo de actividad en la cual se originan.

En cuanto a la actividad industrial se considera que es uno de los mayores depredadores del medio ambiente, donde el agua juega un papel fundamental por ser la sustancia más ampliamente empleada ya sea como parte del producto (materia prima) o como insumo de producción; es así como en una región con un alto desarrollo en este aspecto pueden predominar compuestos inorgánicos, poco biodegradables (metales pesados, plaguicidas, sólidos, entre otros), presentándose de acuerdo al tipo de actividad productiva diferentes calidades y cantidades de vertidos según se trate de aguas de lavado, diluciones, calentamientos, refrigeración, entre otros (Cury Regino, 2004).

El curtido de pieles es una actividad que se realiza con el fin de mejorar las propiedades de las pieles provenientes de especies animales. Para su tratamiento se usan sustancias químicas nocivas como hidrocarburos aromáticos policíclicos, sustancias halogenadas, metales pesados, taninos, azufre, entre otras, esto produce residuos tóxicos y materia orgánica como pelos y sangre. Esta industria se distingue por verter a las fuentes superficiales las cargas significativas de DBO y DQO, reduciendo el oxígeno disuelto presente en estos efluentes (Cuesta-Parra, Velazco-Rincón y Castro-Pardo, 2018).

A nivel mundial se reconoce esta industria como altamente contaminante produciendo degradación ambiental muchas veces de carácter irreversible, independientemente del tamaño de la industria teniendo en cuenta sus impactos cualitativos y cuantitativos sobre las componentes físico-biótica y socioeconómica.

En la componente física los residuos de las curtiembres causan sobre el agua efectos negativos disminuyendo la presencia de oxígeno disuelto, aumenta la salinidad (Corredor Rivera, 2006); un impacto medioambiental, difícil de corregir en las aguas residuales de curtiembre es su alta salinidad. La principal contribución a la salinidad del efluente es originada por la sal empleada para la conservación (la cual se estima en un 20% de su peso) de la piel tras el desuello, a esta se suman los minerales aplicados durante el piquelado. Estos últimos representan un 30% de los cloruros presentes en el efluente (Cury Regino, 2004). Y otros efectos, es más grave sobre las aguas subterráneas debido a la falta de aireación. En el suelo altera su textura y estructura, especialmente en relación con su porosidad, con la consecuente aceleración de la erosión, disminución de la productividad agrícola y

pérdida de la permeabilidad. Al ocupar los residuos líquidos los vacíos del suelo, especialmente las grasas y aceites, se altera la aireación y el flujo del agua en el medio poroso alterando las condiciones de drenaje, se transportan entonces en forma lenta los contaminantes a las zonas de recarga tanto de aguas superficiales como subterráneas.

La calidad del aire se afecta especialmente por la producción de olores y gases, causados por la descomposición de la materia orgánica y la reacción de algunos agentes químicos utilizados en las curtiembres con el aire, tal es el caso de los sulfuros que pueden generar la producción de gas sulfhídrico, el cual en pequeñas cantidades se identifica por su mal olor, pero en concentraciones mayores es tóxico, el amoníaco utilizado también es generador de malos olores.

Sobre la componente biótica es innegable el efecto negativo sobre la vida acuática, destruye casi y completamente la microbiota que constituye la base de la vida de algunas especies superiores como micro y macroinvertebrados y por ende las especies de peces. Así mismo se genera el desplazamiento de anfibios y especies mayores que disponen de estas fuentes como abrevaderos. Adicionalmente se rompe la cadena de procesos de autodepuración natural de las corrientes de agua debido a la disminución del oxígeno disuelto y la afectación sobre las especies vegetales vecinas al cauce de las corrientes superficiales receptoras, algunas de las cuales no están capacitadas para el manejo de los contaminantes presentes en el agua, entre otros (Corredor Rivera, 2006).

En referencia a los productos añadidos durante el proceso de fabricación, algunos autores consideran que las curtiembres que trabajan con piel grande salada y utilizan extractos vegetales, generan alrededor de unos 30 litros de agua residual por cada kilogramo de piel salada en bruto. A su vez, las industrias que utilizan el proceso de fabricación completo, pero curten con sales de cromo, producen unos 40 litros de agua residual por cada kilogramo de piel salada en bruto. La curtición al cromo pese a ser la técnica más usada también representa una parte importante de la contaminación de las aguas, puesto que alrededor de un 15% de este mineral añadido al baño de curtición no se fija a la piel.

Estudios realizados han demostrado que el residuo de una curtiembre incluyendo lavados, tiene un alto contenido de sólidos (6000 a 8000 ppm) de los cuales aproximadamente la mitad son cloruro de sodio (3000 ppm), además contiene 900 ppm de DBO, 1600 ppm de dureza total, 120 ppm de sulfuro, 1000 ppm de proteína y de 30 a 70 ppm de cromo; residuos que algunas industrias vierten a los efluentes sin aplicarle ningún tipo de tratamiento como actualmente lo están haciendo en muchos países.

El sector industrial en la mayoría de países está orientado a uso intensivo de los recursos, muchas veces irracional, y no en la eficiencia de su utilización; pero es bueno considerar que la industria desempeña un papel clave para la promoción del desarrollo sostenible, no solo como un simple muelle para el crecimiento económico sino porque genera los recursos gerenciales, técnicos y económicos que tornan factible la solución de los problemas ambientales.

En términos generales, se puede decir que todas las aguas residuales industriales afectan de algún modo la vida normal de una corriente; pero solo cuando este efecto es suficiente para hacer que la corriente no sea aceptable para su mejor utilización se dice que está contaminada. Sin embargo, estudios realizados en países desarrollados han demostrado que concentraciones aún por debajo de los promedios diarios fijados por la normatividad ambiental han causado serias afecciones a la salud de las personas y en algunos casos la muerte, de ahí la importancia de la aplicación de programas de monitoreo en centros urbanos medianos y altamente desarrollados a nivel industrial y agroindustrial, pero sobre todo de la implantación de sistemas de tratamiento de aguas residuales o de alternativas tecnológicas que se ajusten a las necesidades de tratamiento del efluente, según el uso de la fuente receptora y la capacidad económica del productor.

Las grandes fluctuaciones en la naturaleza de los residuos de las curtiembres debidas a descargas intermitentes hacen que sean difíciles de tratar, especialmente en combinación con las aguas residuales urbanas. Además, los efluentes de las curtiembres han sido considerados entre los de mayor complejidad dada la composición y origen de los contaminantes que contiene.

Las aguas residuales mal manejadas no solo impactan la vida acuática, sino que principalmente afectan la salud humana, además estas influyen de manera negativa en áreas con alto potencial turístico y recreativo dificultando el desarrollo de proyectos generadores de recursos en este sector. Para evitar los problemas que pueden causar los contaminantes de las aguas residuales, existen sistemas de depuración que sirven para devolverles las características físicas y químicas originales (Cury Regino, 2004).

En la componente socioeconómica se observa un efecto positivo que es la generación de empleo. Sin embargo, los principales efectos negativos corresponden a la elevada dificultad para utilizar las aguas contaminadas por estos residuos en el abastecimiento de agua potable, dado los altos costos que implica su tratamiento. Otro efecto de alta relevancia es su influencia sobre la salud tanto en el proceso productivo debido al manejo de los insumos utilizados sin las debidas normas de seguridad industrial como por los productos y subproductos entregados al medio ambiente. Tienen especial interés las enfermedades de la piel (dermatitis),

sistema respiratorio (inhalación de gases) y sistema digestivo (úlceras) (Corredor Rivera, 2006).

En Tabla 2.5 se presenta la identificación de los impactos ambientales por los efluentes industriales de curtiembres según el proceso llevado a cabo.

**Tabla 2.5** Identificación de impactos ambientales.

<b>Actividad</b>	<b>Impactos ambientales cualitativos</b>
Remojo	Consumo de agua, modificación a las condiciones físico-químicas del recurso, en el proceso se genera ruido por los motores de los bombos y hay afectación a la salud por residuos líquidos, la actividad produce activación de la economía.
Pelambre	En la actividad de pelambre se presenta consumo de agua, modificación a las condiciones fisicoquímicas del recurso, producción de residuos peligrosos como lodos con sustancias químicas, envases y contenedores, el ruido se produce por los motores de los bombos y hay afectación a la salud por el tipo de sustancias a las que se expone el personal, la actividad produce activación de la economía.
Descarnado	En esta actividad se generan residuos sólidos y peligrosos, biológicos como el colágeno y residuos de la separación de las capas de la piel (material orgánico), la presencia de material particulado es evidente en la operación, al igual que los olores por el contenido de sulfuros en el proceso, hay afectación a la salud por el tipo de sustancias a las que se expone el personal.
Dividido	En el dividido se generan residuos sólidos que son dispuestos como ordinarios.
Desencalado y purga	En el desencalado se consume agua y son usados ácidos orgánicos que producen residuos líquidos y peligrosos, además de emisiones de nieblas ácidas, ruido, afectación a la salud del personal expuesto.
Piquelado	En el piquelado utilizan sustancias químicas similares a las etapas anteriores y el consumo de agua es equivalente, los impactos generados son la producción de residuos líquidos y peligrosos, emisiones atmosféricas, ruido.
Curtido	En el curtido se usan sales de cromo, lo que genera transformación en la calidad del agua, residuos peligrosos, emisiones de metales pesados, ruido, afectación secundaria a suelos y ecosistemas.

continúa



**Tabla 2.5** Identificación de impactos ambientales (continuación).

Actividad	Impactos ambientales cualitativos
Rebajado	En esta actividad no se usa agua, hay consumo de energía eléctrica y producción de residuos sólidos, retazos de la materia prima, virutas, estos son entregados como residuos ordinarios.
Neutralizado	En la actividad de neutralizado se usan sales de sodio, las cuales reducen la acidez del agua, en este caso específico los residuos líquidos contienen sólidos disueltos que aumentan la DQO, residuos peligrosos, se produce ruido en la operación y hay afectación indirecta a ecosistemas y suelo.
Recurtido	En el recurtido se repiten las operaciones de curtido, se usan sales de cromo, hay modificación en la calidad del agua vertida, se producen residuos peligrosos, emisiones de metales pesados, ruido, afectación secundaria a suelos y ecosistemas.
Teñido y Engrasado	En esta operación unitaria se aplican grasas y aceites vegetales, se producen residuos peligrosos y afectación a la salud y al medio por contaminación física, hay ruido producido por el compresor y consumo de energía eléctrica.
Secado	Durante el secado son emitidos al medio gases, olores y vapores procedentes del secado, consumo de energía eléctrica.
Pintado y planchado	En el uso de pigmentos y colorantes para los procesos de teñido, se generan emisiones atmosféricas, residuos peligrosos, residuos sólidos de retazos y virutas de material terminado.

Fuente: Cuesta-Parra et al., (2018).

Así mismo se pueden identificar otros impactos ambientales del proceso de producción del curtido de cueros centrado en (Greenpeace, 2013):

- i. La utilización del metal pesado cromo (III) con la posible oxidación a cromo (VI). El cromo y sus formas son difícilmente biodegradables, por lo cual son una carga para el ambiente debido a su persistencia, acumulación en el tiempo y efectos impredecibles sobre la vida acuática. En el caso del cromo (VI) es un comprobado cancerígeno humano.
- ii. El proceso de biodegradación de materia orgánica descargada en efluentes consume el oxígeno disuelto del cuerpo de agua receptor, que junto a un alto contenido de sales y ácidos (por ejemplo: cloruro de sodio, ácidos sulfúrico y fórmico), provocan la muerte de la vida acuática y las funciones naturales de los ríos.
- iii. El sulfuro, que se utiliza para eliminar el pelo o el pelambre, cuando se transforma en ácido sulfhídrico es extremadamente nocivo para la salud. Bastan 20 – 50 ppm en el aire para causar un malestar agudo que conlleva a

sofocación y a muerte por sobreexposición. La toxicidad del ácido sulfhídrico es semejante a la del ácido cianhídrico. A partir de 50 ppm, en las células receptoras del olfato provoca un efecto narcotizante, y las personas afectadas ya no perciben el hedor. Por encima de las 100 ppm puede ocurrir la muerte.

- iv. La inadecuada disposición de los residuos (pelo, recortes y virutas de cuero, barros, restos de pinturas y envases) los cuales quedan inutilizables para compostaje u otros métodos de aprovechamiento y/o disposición, como consecuencia del uso intensivo de químicos.
- v. Luego del curtido, dependiendo del artículo final deseado, serán teñidos y/o re-curtidos. La variedad de calidades, brillo, textura, flexibilidad y color es muy amplia y para cada una existe un tratamiento distinto. La etapa de terminación involucra una cantidad de sustancias químicas, como por ejemplo, ciertos pigmentos que contienen metales pesados (Plomo, Cadmio, Cromo, etc.); productos químicos fluorados y polímeros que le dan repelencia al agua y la suciedad; ésteres de ftalato, algunos de los cuales pueden ser disruptores endocrinos, utilizados como plastificantes en el acabado de las películas; compuestos orgánicos de estaño como catalizadores para las películas de poliuretano y desengrasantes como el percloroetileno y tricloroetileno, ambos altamente tóxicos.
- vi. Además, las curtiembres suelen utilizar solventes (Compuestos Orgánicos Volátiles – VOC's) en operaciones de acabado, terminación de los cueros, limpieza en seco y desengrasado. Algunos de los compuestos químicos utilizados son: acetato de butilo, etilacetato, acetona, ciclohexanona, alcohol isopropílico, metiletilcetona (2- butanona), 2-pentanona, acetato de etilo, ciclohexano, diisobutilcetona (DIBK), xileno, metil isobutilcetona (MIBK), tolueno, etilbenceno. En general, el uso de estas sustancias está restringido en diversa normativa internacional en virtud de sus efectos perjudiciales al ambiente y la salud.
- vii. Uso ineficiente del agua: aproximadamente 1000 litros por cuero empleados de modo ineficiente, generan grandes volúmenes de efluentes vertidos diariamente.

### **2.3. Métodos de tratamiento para la eliminación de metales en efluentes industriales.**

Dados los efectos que tienen los metales pesados sobre todo tipo de organismos y su poder de persistencia, acumulación y movilidad a lo largo de la cadena alimentaria, es preciso llevar a cabo su eliminación de los efluentes previo a la descarga de estos. Gracias a presiones económicas y sociales, las industrias centran sus esfuerzos en minimizar la carga contaminante de sus vertidos y en proceder a su reciclado o reutilización en la medida de lo posible. El tratamiento de

los efluentes de una industria es un proceso complejo que a veces llega a serlo más incluso que cualquiera de los procesos productivos que en ella tienen lugar. Ello se debe a que las aguas residuales suelen tener una composición muy variable en cuanto a compuestos orgánicos o inorgánicos, acidez o basicidad, presencia de volátiles, etc. Los aspectos que se suelen tener en cuenta a la hora de elegir el tratamiento o tratamientos a dar a un efluente son los siguientes: efectividad en la eliminación, bajo coste económico, flexibilidad en cuanto a cargas a tratar, tanto volumétricas como de composición y mínimas necesidades de supervisión y mantenimiento (Sánchez Pina, 2014).

La clasificación de los métodos de tratamiento de metales pesados en las aguas residuales depende de diferentes factores, se han clasificado como convencionales, refiriéndose a los métodos que habitualmente se emplean para la remoción de estos contaminantes y las no convencionales, aquellas que corresponden a procesos innovadores para la eliminación de metales en aguas residuales generalmente de origen industrial (Caviedes Rubio, Muñoz Calderón, Perdomo Gualtero, Rodríguez Acosta y Sandoval Rojas, 2015).

### **2.3.1. Métodos convencionales para el tratamiento de aguas residuales.**

A continuación, se realiza una breve descripción de algunos de los métodos convencionales para la eliminación de metales pesados en las aguas residuales:

#### **A. Precipitación química.**

La precipitación química radica en agregar sustancias adecuadas que generan la precipitación de sustancias no deseables e insolubles de las aguas residuales, este proceso consiste en agregar una sustancia que reaccione directamente con la sustancia que nos importa, proporcionando como resultado un material insoluble que se precipita (Ordoñez Vinuesa y Moreno Farfán, 2013).

Los tratamientos que se emplean más comúnmente en el tratamiento de agua tienen por finalidad la precipitación de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y la precipitación de hidróxidos metálicos.

En cuanto a la precipitación de hidróxidos metálicos, se utiliza esencialmente para la eliminación de metales pesados (cadmio, cobre, níquel, cinc, hierro, etc.) que se encuentran principalmente en los vertidos de talleres de tratamiento de superficies. Estos metales tienen la propiedad común, siempre que no se encuentren formando complejos, de precipitar en forma de hidróxidos o incluso de hidrocarbonatos, en una zona de pH característica de cada uno de ellos. De forma general, si el pH del medio se fija entre 8.5 y 9.5, la concentración de estos metales en la disolución permanece dentro de límites tolerables. Como reactivos de precipitación se emplean habitualmente  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , sales de bario, entre otras (Sánchez Pina, 2014).

Es el método más utilizado en los procesos industriales ya que es relativamente sencillo de operar, económico y selectivo; aunque su mantenimiento es costoso debido a la alta generación de lodos (Caviedes Rubio et al., 2015). Su contenido en compuestos tóxicos, dificulta su posterior tratamiento y evacuación.

### **B. Ósmosis inversa (Sánchez Pina, 2014).**

La ósmosis inversa es un proceso que consiste en el paso de agua desde una disolución salina, a través de una membrana semipermeable, mediante la aplicación de una presión superior a la presión osmótica de la disolución. Se producen dos corrientes, una de agua pura y otra de rechazo de mayor concentración en sales que la original.

Para la ósmosis inversa se utilizan membranas semipermeables, que dejan pasar el agua en tanto que retienen del 90 al 99% de todos los minerales disueltos, del 95 al 99% de la mayoría de los elementos orgánicos, y el 100% de las materias coloidales más finas (bacterias, virus, sílice coloidal, etc.).

Así pues, en ósmosis inversa, las membranas retienen las partículas insolubles y también moléculas o iones disueltos. La acumulación de estos últimos en la proximidad de la membrana da lugar a fenómenos de polarización, y su concentración produce un aumento de la presión osmótica de la disolución a tratar, seguido a veces por fenómenos de precipitación.

Para que el funcionamiento de las unidades de ósmosis inversa sea adecuado, es necesario que el agua que alimenta a las mismas sea de gran calidad. El influente no debe contener materia coloidal, microorganismos, hierro o manganeso. Por ello, es necesario realizar un pretratamiento y un ajuste previo del pH (a un valor comprendido entre 4 y 7.5) del influente, así como una limpieza química periódica de la membrana.

Este método presenta además algunos otros inconvenientes, tales como la escasa experiencia en su aplicación para eliminar metales pesados y su elevado coste. Entre las aplicaciones más habituales de la ósmosis inversa se encuentra: abastecimiento de agua potable o de aguas industriales, producción de agua de elevada calidad y tratamiento de aguas residuales industriales.

### **C. Electrodialisis.**

En este proceso, los iones metálicos se separan mediante el uso de membranas semipermeables de iones selectivas. La aplicación de un potencial eléctrico entre los dos electrodos produce una migración de cationes y aniones hacia los electrodos respectivos. Debido a la separación alternativa de las membranas de cationes y aniones permeables, se forman células de concentrados y sales diluidas (García Barrera, 2016).

Este método tiene la capacidad de remover iones contaminantes cargados de hasta  $0.0001 \mu\text{m}$ , mediante hojas o láminas porosas de resinas de intercambio iónico con una baja permeabilidad relativa para el agua (Caviedes Rubio et al., 2015).

El rendimiento en la eliminación de sólidos disueltos por este método depende de diversos factores, tales como: temperatura del agua residual, corriente eléctrica que se hace circular, tipo y cantidad de iones presentes, selectividad de la membrana, potencial que presente el agua para producir obturaciones e incrustaciones, caudal de agua residual y número y configuración de las etapas empleadas. Los principales inconvenientes de este método podrían resumirse en la imposibilidad de conseguir aguas altamente desmineralizadas y el costo del agua tratada, el cual aumenta rápidamente con la salinidad del agua entrante (Sánchez Pina, 2014).

#### **D. Ultrafiltración.**

Es una clase de filtración por membranas, donde la presión hidrostática impulsa un líquido hacia una membrana semipermeable. Los sólidos suspendidos y los solutos de alto peso molecular son retenidos, mientras que el agua y los solutos de bajo peso molecular atraviesan la membrana (Ordoñez Vinuesa y Moreno Farfán, 2013).

La ultrafiltración es un proceso de fraccionamiento selectivo utilizando presiones de hasta 145 psi (10 bares). La ultrafiltración se utiliza ampliamente en el fraccionamiento de leche y suero, y en fraccionamiento proteico. Concentra sólidos en suspensión y solutos de peso molecular mayor a 1000 umas. El permeado contiene solutos orgánicos de bajo peso molecular y sales (Caviedes Rubio et al., 2015).

#### **E. Métodos electroquímicos (Sánchez Pina, 2014).**

Se basan en la utilización de la corriente eléctrica continua para modificar el estado de oxidación de especies peligrosas y transformarlas en otras menos peligrosas o más fácilmente eliminables del medio, por ejemplo, por deposición sobre los electrodos.

La configuración más sencilla de una celda electrolítica consiste en la utilización de dos electrodos, ánodo y cátodo, sumergidos en una disolución conductora y conectados externamente a través de un circuito eléctrico que incluye una fuente de corriente y un elemento de control. En las interfases electrodo/electrolito tienen lugar los procesos de oxidación-reducción.

A nivel industrial, se aplica fundamentalmente en la recuperación de metales preciosos como oro y plata, debido a su valor intrínseco.

La aplicación más extendida de los procesos electroquímicos al tratamiento de residuos peligrosos consiste en la reducción de constituyentes metálicos presentes

en medios acuosos para depositar finalmente el metal en el cátodo. Una de las mayores limitaciones de los procesos electroquímicos es la necesidad de trabajar con bajas concentraciones metálicas.

La aplicación de estos procesos electroquímicos al tratamiento de compuestos metálicos permite, por una parte, reducir la concentración de los metales presentes al objeto de minimizar el impacto ambiental de la descarga o vertido de los residuos, y por otra parte recuperar los mismos posibilitando su reciclado.

#### **F. Humedales artificiales (Sánchez Pina, 2014).**

Este método explota la capacidad de diversas plantas y organismos acuáticos para retirar metales pesados y otros contaminantes presentes en aguas residuales.

Los humedales constan de una capa de agua que cubre el suelo, gran cantidad de vegetación a diferentes niveles (sumergida, flotante y emergente) y aguas subterráneas más o menos próximas a la superficie. A través de diferentes procesos, los microorganismos del suelo y de los rizomas de las plantas degradan la materia orgánica, las plantas asimilan y retienen los nutrientes y los metales del agua quedan retenidos en los materiales del suelo y en el tejido vegetal.

Entre las plantas acuáticas empleadas para la eliminación de metales pesados tenemos a la *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua), *Azolla pinnata*, *Phragmites australis*, *Scirpus lacustris*, etc.

#### **G. Coagulación-Floculación (Caviedes Rubio et al., 2015).**

Es el método mediante el cual se logra desestabilizar el coloide y aglomerar posteriormente. En la primera etapa la coagulación elimina la doble capa eléctrica que caracteriza a los coloides y con la floculación se aglomeran los coloides mediante la atracción de partículas con el aglutinamiento de los floculantes.

Los factores más importantes que se deben tener en cuenta para esta técnica son la dosis química apropiada, el efecto energético de la mezcla y el tiempo de la mezcla; los coagulantes químicos que se utilizan comúnmente en el tratamiento de aguas residuales incluyen alumbre ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ), cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), sulfato férrico ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ), sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) y cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

## H. Adsorción (convencional).

La adsorción es la operación de transferencia de materia en la cual una sustancia presente en una fase fluida tiende a concentrarse sobre la superficie de un sólido con el que se pone en contacto. De esta forma, pueden separarse los componentes de disoluciones gaseosas o líquidas (Sánchez Pina, 2014).

La operación de adsorción implica diversas etapas:

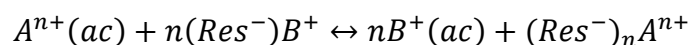
- i. Puesta en contacto del sólido adsorbente y la fase fluida.
- ii. Difusión del soluto desde el seno de la fase fluida hasta la interfase fluido-sólido.
- iii. Difusión del soluto a través de la interfase fluido-sólido, hasta los sitios activos.
- iv. Fijación del soluto en los centros activos del sólido.
- v. Separación de las dos fases: sólido cargado-fase fluida.

Este método presenta remoción de una amplia variedad de contaminantes, alta capacidad, cinética rápida y posiblemente selectiva dependiendo del adsorbente de lo cual también depende su rendimiento, básicamente por la estructura física del mismo. Los carbones activados, arcillas, biopolímeros, zeolitas y perlas de sílice son algunos de los adsorbentes, generalmente con procesos variados de modificación química, comúnmente empleados para remover colorantes iónicos, metales pesados, materiales radioactivos entre otros contaminantes orgánicos e inorgánicos generados por diferentes tipos de industrias (Caviedes Rubio et al., 2015).

## I. Intercambio iónico.

El intercambio iónico es un proceso en el cual una disolución salina entra en contacto con una resina consistente en un material polimérico que posee numerosos grupos funcionales iónicos. Los iones en disolución sustituyen a los iones del mismo signo de estos grupos de la resina, quedando retenidos en ella. El intercambio iónico es estequiométrico y reversible en la eliminación de especies iónicas disueltas (Sánchez Pina, 2014).

La reacción de intercambio iónico suele describirse como una reacción reversible de la siguiente manera, donde (Res<sup>-</sup>) hace referencia a cada punto de unión en la resina:



Los primeros intercambiadores de iones utilizados fueron tierras naturales. Después se obtuvieron compuestos sintéticos, minerales (sílices, alginatos) y orgánicos, siendo estos últimos los que en la actualidad se emplean casi exclusivamente bajo

el nombre de resinas. El intercambio iónico es un procedimiento muy utilizado para el tratamiento de aguas y aguas residuales, principalmente para eliminar la dureza producida por los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Este proceso también es utilizado para el tratamiento de diversas aguas industriales con el fin de reducir el contenido en metales pesados de las mismas (Sánchez Pina, 2014).

Las principales ventajas de intercambio iónico son la recuperación del valor del metal, la selectividad, menos volumen de lodos producidos y la reunión de las especificaciones de descarga estrictas (Caviedes Rubio et al., 2015).

### **2.3.2. Métodos no convencionales para el tratamiento de aguas residuales.**

Los tratamientos indicados anteriormente acerca de la remoción de metales pesados en las aguas residuales la mayoría de las veces no son viables por ciertos factores tecnológicos y/o económicos, fundamentalmente cuando estos metales pesados se encuentran en bajas concentraciones y en altos volúmenes. Por lo tanto, se trata de encontrar varias alternativas para tratamientos de aguas residuales de bajo costo y que sean eficientes (Ordoñez Vinueza y Moreno Farfán, 2013).

En los últimos años se han desarrollado nuevas tecnologías, aplicando procesos naturales para reducir y eliminar contaminantes de aguas residuales procedentes de efluentes industriales. A continuación, se describen algunos de los métodos no convencionales:

#### **A. Fitorremediación.**

Es el uso de las plantas y los microbios del suelo asociados para reducir las concentraciones o los efectos tóxicos de los contaminantes en los ambientes. Es una tecnología relativamente reciente y se percibe como rentable, eficiente, respetuoso del medio ambiente, y la tecnología solar impulsada con buena aceptación del público. Estas fitotecnologías ofrecen numerosas ventajas en relación con los métodos fisicoquímicos que se usan en la actualidad, por ejemplo, su amplia aplicabilidad y bajo costo (Caviedes Rubio et al., 2015).

Las desventajas son que se necesita mucho tiempo para la eliminación de los metales y la regeneración de la planta de biosorción es aún más difícil (García Barrera, 2016).

#### **B. Biorremediación.**

Es el uso de los microorganismos vivos para la eliminación de contaminantes ambientales. Para que la biorremediación sea eficaz, los contaminantes deben ser susceptibles de ataque microbiano (transformación metabólica), los productos metabólicos deben ser inocuos, y el proceso no debe tener efectos secundarios adversos en los ecosistemas. Además, las condiciones ambientales deben permitir



el crecimiento in situ de los agentes microbianos que llevan a cabo la biorremediación o la extracción del contaminante de manera que pueda biodegradarse ex situ en biorreactores.

### **C. Biopolímeros.**

Son industrialmente atractivos porque son capaces de reducir las concentraciones de iones metálicos de transición a concentraciones de partes por billón, son ampliamente disponibles y ambientalmente seguros. Poseen un número amplio de diferentes grupos funcionales, tales como hidroxilos y aminas, que aumentan la eficiencia de la absorción de iones metálicos (Caviedes Rubio et al., 2015).

En cuanto a los diferentes factores que se les exige a los biopolímeros para eliminar contaminantes, además de su eficacia, están su menor coste posible, que cumplan con las más estrictas y variadas normas gubernamentales de vertidos y por supuesto que no sean nocivos al medio ambiente.

### **D. Biosorción.**

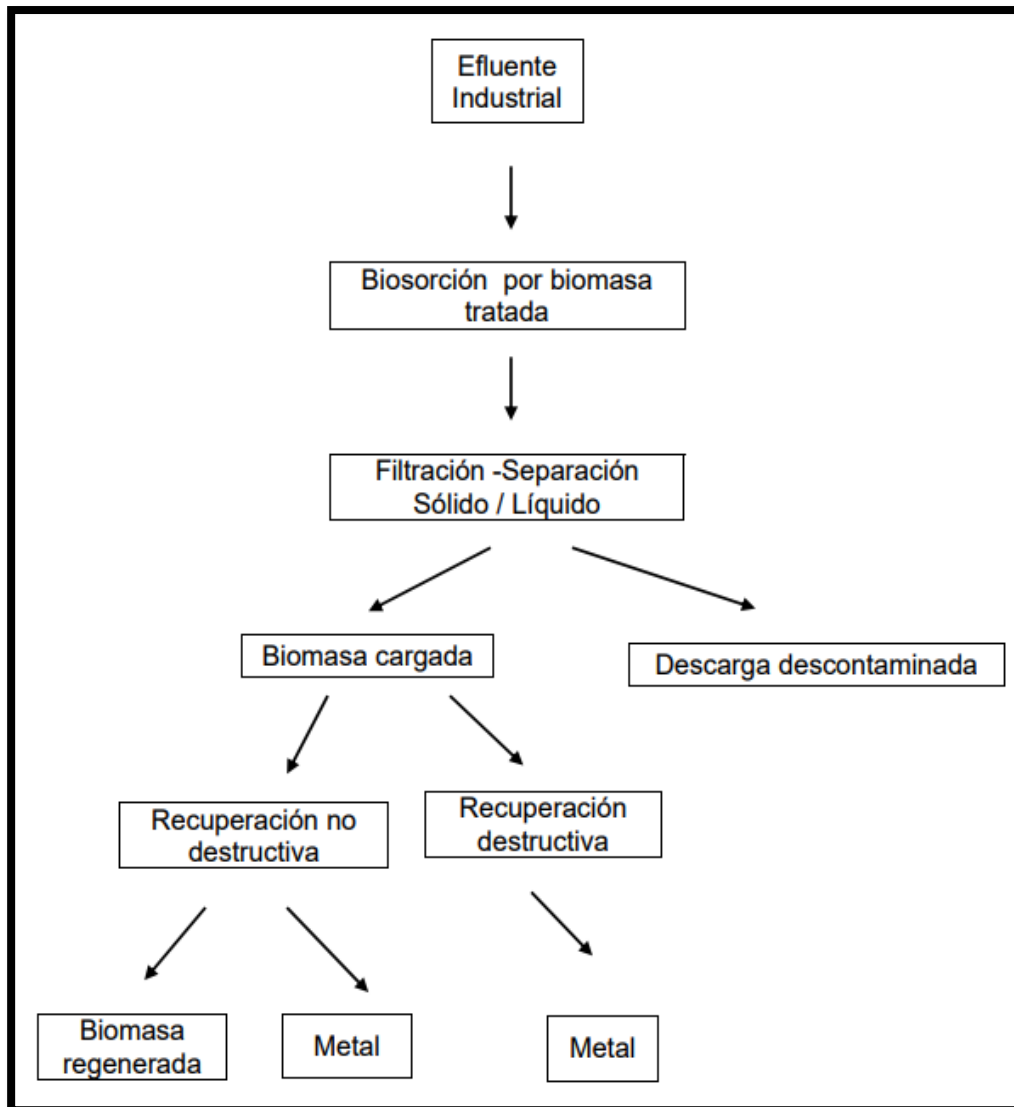
Como se mencionó anteriormente en el apartado 1.3.1, la biosorción, es un término que describe la eliminación de metales pesados por la unión pasiva a biomasa no viva a partir de soluciones acuosas; el mecanismo de remoción está controlado por la adsorción física, adsorción química e intercambio iónico. El término bioacumulación se refiere al proceso activo por el cual los metales son eliminados por la actividad metabólica de un organismo vivo.

## **2.4. Aplicación del método de biosorción como tratamiento para iones metálicos.**

La biosorción surge como una alternativa que llama la atención en la remoción de iones de metales pesados en los efluentes industriales, ya que es una tecnología que permite no solo removerlos, sino también darle un tratamiento a los desechos agrícolas que antes no tenían ninguna utilidad, además estos materiales biosorbentes son de bajo costo y fácil adquisición. Sin embargo, este método de remoción de metales pesados se encuentra aún en su etapa de investigación y no se le ha transferido conocimiento tecnológico, por esta razón en la actualidad no ha sido implementado a nivel industrial (Tejada Tovar et al., 2015).

En la Figura 2.3, se presenta el proceso para la aplicación del método de biosorción, usando diferentes tipos de biomasa (viva o muerta), las cuales extraen metales del efluente industrial contaminado; luego por filtración sólido/líquido se separan la descarga descontaminada y la biomasa cargada con el contaminante, de esta manera podremos recuperar el metal aplicando una técnica destructiva o no destructiva de recuperación, en el caso de esta última, la biomasa puede ser

regenerada para ser usada nuevamente en el proceso de biosorción (Muñoz Carpio, 2007).



**Figura 2.3** Biosorción de soluciones acuosas por biomasa.

Fuente: Muñoz Carpio, (2007).

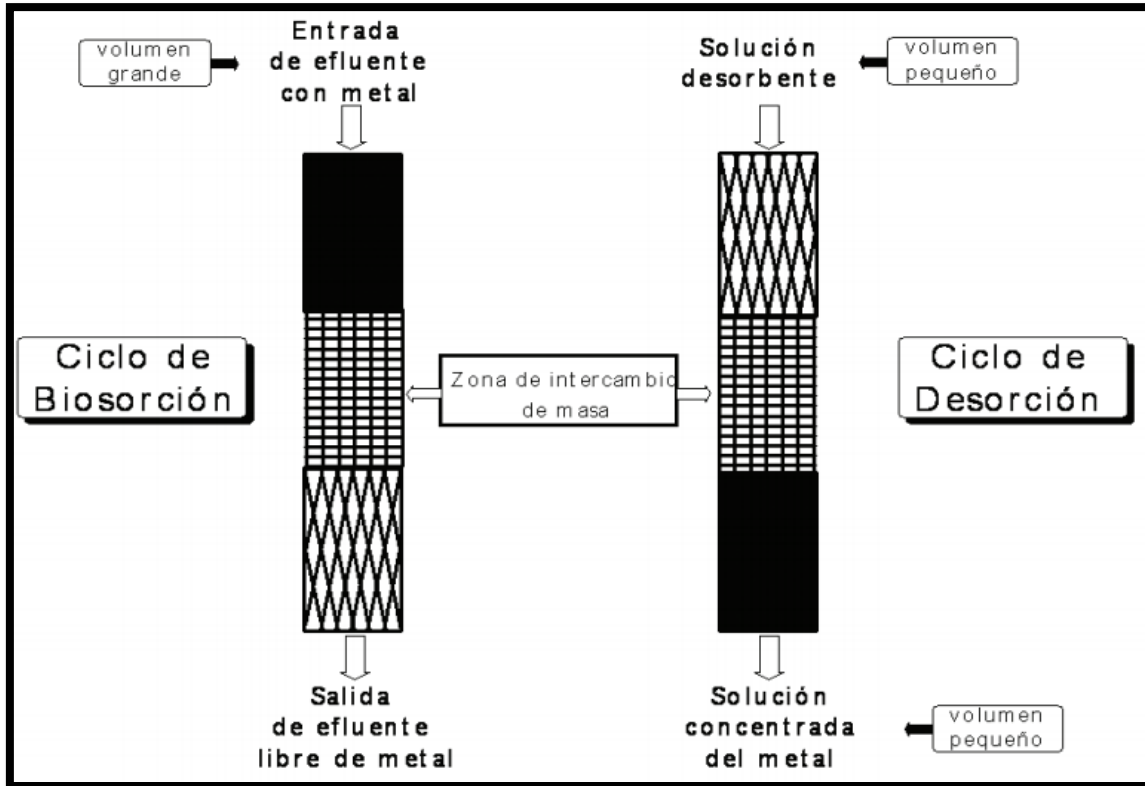
El proceso de biosorción es adecuado como técnica de refinamiento en aguas de desecho con metales pesados, en concentraciones en un rango de 1 a 100 ppm. Así, estos niveles logran disminuir hasta aquellos correspondientes al agua potable, utilizada en el consumo diario de personas y animales. La biomasa suele ser pretratada por lavado con ácidos y/o bases, antes de ser secada y molida. El corte y/o pulverización y granulación de la biomasa seca puede dar lugar a partículas estables, aunque algunos tipos de biomasa deben ser inmovilizados en una matriz

polimérica y/o se injertan en un soporte inorgánico para obtener partículas con las propiedades mecánicas requeridas (Sala et al., 2010).

La biosorción es un equilibrio sólido – líquido, siendo necesario realizar dicho contacto bien sea por métodos discontinuos o continuo. El contacto apropiado entre la solución y la fase sólida puede ser llevado en tanques de agitación o en flujo continuo, que tienen en común algunas características, pero en general difieren una de otra (Ramos Rincón, 2010).

#### **A. Método continuo.**

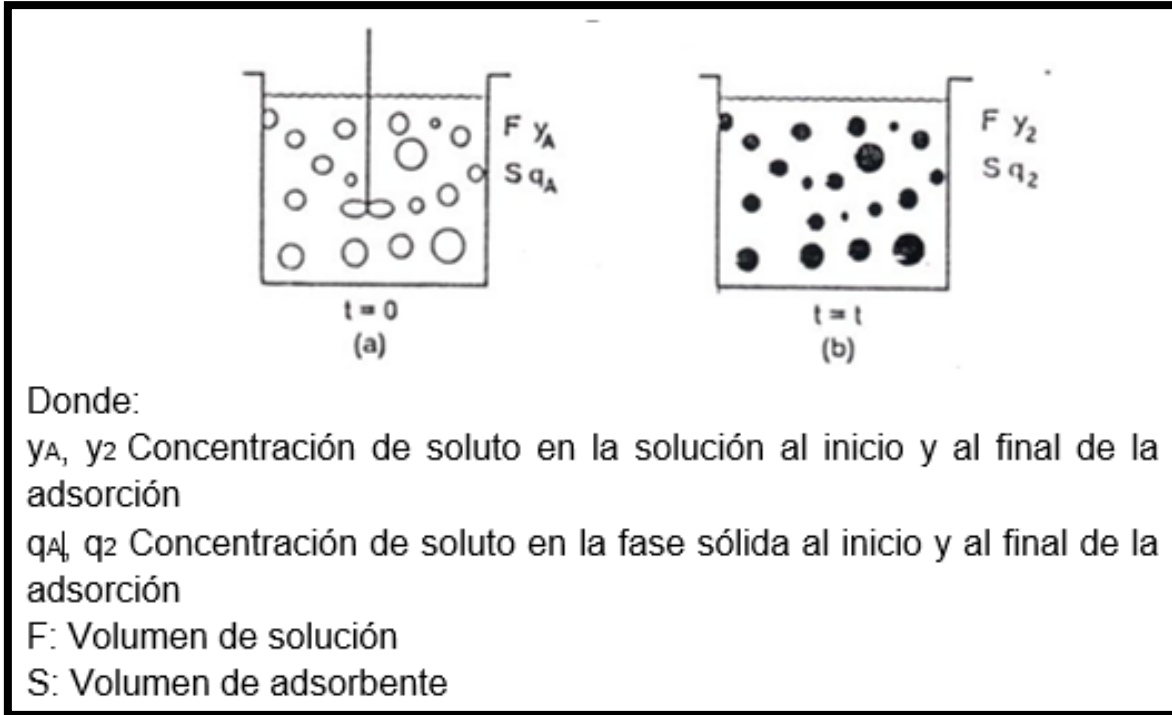
Las partículas de la biomasa pueden empaquetarse en columnas, que operan en ciclos de carga, regeneración y lavado, siendo más efectivas para la eliminación continua de metales pesados. La operación comienza con la carga del material sorbente, luego se hace pasar el efluente y el metal es captado por el biosorbente. Cuando la capacidad de sorción del biosorbente se agota, la columna se retira y su relleno es regenerado con soluciones de ácidos o de bases. Este proceso produce volúmenes pequeños de una solución concentrada del metal pesado, adecuados a los procesos convencionales de recuperación de metales. El ciclo termina al lavar con agua el material regenerado, eliminando los restos de solución regenerante y sólidos suspendidos capturados en la columna. La biosorción opera como proceso continuo empleando columnas en paralelo, tal que cuando una columna está en regeneración y lavado, otra es cargada con la solución del metal pesado. La Figura 2.4 da una idea simplificada del proceso que hoy se conoce como descarga cero donde se llevan a cabo múltiples ciclos de sorción-desorción (Sala et al., 2010).



**Figura 2.4** Ciclo sorción – desorción.  
Fuente: Sala et al. (2010).

### **B. Método discontinuo (tanque agitado o batch).**

El biosorbente granulado se pone en contacto con la disolución que contiene la sustancia a remover, manteniéndolo en suspensión con agitación en un grado tal que asegure homogeneidad y buena transferencia de materia entre la fase sólida y líquida (Ver Figura 2.5). Una vez que la sustancia es retenida por el biosorbente, este ha de ser retirado mediante un sistema de separación sólido líquido, lo que puede ser una desventaja para este tipo de proceso, esto puede hacerse mediante decantación, filtración, centrifugación. Este proceso deberá dar como resultado un efluente claro; el biosorbente puede ser regenerado mediante la desorción o incinerado. El tratamiento posterior a que se someta depende de factores como el costo del biosorbente, operaciones de desorción, valor económico, etc. Para garantizar repetibilidad y reproducibilidad de las mediciones y evitar fluctuaciones en la calidad de los productos, el control continuo de temperatura y el grado de agitación, así como la medición por triplicado de la experiencia son importantes (Ramos Rincón, 2010).



**Figura 2.5** Proceso discontinuo para el estudio de biosorción a) inicial, b) final.

El gran desafío para el campo de la biosorción consiste en seleccionar la biomasa más prometedora para el fin buscado, la que debe ser abundante y sobre todo de muy bajo costo. Esta tarea está muy lejos de haberse completado, aunque experimentalmente se han chequeado un gran número y tipos de biomazas, evaluándose su capacidad de unir iones metálicos en diferentes condiciones, publicándose un gran número de resultados experimentales en la literatura científica. Se requiere mayor información sobre el proceso de acción de la biosorción para poder determinar la mejor combinación de metales, tipo de biomasa y condiciones medioambientales. Esto representa un desafío para los laboratorios de investigación interdisciplinarios, dado que los estudios son realizados por ingenieros químicos, químicos y biólogos, con el fin de lograr optimizar el proceso de biosorción. Los modelos matemáticos son útiles en este aspecto, porque se constituyen en guías visuales para el diseño experimental y suministran las predicciones para la ejecución del proceso de biosorción en cuestión, bajo diferentes condiciones operativas (Sala et al., 2010).

## 2.5. Caracterización de aguas residuales de la industria curtiembre.

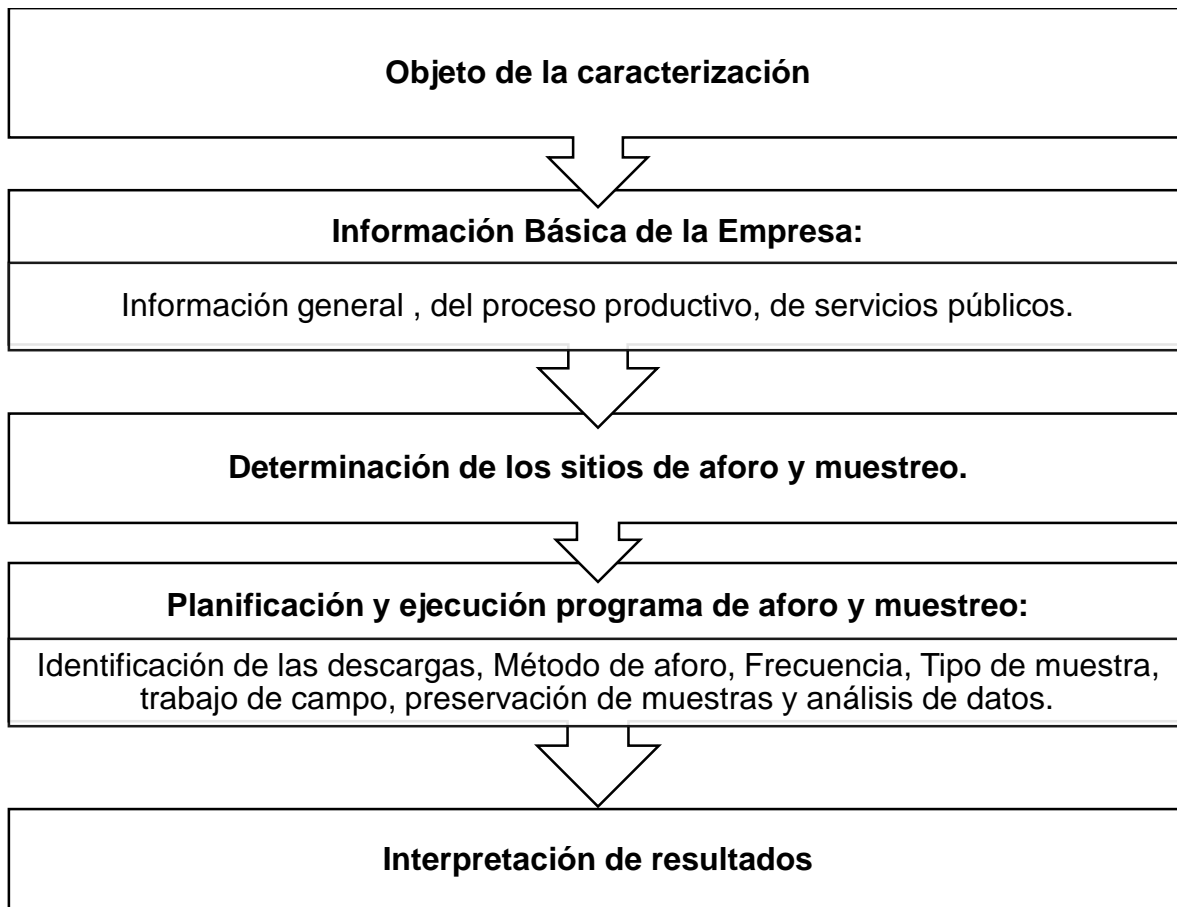
Antes de empezar con las actividades de caracterización, es preciso conocer las razones que mueven a la industria a realizar el trabajo, lo mismo que conocer su situación real, tanto desde el punto de vista interno como externo, con el fin de determinar los límites del estudio y programar el trabajo adecuadamente. La

caracterización de aguas residuales está sujeta a los objetivos que persigue la empresa (exigencias de entidades reguladoras, optimización del recurso, etc.) y está asociada a la información básica que de ello se tenga.

Dicha información ayuda a determinar el sitio, duración y tipo de muestreo que se debe realizar y da una idea de los parámetros a analizar en caso de que la entidad reguladora o quien solicite la caracterización no lo especifique. Esta información se ampliará de acuerdo con el objetivo que persiga la industria con la caracterización.

En caso de existir varias descargas, se deberá tener un conocimiento del tipo de proceso o procesos que la generan.

Ya identificada el tipo de descarga, y determinados los sitios de aforo y muestreo, se realizarán las adecuaciones que sean necesarias para garantizar confiabilidad en la toma de muestras, ya que la representatividad de estas depende de la veracidad de los resultados. Además, se define la frecuencia de muestreo y, de acuerdo con los parámetros que se vayan a determinar, la forma de manejo y preservación de las muestras. Por último, después de realizada la caracterización, se analizarán los resultados y se hará la interpretación de acuerdo con la información suministrada (ver Figura 2.6).



**Figura 2.6** Etapas para el desarrollo de una caracterización de aguas residuales.  
Fuente: Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI), (1997).

### 2.5.1. Toma de muestras del agua residual.

El objetivo de tomar muestras para hacer el análisis de la calidad del agua, es que se tenga conocimiento del funcionamiento y la eficiencia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).

Tomar una muestra no es tan fácil como parece. Además, puede tener sus implicancias en las actividades posteriores que son la preparación y los análisis, como se puede ver en la Figura 2.7.



**Figura 2.7** Efectos de los errores cometidos en el muestreo.

Fuente: Servicio Nacional para la Sostenibilidad de Servicios en Saneamiento Básico [SENASBA], (2015).

Un error en la base de la pirámide tiene más efectos en los resultados que un error en la punta de la pirámide. Así, tomar una mala muestra provoca resultados malos, y la influencia del muestreo a los resultados finales es más importante que la influencia del análisis y de la preparación de las muestras (SENASBA, 2015).

#### **I. Principios importantes en la toma de muestras de agua residual.**

Los cuatro principios que permiten conseguir una muestra de composición representativa que indique el estado promedio de la PTAR son los siguientes:

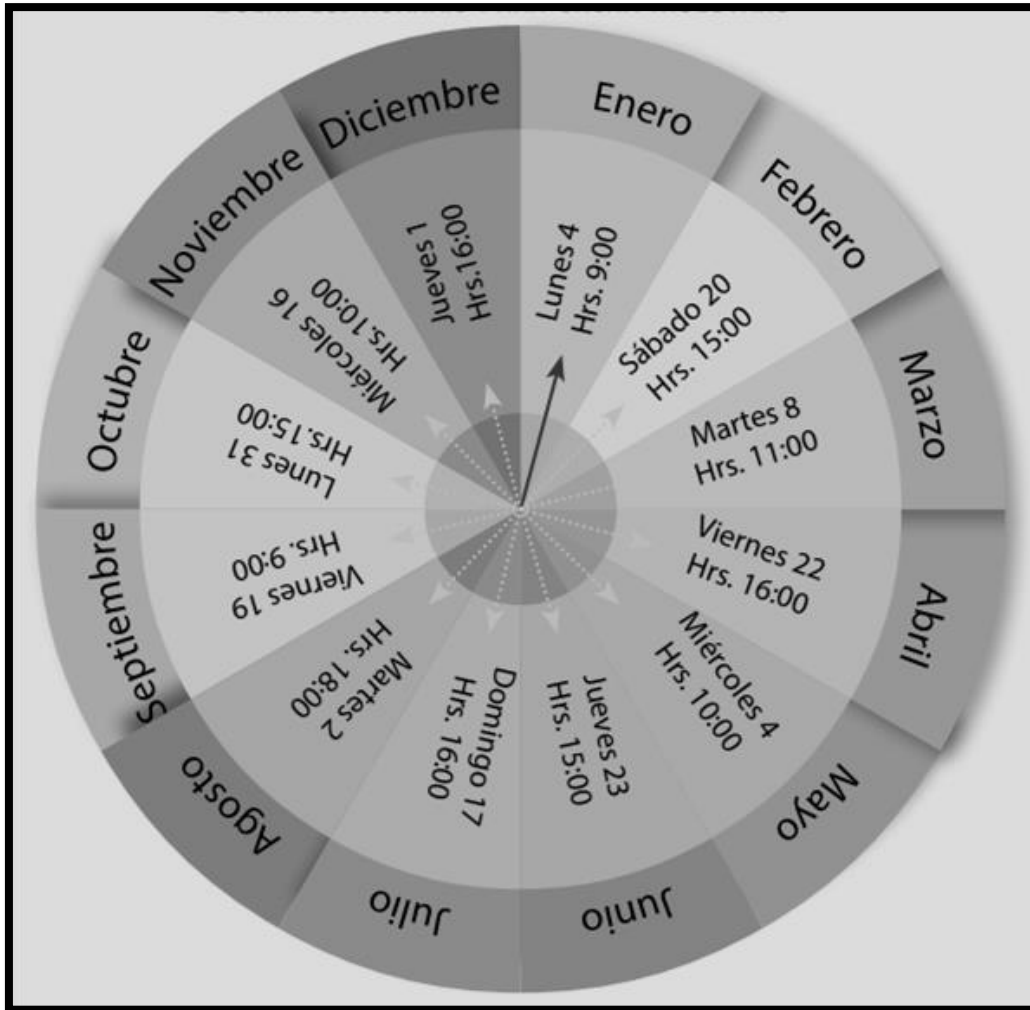
- a) Lugar.** El lugar donde se toman las muestras tiene mucha influencia en los resultados. Ya que si se toma una muestra en un lugar que no es adecuado, los resultados podrían variar e indicar que la PTAR no funciona (aunque sí lo haga). Para evitar un error de esta naturaleza, se aconseja tomar en cuenta los siguientes aspectos:



- i. Elegir un lugar donde el agua esté bien mezclada, puede ser un lugar donde el agua corra más rápido o donde exista una caída. Así, las condiciones aseguran que exista una buena mezcla que represente el agua de la PTAR de manera correcta. Cabe resaltar, si se quiere saber la eficiencia de una laguna o de un tanque es mejor si se toma la muestra en el canal o la tubería de conexión al siguiente dispositivo y no directamente del tanque o de la laguna.
- ii. Tener suficiente espacio para obtener el agua, en general, nunca se debe tocar una pared o el fondo de la tubería para evitar que los sedimentos entren al recipiente, ya que pueden generar una concentración muy alta en los resultados.
- iii. Para tomar una muestra del afluente, se debe hacer después de la rejilla del pretratamiento, para evitar que elementos gruesos ingresen.

Como ejemplo los lugares adecuados para tomar las muestras de la PTAR se los puede encontrar en el Anexo A.

- b) Tiempo.** La influencia del tiempo correcto, para sacar muestras, muchas veces es subestimada. Aunque en realidad hay aspectos que se deben considerar para encontrar un momento adecuado, como el clima o la hora del día. Las inclemencias del clima pueden jugar en contra con la toma de las muestras, por ejemplo: no se toman muestras cuando hay días de lluvia, ya que la dilución influye en los resultados.
- c) Frecuencia.** En general, se recomienda alternar los días y el horario de los muestreos para que no se tome siempre la misma muestra. Un horario para sacar muestras se puede determinar con el siguiente ejemplo (Ver Figura 2.8) que cada uno puede realizar para cada año, esto ayuda a verificar la eficiencia de la PTAR de una manera correcta.



**Figura 2.8** Ejemplo de horario para sacar muestras  
Fuente: SENASBA, (2015).

**d) Técnica.** Existen diferentes técnicas de muestreo que tienen sus ventajas, desventajas y usos distintos. A continuación, se mencionan las muestras más importantes para el tema de agua residual:

- i. **Muestra simple:** La muestra simple es solo una muestra tomada en un instante. Es muy fácil de hacerla, ya que solamente se toma con un recipiente el agua de la tubería o de una caída. Además, es rápido de tomarla. Tiene desventajas que solo indica la composición del agua en el instante en que fue tomada, además los errores durante el muestreo no son relativos. Se utiliza la muestra simple si el agua no presenta alteraciones y cuando no hay tiempo para tomar una muestra compuesta. Este último sucede, por ejemplo, si hay una descarga no usual y extraña que es temporal y de golpe, causada por una descarga industrial. En una situación así no hay tiempo para sacar una muestra compuesta.

- ii. **Muestra compuesta:** La muestra compuesta es un término genérico que se le otorga a la mezcla de un número de muestras simples, tomadas durante un cierto periodo de tiempo. Se la usa para conocer las condiciones promedio del agua, con el fin de controlar la eficiencia de una PTAR. En general, las muestras compuestas son aptas para indicar el promedio de las variaciones de la contaminación en el agua. Sacar muestras compuestas es más complicado que sacar muestras simples, se necesita más tiempo y equipo.
- iii. **Muestra cualificada:** La técnica cualificada es un tipo de muestra compuesta consiste en 5 muestras simples mezcladas y tomadas en por lo menos 8 minutos; así cada muestra se toma en un intervalo de por lo menos 2 minutos. Para hacer esta muestra se necesita más tiempo, paciencia y equipos como un muestreador, un balde limpio y una jarra de medición. Este método presenta un promedio de la contaminación del agua en un periodo de tiempo razonable. Otra ventaja es que un error cometido durante el muestreo de una muestra simple es relativo por el volumen grande y la mezcla con las otras muestras simples.
- iv. **Muestra para un análisis microbiológico:** Si se quiere sacar una muestra para un análisis microbiológico se necesita un recipiente estéril. Habitualmente el laboratorio que hace los análisis lo facilita. Un recipiente estéril muchas veces tiene en la parte superior de la tapa una capa de aluminio protectora. Para sacar una muestra, que es usada para análisis microbiológicos, siempre se debe usar una muestra simple. Es importante no usar un muestreador ni otro recipiente, sino sacar la muestra directamente con el frasco estéril. Sacar la muestra con el frasco estéril puede ser complicado si el flujo está debajo del suelo, por eso la persona tiene que acostarse en el suelo para llegar al flujo.

## II. Aspectos importantes para la toma de muestras de agua residual.

Una vez definidas las técnicas del muestreo, existen algunos aspectos que se deben tomar en cuenta:

- a) El recipiente con el que se toma la muestra siempre tiene que estar limpio y sin restos de agua de la muestra anterior.
- b) Siempre se debe empezar a tomar las muestras con el agua más purificada, es decir, el agua de la concentración más baja, y seguir con la segunda concentración más baja hasta llegar a la concentración más alta. Eso significa que si se quiere tomar 3 muestras de una PTAR por ejemplo: la primera debe de ser en el efluente o salida de la PTAR, la segunda al medio del sistema de tratamiento (pasando la laguna facultativa) y por último una muestra después

del pre-tratamiento. Es importante hacerlo de esa manera ya que se evita errores por equipo contaminado.

- c) Siempre tomar la muestra en la mitad del flujo de agua, nunca tocar el fondo o las paredes. Si se toca el fondo, los sedimentos en la muestra pueden provocar malos resultados. Al contrario, el flujo superior contendría menos partículas que también pueden causar malos resultados.
- d) Tomar la muestra en contracorriente.
- e) Si hay espuma o algas y grasas flotantes, intentar no tomarlas junto con el agua que se saca para la muestra.
- f) Para que las muestras de diferentes días sean comparables, se deben tomar en el mismo lugar de la misma manera.

### **III. Instrucciones para la toma de muestras de agua residual.**

Las instrucciones y cuidados que se deben de tener en cuenta para la toma de muestras de aguas residuales son las siguientes:

- a) Preparar guantes desechables, desinfectante, muestreador con un recipiente limpio, balde limpio si se quiere hacer la muestra cualificada y hoja de la documentación para evidenciar el muestreo (normalmente es facilitada por el laboratorio que hace los análisis).
- b) Si se quiere tomar una muestra del afluente y del efluente, empezar con el efluente. Es muy importante para que no se contamine las muestras de una concentración baja.
- c) Elegir un lugar adecuado para la toma de muestras.
- d) Rellenar los papeles de la documentación y las etiquetas de los frascos. Siempre hacerlo antes de la toma de las muestras.
- e) Enjuagar el recipiente del muestreador y el balde con el agua que se va a utilizar para la muestra, así se asegura que no haya restos de la muestra anterior en el recipiente.
- f) Sacar la muestra con la técnica adecuada.
- g) Nunca llenar el frasco completamente, especialmente si es una muestra para análisis microbiológico.
- h) Cerrar el frasco lo más pronto posible y colocarlo en una conservadora a temperatura fría.
- i) No se deben botar los guantes usados u otro residuo en el lugar del muestreo. Siempre se necesita una bolsa que es usada como un basurero y que se lleva después del muestreo.
- j) Es importante que durante todo el transporte las muestras no se calienten y no estén en el sol, la radiación y el calor pueden influir en los resultados.

#### **IV. Tipos de frascos para la toma de muestras de agua residual.**

La mayoría de las veces, el laboratorio donde se realizan los análisis de la calidad del agua entrega los frascos necesarios para la toma de la muestra, los cuales ya cumplen con ciertas características. En el caso que no se tenga estos materiales previamente para la toma de las muestras, se debe elegir el material de los frascos, que debe tener un volumen de al menos 500 mL a 1 Litro. El material del frasco depende del parámetro que será determinado, es decir, que en el caso de los parámetros que generalmente se analizan para verificar el funcionamiento de la PTAR (DBO5, DQO, NH4-N y Sólidos Suspendidos) se debe tomar en cuenta frascos de vidrio o de plástico ya que los resultados no se verán afectados. Para el análisis de parámetros microbiológicos como Coliformes fecales se requiere un frasco estéril que debe ser de vidrio, generalmente estos frascos que entrega el laboratorio tienen una tapa adicional de aluminio. Si se quiere determinar parámetros toxicológicos (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP's), Plaguicidas Organoclorados (POC's) o Bifenilos Policlorados (PDB's)) se necesita un frasco de vidrio color ámbar para evitar la entrada de la luz y por ende posibles reacciones químicas.

En el libro de Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales en la Sección 1060 B, se muestra un resumen de requerimientos especiales para toma de muestras o manipulación de varios constituyentes, como son: la estimación del volumen de muestra requerido para su análisis, el tipo de recipiente sugerido y el tiempo máximo de almacenamiento recomendado para muestras preservadas en condiciones óptimas. A continuación, en la Tabla 2.6 se presentan las recomendaciones para el muestreo y preservación de muestras.

**Tabla 2.6** Recomendaciones para el muestreo y preservación de muestras de acuerdo con los parámetros a determinar<sup>1</sup>.

Determinación	Recipiente <sup>2</sup>	Volumen mínimo de muestra (mL)	Tipo de muestra <sup>3</sup>	Preservación <sup>4</sup>	Almacenamiento máximo recomendado <sup>5</sup>
Aceites y grasas	V	1000	s, c	Añadir HCL hasta pH<2, Refrigerar	28 d
Acidez	P, V	100	s	Refrigerar	14 d
Alcalinidad	P, V	200	s	Refrigerar	14 d
Boro	P	100	s, c	No requiere	6 meses
Bromuro	P, V	100	s, c	No requiere	28 d
Carbono orgánico total	V	100	s, c	Análisis inmediato; o refrigerar y agregar H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> o H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH<2	28 d
Cianuro total	P, V	500	s, c	Agregar NaOH hasta pH>12, refrigerar en la oscuridad <sup>6</sup>	14 d <sup>7</sup>
Cianuro Clorable	P, V	500	s, c	Agregar 100 mg Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /L	14 d <sup>7</sup>

continúa

<sup>1</sup> Para detalles adicionales ver el texto y los protocolos respectivos. Para las determinaciones no enumeradas, usar recipientes de vidrio o plástico; preferiblemente refrigerar durante el almacenamiento y analizar lo más pronto posible.

<sup>2</sup> P = plástico, V = vidrio; V(A) o P(A) = enjuagado con HNO<sub>3</sub> 1+1; V(B) = vidrio, enjuagado con solventes orgánicos o secado en estufa.

<sup>3</sup> s = simple o puntual; c = compuesta.

<sup>4</sup> Refrigerar = almacenar a 4° C en ausencia de luz. La preservación de la muestra debe realizarse en el momento de la toma de muestra. Para muestras compuestas, cada alícuota debe preservarse en el momento de su recolección. Cuando el uso de un muestreador automático haga imposible la preservación de cada alícuota, las muestras deben mantenerse a 4° C hasta que se complete la composición.

<sup>5</sup> Las muestras deben ser analizadas lo más pronto posible después de su recolección. Los tiempos listados son los periodos máximos que pueden transcurrir antes del análisis para considerarlo válido. Algunas muestras pueden no ser estables por el periodo máximo dado en la tabla. Si se envían las muestras por correo, deben cumplir con las regulaciones de transporte de materiales peligrosos (consultar EPA Methods).

<sup>6</sup> Si la muestra está clorada, consultar su pretratamiento en el protocolo o en Standard Methods.

<sup>7</sup> El máximo tiempo de almacenamiento es de 24 h si está presente el sulfuro, el cual se puede detectar mediante papel con acetato de plomo antes de ajustar el pH; si el sulfuro está presente, puede removerse por adición de nitrato de cadmio en polvo hasta que se obtenga prueba negativa; después se filtra la muestra y se adiciona NaOH hasta pH 12.

**Tabla 2.6** Recomendaciones para el muestreo y preservación de muestras de acuerdo con los parámetros a determinar (continuación).

Determinación	Recipiente	Volumen mínimo de muestra (mL)	Tipo de muestra	Preservación	Almacenamiento máximo recomendado
Cloro residual	P, V	500	s	Análisis inmediato	—
Cloruro	P, V	50	s, c	No requiere	28 d
Color	P, V	500	s, c	Refrigerar	48 h
Plaguicidas	V(S), tapón de TFE	1000	s, c	Refrigerar; agregar 1000 mg ácido ascórbico/L si hay cloro residual	7 d hasta la extracción
Fenoles	P, V	500	s, c	Refrigerar; agregar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH<2	40 d después de extraer
COV	V, tapón de TFE	240	s	Refrigerar; agregar HCl hasta pH<2; agregar 1000 mg ácido ascórbico/L si hay cloro residual	14 d
Conductividad	P, V	500	s, c	Refrigerar	28 d
DBO	P, V	1000	s	Refrigerar	48 h
DQO	P, V	100	s, c	Analizar lo más pronto posible, o agregar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH<2; refrigerar	28 d
Fluoruro	P	300	s, c	No requiere	28 d
Fosfato	V(A)	100	s	Para fosfato disuelto filtrar inmediatamente refrigerar	48 h

continúa

**Tabla 2.6** Recomendaciones para el muestreo y preservación de muestras de acuerdo con los parámetros a determinar (continuación).

Determinación	Recipiente	Volumen mínimo de muestra (mL)	Tipo de muestra	Preservación	Almacenamiento máximo recomendado
Metales, general	P	500	s	Filtrar <sup>8</sup> , agregar HNO <sub>3</sub> hasta pH<2	6 meses
Cromo VI	P (A), V(A)	300	s	Refrigerar	24 h
Mercurio	P (A), V(A)	500	s, c	Agregar HNO <sub>3</sub> hasta pH<2, 4 °C, refrigerar	28 d
Amoniaco	P, V	500	s, c	Analizar lo más pronto posible, o agregar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH<2; refrigerar	28 d
Nitrato	P, V	100	s, c	Analizar lo más pronto posible o refrigerar	48 h (28 d para muestras cloradas)
Nitrato + nitrito	P, V	200	s, c	Agregar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH<2, refrigerar	28 d
Nitrito	P, V	100	s, c	Analizar lo más pronto posible o refrigerar	48 h
pH	P, V	50	s	Análisis inmediato	—
Sólidos en suspensión	P, V	200	s, c	Refrigerar	2-7 d, ver protocolo
Sulfato	P, V	100	s, c	Refrigerar	28 d
Sulfuro	P, V	100	s, c	Refrigerar; agregar 4 gotas de acetato de zinc 2N/100 mL; agregar NaOH hasta pH>9	7 d
Temperatura	P, V	—	s	Análisis inmediato	—

continúa

<sup>8</sup> Para metales disueltos las muestras deben filtrarse inmediatamente en el sitio de muestreo, antes de adicionar el ácido.



**Tabla 2.6** Recomendaciones para el muestreo y preservación de muestras de acuerdo con los parámetros a determinar (continuación).

Determinación	Recipiente	Volumen mínimo de muestra (mL)	Tipo de muestra	Preservación	Almacenamiento máximo recomendado
Turbidez	P, V	100	s, c	Analizar el mismo día; para más de 24 h guardar en oscuridad, refrigerar	48 h

Fuente: Díaz de Santos, (1992).

### V. Transporte de las muestras de agua residual.

Para transportar las muestras se hace uso una conservadora, las condiciones perfectas para transportar las muestras son: oscuridad y una temperatura entre 1 – 5 °C. Las muestras no deben estar congeladas y son estables hasta 24 horas.

Se usan bolsas de gel o paquetes fríos para conservar las muestras, si se utiliza hielo existe el problema que provoque mucha agua en la conservadora, y se corra el peligro de contaminar las muestras o afectar las etiquetas.

Aunque las muestras son estables por un cierto tiempo con las circunstancias descritas, se aconseja transportarlas al laboratorio lo más pronto posible.

#### 2.5.2. Determinación de parámetros de descarga de todo tipo de industria.

Según la Norma para Regular Calidad de Aguas Residuales de tipo especial descargadas al Alcantarillado Sanitario, establece en el apartado 4, que los análisis de parámetros básicos que se deben determinar a toda descarga tipo industrial son:

- a) Aceites y Grasas.
- b) DQO: Demanda Química de Oxígeno.
- c) DBO<sub>5</sub>: Demanda Bioquímica de Oxígeno.
- d) pH.
- e) Temperatura.
- f) Sólidos Suspendidos Totales.
- g) Sólidos Sedimentables.

De los cuales tanto el pH y la temperatura deberán ser determinados in situ, es decir, que se realizan en el mismo lugar donde se encuentra el objeto de análisis. De igual manera existen análisis de parámetros complementarios por tipo de actividad a la que se dedica la industria, que en este caso el tema de investigación

se enfoca en la industria curtiembre, por lo tanto, los parámetros complementarios son:

- a) Cromo.
- b) Color.

De igual manera se encuentran diferentes parámetros complementarios para otro tipo de industrias.

En la Tabla 2.7 se muestra una comparación de los valores máximos permisibles de los parámetros básicos y complementarios establecidos según la “Norma para Regular Calidad de Aguas Residuales de tipo especial descargadas al Alcantarillado Sanitario” y la Norma Salvadoreña Obligatoria: 13.49.01:09. “Aguas. Aguas Residuales descargadas a un cuerpo receptor”, y que estos son alcanzados por medio de los tratamientos respectivos.

**Tabla 2.7** Comparación de valores máximos permisibles de parámetros para verter aguas residuales según Normas Salvadoreñas.

	<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Norma para Regular Calidad de Aguas Residuales de tipo especial descargadas al Alcantarillado Sanitario</b>	<b>Norma Salvadoreña Obligatoria: 13.49.01:09. “Aguas. Aguas Residuales descargadas a un cuerpo receptor”</b>
<b>Básicos</b>	Aceites y grasas	(mg/L)	150	50
	DQO	(mg/L)	1000	1500
	DBO <sub>5</sub>	(mg/L)	400	850
	pH	(mg/L)	5.5 - 9.0	5.5 - 9.0
	Temperatura	°C	20 - 35	20 - 35 <sup>9</sup>
	Sólidos suspendidos totales	(mg/L)	450	150
	Sólidos sedimentables	(mL/L)	20	15

continúa

<sup>9</sup> En todo caso la temperatura del agua de descarga al cuerpo receptor no podrá alterar  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ , con respecto a la temperatura del cuerpo hídrico receptor.

**Tabla 2.7** Comparación de valores máximos permisibles de parámetros para verter aguas residuales según Normas Salvadoreñas (continuación).

	<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Norma para Regular Calidad de Aguas Residuales de tipo especial descargadas al Alcantarillado Sanitario</b>	<b>Norma Salvadoreña Obligatoria: 13.49.01:09. “Aguas. Aguas Residuales descargadas a un cuerpo receptor”</b>
<b>Complementarios de Industria Curtiembre</b>	Cromo Hexavalente Cr (VI)	(mg/L)	0.1	0.5
	Cromo Total	(mg/L)	1	3
	Color		-	-

### **2.5.3. Métodos de análisis para determinación de parámetros de agua residual.**

En el apartado anterior, se mencionan cuáles son los parámetros básicos y parámetros complementarios, así como también se presentan en la Tabla 2.7 en un cuadro comparativo los valores máximos permisibles para Industria de Curtiembre, tanto en la “Norma para Regular Calidad de Aguas Residuales de tipo especial descargadas al Alcantarillado Sanitario” como en la Norma Salvadoreña Obligatoria: 13.49.01:09. “Aguas. Aguas Residuales descargadas a un cuerpo receptor.”

Dichas normas de igual manera presentan los métodos de análisis para la determinación de cada uno de los Parámetros Contemplados en estas usando como referencia el libro de “Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales” y “Normas ASTM”.

En la Tabla 2.8 se presentan los métodos de análisis para la determinación de los parámetros contemplados en la Norma Salvadoreña Obligatoria: 13.49.01:09. “Aguas. Aguas Residuales descargadas a un cuerpo receptor.”

**Tabla 2.8** Métodos de análisis para la determinación de los parámetros contemplados en la norma.

<b>Parámetros</b>	<b>Número de referencia Standard Methods</b>	<b>Número de referencia ASTM</b>
Aceites y grasas	5520	D3921-96
DQO	5220	D1252-02
DBO <sub>5</sub>	5210	-
pH	4500 – H <sup>+</sup>	D1293-99
Temperatura	2550	-
Sólidos suspendidos totales	2540 D	-
Sólidos sedimentables	2540 F	-
Cromo Hexavalente Cr (VI)	3500 - Cr	D5257-97
Cromo Total	3500 - Cr	-
Color	2120	-

Fuente: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), (2009).

En el Anexo B se detalla de manera breve el método utilizado de análisis para la determinación de cada uno de los parámetros básicos y complementarios según lo presenta el Manual de Caracterización de Aguas Residuales Industriales, el cual tomó como referencia el libro “Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales” o “Standard Methods Fort the examination of water and wastewater.”

Las tenerías o curtiembres se califican como industrias húmedas y como tales descargan grandes volúmenes de aguas de desecho saturadas de residuos químicos que son vertidas a ríos o quebradas, lo que resulta en un mayor problema por sus efectos al medio ambiente, especialmente a los recursos hídricos, que cada vez son más escasos en nuestro país, afectando tanto a la flora como a la fauna acuática debido a la falta de oxígeno necesario que se concentra en degradar materias contaminantes de dichas aguas. Otro problema que generan estos vertidos líquidos es un pH variable que puede ir desde muy ácido hasta muy básico.

Las Curtiembres hacen uso intensivo de agua, principalmente en las etapas de ribera y curtido. Además, en los procesos se utilizan importantes cantidades de reactivos químicos, destacando el uso de cloruro de sodio, sulfuro de sodio, hidróxido de Calcio Ca(OH)<sub>2</sub>, sales de cromo y solventes de diferente naturaleza (ver Tabla 2.9).

**Tabla 2.9** Rango de cantidades de materias primas utilizadas en cada etapa del procesamiento de pieles.

Producto	Fórmula Química	% ( En función del peso de la piel)
<b>a. OPERACIÓN DE REMOJO</b>		
Agua	H <sub>2</sub> O	100 -300%
Bactericida	n.d*	0.05 -0.10%
Tensoactivo	n.d*	0.2 – 1.5%
Carbonato de Sodio	(Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	0.1-0.30%
<b>b. OPERACIÓN PELAMBRE</b>		
Agua	H <sub>2</sub> O	80.00 – 250.00%
Tensoactivo	n.d*	0.2 – 1.00%
Sulfuro de sodio	Na <sub>2</sub> S	0.8 -2.50%
Cal Ca(OH) <sub>2</sub>	n.d*	3.5 – 6.00%
Sulfhidrato de sodio	NaSH	0.10 – 1.50%
Derivados del petróleo	n.d*	0.5 -1.50%
Enzimas	n.d*	0.05 -1.50%
<b>c. OPERACIÓN DESENCALADO</b>		
Agua	H <sub>2</sub> O	50.00 -150.00%
Sulfato de Amonio	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.00 – 3.00%
Tensoactivo	n.d*	0.20 – 0.50%
Bisulfito de Sodio	n.d*	0.20 – 0.50%
<b>d. OPERACIÓN DE PIQUELADO</b>		
Agua	H <sub>2</sub> O	40.0 - 100.0%
Sal	NaCl	6.00 - 10.00%
Ácido Fórmico	HCOOH	0.00 - 1.00%
Ácido Sulfúrico	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.50 - 1.50%
Formiato de Sodio	HCOONa	0.50 - 1.50%
<b>e. OPERACIÓN CURTIDO AL CROMO</b>		
Sulfato básico de Cromo <sup>1</sup>	2Cr(OH)SO <sub>4</sub>	6.00 - 8.00%
Carbonato de Sodio <sup>1</sup>	NaHCO <sub>3</sub>	1.50 – 1.80%
Óxido de Magnesio <sup>1</sup>	MgO	0.30 – 0.50%
Sales de Cromo Autobasificables <sup>1</sup>	n.d*	6.00 - 8.00%
Fungicidas <sup>2</sup>	n.d*	0.15 – 0.25%
Aceites Sulfitados	n.d*	0.20 – 0.50%

continúa

**Tabla 2.9** Rango de cantidades de materias primas utilizadas en cada etapa del procesamiento de pieles (continuación).

Producto	Fórmula Química	% ( En función del peso de la piel)
<b>f. OPERACIÓN DE RECURTIDO Y ENGRASE</b>		
Sintéticos Blanqueantes (ácidos orgánicos)	n.d*	1.0 - 2.0%
Secuestrante de sales metálicas (EDTA)	n.d*	0.1 – 0.5%
Sulfato de magnesio	MgSO <sub>4</sub>	1.5 - 3.0%
Glucosa Líquida	n.d*	1.0 – 2.0%
Ácido Oxálico	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.2 - 0.5%
Aceite Sulfatado	n.d*	1.5 – 3.0%
Aceite Crudo	n.d*	0.5– 1.0%
<b>g. OPERACIÓN DE ACABADO</b>		
Agua	H <sub>2</sub> O	100 – 150%
Ácido Oxálico	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.2 – 0.5%
Tensoactivo	n.d*	0.2 – 0.5%
Ácido acético	CH <sub>3</sub> COOH	0.2 – 0.5%
Ácido Fórmico	HCOOH	0.2 – 0.5%
<b>h. NEUTRALIZADO</b>		
Agua	H <sub>2</sub> O	100.0 – 150.0%
Formiato de Sodio	H <sub>2</sub> O HCOONa	0.5 – 2.0%
Bicarbonato de sodio	NaHCO <sub>3</sub>	0.3 – 1.5%
Sales neutralizantes y tamponantes	n.d*	0.5– 2.0%
<b>i. RECURTIDO</b>		
Agua	H <sub>2</sub> O	80.0 – 100.0%
Recurtientes vegetales* (mimosa, quebracho o castaño)	n.d*	2.0 -18.0%
Recurtientes fenólicos	n.d*	2.0 – 6.0%
Recurtientes naftalénicos	n.d*	2.0 – 6.0%
Recurtientes Acrílicos	n.d*	2.0 – 4.0%
Recurtientes Proteínicos	n.d*	2.0 – 4.0%
Recurtientes Resínicos	n.d*	2.0 – 4.0%
Glutaraldehidos	n.d*	2.0– 6.0%

continúa

**Tabla 2.9** Rango de cantidades de materias primas utilizadas en cada etapa del procesamiento de pieles (continuación).

Producto	Fórmula Química	% ( En función del peso de la piel)
<b>j. TEÑIDO</b>		
Ácido Fórmico	HCOOH	0.2- 1.0%
Anilinas ácidas	n.d*	0.1- 5.0%
Anilinas directas	n.d*	0.1- 1.0%
Anilinas básicas (catiónicas)	n.d*	0.1- 0.5%
Nivelador de anilina	n.d*	0.1- 1.0%
<b>k. ENGRASE</b>		
Aceite sulfatado <sup>3</sup>	n.d*	2.0 - 6.0%
Aceite sulfitados	n.d*	1.0 – 4.0%
Aceite Sulfonados	n.d*	2.0 – 10.0%
Aceite Sulfoclorados	n.d*	2.0 – 10.0%
Crudos	n.d*	0.5 – 1.0%
Ácido Fórmico	HCOOH	0.5 – 3.0%

<sup>1</sup> Estos productos se utilizan indistintamente y el uso de unos excluye a otros.

<sup>2</sup> Los fungicidas sólo se usan cuando el cuero curtido se va almacenar.

<sup>3</sup> Estos aceites pueden ser de origen natural o sintético.

\*n.d Información no disponible.

Fuente: Muñoz García et al., (2005).

Por otro lado, es de destacar que cerca del 60% del peso de las pieles que ingresa a la curtiembre son eliminadas como residuo, ya sea en las aguas residuales o con los residuos sólidos.

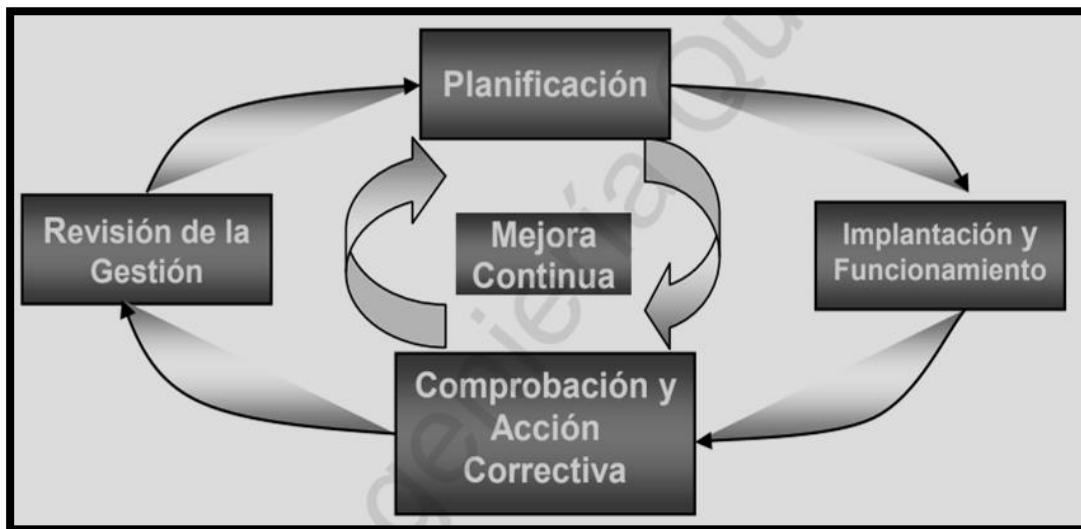
Como se mencionó anteriormente dicha industria utiliza abundante agua y una serie de químicos que se ocupan en todas y cada una de las operaciones de producción de cueros, estos efluentes líquidos son considerados de los mayores problemas ambientales y económicos para este sector debido a que llevan consigo una gran cantidad de químicos por lo que el tratamiento y disposición los hace que sean costosos y problemáticos tanto para la empresa como para el medio ambiente ya que estos muchas veces son vertidos a los desagües municipales, ríos y quebradas sin darle ningún tratamiento que permita disminuir o eliminar la carga contaminante de los efluentes.

## **2.6. Gestión ambiental del agua residual de la industria de curtiembre.**

El sistema de gestión ambiental constituye un proceso estructurado para el logro de una mejora continua, cuyo ritmo de aplicación y alcance será determinado por la

organización basándose en consideraciones económicas y otros factores. Es una herramienta que capacita a la organización para alcanzar y controlar el sistema de desempeño ambiental que ella misma se ha impuesto (Angulo Zavaleta y Anaya Garay, 2011).

Cuando se inicia un proceso de organización del área ambiental, es necesario obtener información, lo más detallada posible, sobre la realidad actual de la empresa desde el punto de vista ambiental y productivo, luego de lo cual, se pueden generar acciones que solucionen o minimicen la problemática encontrada; sin embargo, es recomendable que no sea únicamente una actuación puntual, sino por el contrario, sea un nuevo modelo de gestión de la empresa que siempre tenga presente al ambiente y su entorno, como parte integrante de la misma. La norma ISO 14001 plantea un modelo centrado en el principio de mejora continua, también utilizado en la normativa de calidad del producto (ISO 9000) y de seguridad y salud ocupacional (OSHA 18000). Este principio se basa en una secuencia de etapas (Ver Figura 2.9), que a su vez tienen múltiples acciones o actividades, que conllevan a la planificación, implantación, comprobación y acción correctiva del sistema de gestión ambiental, para posteriormente, iniciar nuevamente el ciclo, con la planificación (Peña Rodón, 2012).



**Figura 2.9** Etapas de la implementación de la ISO 14001.

Fuente: Angulo Zavaleta y Ayala Garay (2011).

Cualquier organización, incluyendo las tenerías, cuentan con mayor o menor formalidad, con un sistema de gestión ambiental. Con esta afirmación nos referimos a todas sus herramientas, actividades, acciones, procedimientos, valores y principios de relevancia ambiental; que aplica rutinaria o esporádicamente. Aun cuando la mayor parte de las organizaciones no lo han formalizado, ni plasmado; es aconsejable que realicen periódicamente su revisión y en la medida de sus



necesidades y posibilidades lo registren o certifiquen en caso de que el análisis de los costos y beneficios producto de esta certificación indiquen que es conveniente.

En la etapa de planificación del sistema de gestión ambiental, se pretende diagnosticar la situación ambiental actual de la organización, así como comprometerla con una adecuada y cada vez mejor actuación ambiental. Es importante que en esta etapa se verifique el grado de compromiso de los responsables directos de la empresa, ya que la ejecución y aplicación del sistema de gestión ambiental conlleva una serie de decisiones, inversiones y actuaciones que seguramente implicarán cambios en los modelos gerenciales llevados hasta ese momento. Igualmente se debe plantear la visión de futuro, desde el punto de vista ambiental, de la Organización y la forma mediante la cual pretende lograrlo, así como el grado de cumplimiento de la legislación ambiental. Entre los tópicos que son necesarios para el correcto desarrollo de esta etapa, se deben destacar:

- i. Revisión ambiental inicial.
- ii. Análisis y registro de los aspectos e impactos ambientales de la empresa.
- iii. Política ambiental.
- iv. Análisis y registro de la legislación ambiental directamente relacionada con las actividades de curtiembre.
- v. Objetivos y metas ambientales por cumplir.
- vi. Programas de gestión ambiental.

El desarrollo de la etapa de implantación del sistema de gestión ambiental, comprende todos aquellos elementos que permitirán lograr los objetivos de la visión ambiental de la Organización, así como mejorar la actuación ambiental de la misma. Los puntos que es necesario desarrollar en esta etapa, para estar acorde con lo establecido en la Norma ISO 14001 son los siguientes:

- i. Estructura y responsabilidades relacionadas al área ambiental.
- ii. Establecimiento de los procedimientos ambientales.
- iii. Desarrollo de un plan de formación y concienciación ambiental.
- iv. Ejecución de un plan de comunicación ambiental, tanto en lo interno como en lo externo de la empresa.
- v. Elaboración del manual de gestión ambiental.
- vi. Implantación de sistemas de control de la documentación y de las operaciones directamente relacionadas con el área ambiental.
- vii. Preparación y respuesta ante emergencias.

En la etapa de comprobación y acción correctiva, comprende los siguientes puntos:

- i. Plan de monitoreo y medición de los parámetros ambientales.
- ii. Registro y corrección de las no conformidades con el sistema de gestión ambiental.

- iii. Registro de los parámetros ambientales de la empresa.
- iv. Ejecución periódica de auditorías del sistema de gestión ambiental.

La última etapa del sistema de gestión ambiental, la comprende la revisión por la gerencia del mismo, la cual comprende un auto-análisis de la organización y de su actuación ambiental, así como las alternativas de corrección, con el fin de enmarcar el área ambiental en los principios de la mejora continua.

En la industria de curtiembres es importante que la solución de los problemas ambientales, en la medida de las posibilidades económicas y técnicas de la empresa, se dé a nivel de procesos y operaciones propias de la misma, dejando como última opción las soluciones de final de línea, es decir las que obligatoriamente tienen que eliminar los contaminantes, siendo preferible el uso de alternativas tecnológicas de producción que eviten su generación y que permitan lograr una adecuada gestión ambiental del agua. Las principales alternativas en la industria de curtiembres son (Peña Rodón, 2012):

- i. Mejoras en el control y eficiencia del proceso de curtido, estandarizando y ensayando las dosis de productos químicos curtientes (Sales de cromo) para las cuales exista un mejor nivel de agotamiento, es decir, que las cantidades de cromo residual sean las mínimas en las aguas residuales vertidas luego de los baños de curtición. Algunas recomendaciones para el proceso de curtido son: alargar la duración de los procesos, seleccionar curtientes y colorantes que presenten buena afinidad con el cuero y variar los valores de pH y temperatura de los baños a niveles que optimicen el agotamiento del producto.
- ii. Desencalado con CO<sub>2</sub>, evitando el uso de sales amoniacaes. Ambientalmente es una buena solución que permite la disminución de nitrógeno amoniacal en el efluente, pero su implantación representa costos que es necesario evaluar y ponderar en una relación costo beneficio.
- iii. Favorecer el curtido vegetal, con respecto al mineral.
- iv. Para el caso de empresas que trabajen con cueros salados es recomendable la eliminación mecánica de la sal.
- v. Reciclaje de los baños de curtido al cromo, mediante la precipitación de este compuesto y su posterior uso.
- vi. Reducción del consumo de agua mediante campañas de concienciación en el personal encargado de las operaciones de producción.

## CAPÍTULO 3. ETAPA EXPERIMENTAL.

### 3.1. Descripción del procedimiento para la elaboración del material biosorbente a partir de cáscara de plátano (*Musa sp.*).

La elaboración del material biosorbente a partir de la cáscara de plátano comprendió las etapas de: recolección, preparación, tratamiento, secado, reducción de tamaño y tamizado; las cuales se basan en etapas definidas que han sido estudiadas y ejecutadas dentro del fenómeno de biosorción y que se describen a continuación:

#### A. Recolección de las cáscaras de plátano.

Las cáscaras de plátano se recolectaron en el comedor universitario durante las primeras horas del día y se trasladaron en bolsas plásticas.



Figura 3.1 Recolección de las cáscaras de plátano.

#### B. Preparación de las cáscaras de plátano.

Una vez recolectadas las cáscaras de plátano se clasificaron aquellas que presentaban buena consistencia y tamaño regular para lavarlas y escurrirlas. Antes de cortarlas en pequeños trozos se realizaron dos ensayos, los cuales consistían en retirar la pulpa y no retirar la pulpa de las cáscaras de plátano. El residuo obtenido es un desecho común orgánico, el cual puede descomponerse naturalmente. El agua de la red utilizada para el lavado inicial puede descargarse directamente al alcantarillado ya que no contiene químicos nocivos que afecten al medio.



Figura 3.2 Preparación de las cáscaras de plátano.

### C. Tratamiento de las cáscaras de plátano.

El tratamiento de las cáscaras de plátano se apoyó en dos enfoques: sin tratamiento químico y con tratamiento químico, ambos tratamientos se aplicaron a las cáscaras con pulpa y sin pulpa, obteniéndose cuatro tipos de materiales biosorbentes:

- a) Sin Tratamiento Químico Sin Pulpa (STQSP).
- b) Sin Tratamiento Químico Con Pulpa (STQCP).
- c) Con Tratamiento Químico Sin Pulpa (CTQSP).
- d) Con Tratamiento Químico Con Pulpa (CTQCP).

El tratamiento químico consistió en colocar las cáscaras de plátano cortadas en una solución de Hidróxido de Sodio (NaOH) de concentración 0.1 N sobre un hot plate CORNING PC-420D con agitación magnética a un tiempo de 2 horas a temperatura ambiente.



**Figura 3.3** Tratamiento de las cáscaras de plátano.

### D. Secado de las cáscaras de plátano.

El secado de las cáscaras de plátano se realizó en dos fases, utilizando un horno convencional de laboratorio: la primera fase consistió en que a las cáscaras tratadas químicamente con pulpa y sin pulpa se les aplicó una deshidratación previa en un rango de temperatura de 50 a 70°C en un tiempo de 17 a 21 horas, luego se aumentó la temperatura a 110°C para secarlas de 8 a 9 horas. En la segunda fase, las cáscaras de plátano con pulpa y sin pulpa a las que no se les aplicó tratamiento químico se secaron directamente a una temperatura de 110°C durante un tiempo de 8 a 12 horas.



**Figura 3.4** Secado de las cáscaras de plátano.

### **E. Trituración de las cáscaras de plátano.**

La reducción de tamaño de las cáscaras de plátano se realizó utilizando un molino manual de Nixtamal de acero inoxidable y como producto de la molienda se obtuvo un polvo color café para los cuatro tipos de materiales.



**Figura 3.5** Trituración de las cáscaras de plátano.

### **F. Tamizado del material biosorbente.**

El polvo obtenido de los cuatro tipos de materiales (STQSP, STQCP, CTQSP y CTQCP) se hace pasar a través de una torre de tamices de mallas número 18, 35, 60, 100 y 140 (U.S.A. STANDARD TEST SIEVE) para separar las partículas trituradas y obtener diferentes tamaños de partícula inferiores a un 1 mm de diámetro. El retenido de cada malla se almacena en frascos plásticos estériles.



**Figura 3.6** Tamizado del material biosorbente y almacenamiento según el número de malla.

### **3.2. Descripción del análisis químico para la determinación de Cromo VI en el agua residual de la industria de curtiembre.**

Una vez elaborado el material biosorbente se realizó el contacto con el agua residual industrial, filtrando la solución y posteriormente verificando la cantidad de analito (Cromo VI) presente en el filtrado.

#### **3.2.1. Método seleccionado para la determinación de Cromo VI en agua residual.**

Para el estudio experimental del análisis de Cromo VI presente en el agua residual a escala de laboratorio se seleccionó el método 7196A CROMO HEXAVALENTE (COLORIMÉTRICO) por ser un método pionero en la determinación de este contaminante en ciertos tipos de agua. En el Anexo C se detalla el método seleccionado.

Antes de determinar la concentración inicial del analito en la matriz del agua residual proporcionada, se elaboró una curva de calibración preparando los reactivos necesarios que exige el método seleccionado. La línea de calibrado se traza cada vez que se analiza un set de datos para garantizar que los resultados sean fiables debido a que los valores de esta línea se han establecido anticipadamente haciendo uso de una solución estándar de trabajo.

Cabe resaltar que el método 7196A se ha adecuado con respecto al rango utilizado de concentraciones estándar de Cromo VI para la línea de calibrado, que varían de 0 a 0.810 mg Cr VI/L cuando se diluye al volumen apropiado de 10 mL (ver Tabla 3.1).

Con la finalidad de establecer un rango de volúmenes de trabajo para la curva de calibración, previamente se realizaron varios ensayos con la solución estándar de

trabajo, preparada a partir de la solución madre de Dicromato de Potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) para determinar las cantidades óptimas a tomar de dicha solución de trabajo. La Figura 3.9 presenta la curva de calibración que se traza a partir de los valores de la Tabla 3.1.

La solución madre de Dicromato de Potasio se preparó disolviendo una cantidad de 152.9 mg de  $K_2Cr_2O_7$  en agua destilada a un volumen final de 100 mL. De esta solución se toma una alícuota de 1 mL, la cual se diluyó a 100 mL para obtener la solución estándar de trabajo, que es la décima parte de la concentración de la solución madre.

Considerando la dilución de soluciones del método y la realizada anteriormente se efectúan los siguientes cálculos para determinar la concentración de la solución de trabajo:

$$C_1V_1 = C_2V_2 \text{ (Ecuación 3.1)}$$

$$C_2 = \frac{C_1V_1}{V_2} \text{ (Ecuación 3.2)}$$

$$C_2 = \frac{1529 \text{ mg/L} \times 1 \text{ mL}}{100 \text{ mL}} = 15.29 \frac{\text{mg } K_2Cr_2O_7}{L}$$

Después de obtener el valor de la concentración de la solución de trabajo se establece la concentración de Cromo VI que se utilizará para trazar la curva de calibración como se muestra a continuación:

$$15.29 \frac{\text{mg } K_2Cr_2O_7}{L} \times \frac{1 \text{ g } K_2Cr_2O_7}{1000 \text{ mg } K_2Cr_2O_7} \times \frac{1 \text{ gmol } K_2Cr_2O_7}{294.1844 \text{ g } K_2Cr_2O_7} \times \frac{2 \text{ gmol } Cr \text{ VI}}{1 \text{ gmol } K_2Cr_2O_7} \\ \times \frac{51.996 \text{ g } Cr \text{ VI}}{1 \text{ gmol } Cr \text{ VI}} \times \frac{1000 \text{ mg } Cr \text{ VI}}{1 \text{ g } Cr \text{ VI}} = 5.40 \frac{\text{mg } Cr \text{ VI}}{L}$$

A los volúmenes de la solución estándar de  $K_2Cr_2O_7$  mostrados en la Tabla 3.1 se les llevó a un volumen final de 10 mL con agua destilada. Además, se adicionó un volumen de 0.25 mL de Ácido Sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) obteniendo un medio ácido a un pH de 2 +/- 0.5 y 0.20 mL de Difenilcarbazida hasta observar el cambio de color a un tono violeta (Figura 3.7).



**Figura 3.7** Muestras preparadas para análisis en equipo colorimétrico.

Las siete muestras preparadas se analizaron en el equipo de espectrofotometría UV visible para obtener los valores de absorbancia de cada una (Figura 3.8).

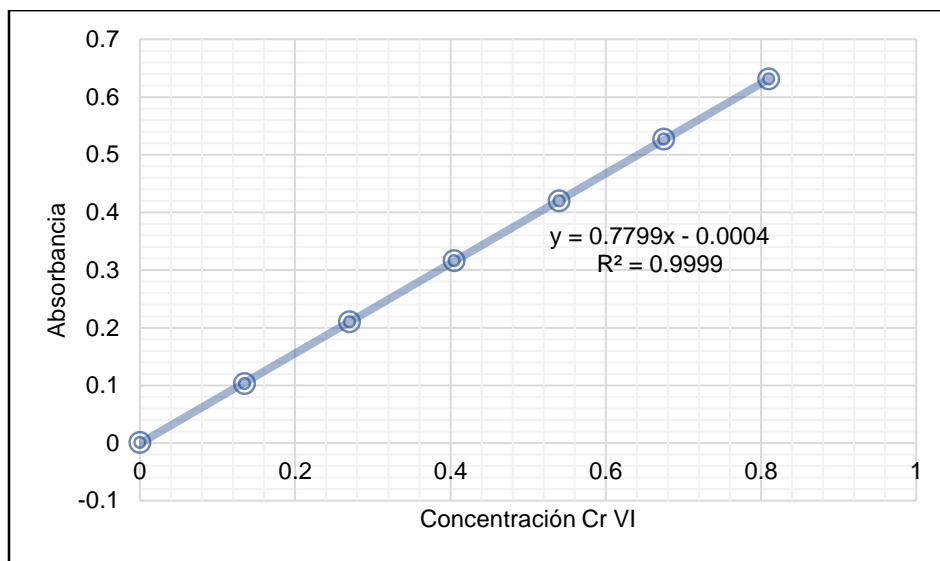


**Figura 3.8** Espectrofotómetro UV Visible Shimadzu UV-1700.

**Tabla 3.1** Datos para elaborar la curva de calibración a partir de la solución estándar de  $K_2Cr_2O_7$ .

Solución estándar de $K_2Cr_2O_7$ (mL)	Volumen de agua destilada (mL)	Concentración de Cr VI (mg/L) = $\frac{sln.std\ de\ K_2Cr_2O_7\ (mL) \times 5.4\ mg\ Cr\ VI/L}{10\ mL\ muestra}$	Absorbancia
0	10	0	0.001
0.25	9.75	0.135	0.103
0.50	9.50	0.270	0.210
0.75	9.25	0.405	0.316
1.00	9.00	0.540	0.420
1.25	8.75	0.675	0.527
1.50	8.50	0.810	0.631





**Figura 3.9** Curva de calibración de la solución estándar de trabajo para el análisis de Cromo VI.

Con el propósito de establecer la concentración inicial de Cromo VI disuelto en el agua, se utilizó el mismo equipo colorimétrico con un índice de absorbancia de aproximadamente 40000 a una longitud de onda de 540 nm. Analizando la muestra de la matriz de agua residual proporcionada por la industria de curtiembre y recolectada de la Celda 1 de la Primera Unidad de Tratamiento de Aguas Residuales; el equipo reportó un valor aproximadamente igual a cero de absorbancia, lo que significó que el agua no presentaba Cromo VI disuelto.

Por lo tanto, para evaluar la efectividad del material biosorbente proveniente de la cáscara de plátano (*Musa sp.*) en cuanto a la remoción del Cromo VI se procedió a la contaminación de dicha matriz agregando  $K_2Cr_2O_7$  seco (grado de reactivo analítico), a una concentración inicial teórica de aproximadamente 1575 mg Cr VI/L. La solución a utilizar en todos los análisis fue contaminada con una cantidad de 4.9011 g de  $K_2Cr_2O_7$  para un volumen de 1.1 L.

La concentración real de la matriz de agua se calculó utilizando la ecuación expresada en la Figura 3.9. Para ello, se realizó un análisis por triplicado de la matriz tomando un volumen de 2 mL, el cual se filtró para separar el material particulado. Posteriormente, se adicionó una alícuota de 0.2 mL de Hidróxido de Sodio (NaOH) de concentración 1 N previo a la dilución del volumen final de 100 mL en un balón volumétrico, con el objetivo de preservar la muestra para mantener las características de la solución a analizar.

Luego se tomó un volumen de 0.25 mL de la muestra diluida, llevando a un volumen final de 10 mL con agua destilada, se añadieron 0.25 mL de  $H_2SO_4$  y 0.2 mL de Difenilcarbazida, obteniéndose así las lecturas de absorbancia de las tres muestras

a analizar. De estas lecturas se tomó el valor promedio de absorbancia para determinar el valor de la concentración de Cromo VI, que al multiplicarlo por el factor de dilución de 2000 se obtuvo una concentración real muy alta del analito (ver Tabla 3.2).

**Tabla 3.2** Concentración inicial de la matriz de agua residual.

Muestra	Absorbancia	Absorbancia promedio	Concentración de Cr VI (mg/L)	Concentración de Cr VI (mg/L) × F.D.=2000
1	0.478	0.549	0.7045	1408.9824
2	0.635			
3	0.534			

### 3.2.2. Selección del material biosorbente óptimo a utilizar en los ensayos de filtración.

Según la sección 3.1 los materiales biosorbentes disponibles para los ensayos de filtración son cuatro:

- a) Sin Tratamiento Químico Sin Pulpa (STQSP).
- b) Sin Tratamiento Químico Con Pulpa (STQCP).
- c) Con Tratamiento Químico Sin Pulpa (CTQSP).
- d) Con Tratamiento Químico Con Pulpa (CTQCP).

Con la finalidad de determinar cuál material es el óptimo en la remoción de Cromo VI se evaluó la efectividad de cada uno. Para ello se realizó un análisis de tamaño de partícula a través de una prueba de tamizado y los resultados se presentan a continuación en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3** Cantidad retenida en tamices para cada tipo de material biosorbente.

<b>Sin Tratamiento Químico Sin Pulpa (STQSP)</b>			
<b>Malla</b>	<b>Diámetro de partícula (mm)</b>	<b>Polvo (g)</b>	<b>% Retenido</b>
No. 18	1	3.1	1.57
No. 35	0.5	27.5	13.92
No. 60	0.25	124.7	63.11
No. 100	0.15	29.3	14.83
No. 140	0.106	11.1	5.62
Bandeja	<0.106	1.9	0.96
<b>TOTAL</b>		<b>197.6</b>	<b>100</b>
<b>Sin Tratamiento Químico Con Pulpa (STQCP)</b>			
<b>Malla</b>	<b>Diámetro de partícula (mm)</b>	<b>Polvo (g)</b>	<b>% Retenido</b>
No. 18	1	5.1	1.32
No. 35	0.5	42.5	11
No. 60	0.25	226.2	58.54
No. 100	0.15	80.5	20.83
No. 140	0.106	22.1	5.72
Bandeja	<0.106	10	2.59
<b>TOTAL</b>		<b>386.4</b>	<b>100</b>
<b>Con Tratamiento Químico Sin Pulpa (CTQSP)</b>			
<b>Malla</b>	<b>Diámetro de partícula (mm)</b>	<b>Polvo (g)</b>	<b>% Retenido</b>
No. 18	1	1.2	1.02
No. 35	0.5	15.8	13.46
No. 60	0.25	72.9	62.10
No. 100	0.15	19.6	16.70
No. 140	0.106	6.5	5.54
Bandeja	<0.106	1.4	1.19
<b>TOTAL</b>		<b>117.4</b>	<b>100</b>

continúa

**Tabla 3.3** Cantidad retenida en tamices para cada tipo de material biosorbente (continuación).

<b>Con Tratamiento Químico Con Pulpa (CTQCP)</b>			
<b>Malla</b>	<b>Diámetro de partícula (mm)</b>	<b>Polvo (g)</b>	<b>% Retenido</b>
No. 18	1	1.1	0.54
No. 35	0.5	29	14.25
No. 60	0.25	115.7	56.86
No. 100	0.15	33.8	16.61
No. 140	0.106	17.1	8.40
Bandeja	<0.106	6.8	3.34
<b>TOTAL</b>		<b>203.5</b>	<b>100</b>

A partir de los resultados obtenidos anteriormente se estableció como mejores diámetros de partícula, los correspondientes a las mallas No. 35, 60 y 100 (U.S.A. STANDARD TEST SIEVE) cuyas medidas son 0.5, 0.25 y 0.15 mm respectivamente. Esto se debe a que la granulometría más práctica en los procesos de biosorción es la menor a 1 mm (Ordoñez Vinueza y Moreno Farfán, 2013) y son los tamices donde se retuvo mayor cantidad de polvo.

Para realizar las pruebas de contacto del agua residual con los cuatro tipos de materiales se pesó 0.2 g de polvo de cada malla seleccionada (No. 35, 60 y 100) correspondiente a cada tipo (STQSP, STQCP, CTQSP y CTQCP). Asimismo, se midió un volumen de 25 mL de la matriz de agua residual previamente homogenizada, colocándolo en un Erlenmeyer de 50 mL donde anticipadamente el polvo había sido agregado, se obtuvo un total de 12 pruebas. Posteriormente se colocó el sistema agua-biosorbente en agitación magnética durante un tiempo total 4 horas (Figura 3.10).



**Figura 3.10** Agitación del sistema agua residual-material biosorbente.

Una vez finalizado el tiempo estipulado de 4 horas, se procedió a los ensayos de filtración, los cuales se hicieron por triplicado para cada prueba y consistieron en:

tomar 2 mL de muestra agitada y filtrarla, captando el líquido filtrado en beaker de 50 mL. Luego se agregó a este un volumen de 0.2 mL de Hidróxido de Sodio (NaOH) de concentración 1 N, aforando a 100 mL en balón volumétrico (Figura 3.11). Seguidamente se trasvasó la solución a un recipiente plástico estéril, almacenando a una temperatura de 4°C (Figura 3.12).



**Figura 3.11** Sistema de filtración y dilución de las muestras.



**Figura 3.12** Envasado de las muestras.

Para el análisis de las muestras preservadas se realizó el mismo procedimiento descrito al final del apartado 3.2.1, donde se toma la alícuota de 0.25 mL de dichas muestras para obtener las lecturas de absorbancia por triplicado. El valor de la concentración de cada muestra almacenada se calculó nuevamente utilizando la ecuación de la línea recta de la Figura 3.9 y considerando el promedio de la absorbancia para la variable dependiente. También se determinó el porcentaje de remoción de Cromo VI tomando en cuenta el valor de la concentración inicial reportado en la Tabla 3.2. A continuación, en la Tabla 3.4 se presentan los resultados obtenidos:

**Tabla 3.4** Resultados de la concentración final y porcentaje de remoción de Cromo VI para cada muestra.

<b>Material</b>	<b>Malla</b>	<b>Diámetro de partícula (mm)</b>	<b>Absorbancia</b>	<b>Absorbancia promedio</b>	<b>Concentración final de Cr VI (mg/L)</b>	<b>Concentración final de Cr VI (mg/L) × F.D.=2000</b>	$\%R = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100\%$
STQCP	No. 35	0.5	0.341	0.390	0.5010	1002.0896	28.88
			0.416				
			0.414				
	No.60	0.25	0.425	0.431	0.5528	1105.5224	21.54
			0.430				
			0.437				
	No. 100	0.15	0.426	0.443	0.5686	1137.1506	19.29
			0.476				
			0.427				
CTQSP	No. 35	0.5	0.462	0.410	0.5263	1052.5237	25.30
			0.390				
			0.378				
	No.60	0.25	0.551	0.494	0.6335	1267.0828	10.07
			0.484				
			0.446				
	No. 100	0.15	0.484	0.477	0.6117	1223.4871	13.17
			0.476				
			0.470				

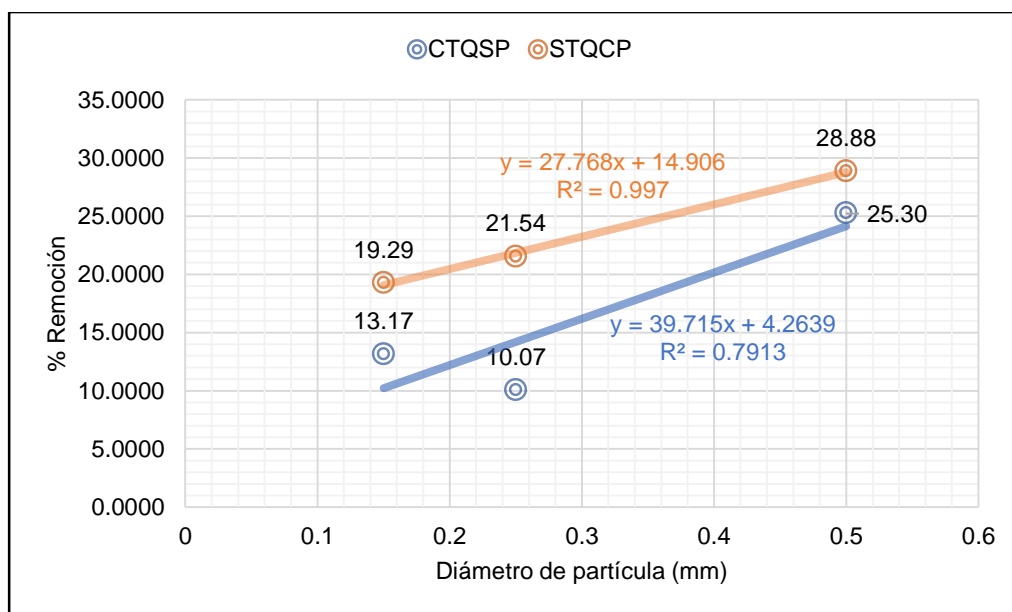
continúa

**Tabla 3.4** Resultados de la concentración final y porcentaje de remoción de Cromo VI para cada muestra (continuación).

Material	Malla	Diámetro de partícula (mm)	Absorbancia	Absorbancia promedio	Concentración final de Cr VI (mg/L)	Concentración final de Cr VI (mg/L) × F.D.=2000	$\%R = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100\%$
STQSP	No. 35	0.5	0.203	0.324	0.4160	831.9810	40.95
			0.293				
			0.476				
	No.60	0.25	0.733	0.642	0.8233	1646.6214	-16.87
			0.754				
			0.438				
	No. 100	0.15	0.746	0.620	0.7951	1590.2035	-12.86
			0.641				
			0.472				
CTQCP	No. 35	0.5	0.559	0.632	0.8109	1621.8318	-15.11
			0.713				
			0.624				
	No.60	0.25	0.523	0.697	0.8947	1789.3758	-27.00
			0.812				
			0.757				
	No. 100	0.15	0.525	0.605	0.7759	1551.7368	-10.13
			0.626				
			0.663				

Según la Tabla 3.4 los materiales STQCP y CTQSP son los más efectivos en cuanto a un porcentaje de remoción positivo. Por lo tanto, los materiales STQSP y CTQCP se descartaron debido a la obtención de resultados incoherentes.

La Figura 3.13 presenta el porcentaje de remoción de los dos mejores materiales biosorbentes (STQCP y CTQSP) según el diámetro de partícula. A partir de esto se justifica como material óptimo a utilizar el STQCP, ya que la ecuación de regresión presenta un mejor ajuste de los datos. Además, los datos obtenidos de este material son menos sensibles en cuanto a la variabilidad y dispersión; esto indica que cualquier tamaño de partícula es utilizable. Sin embargo, el polvo triturado presentó un mayor porcentaje de retenido en la Malla No. 60 (0.25 mm) según la Tabla 3.3.



**Figura 3.13** Porcentaje de remoción de Cromo VI para los materiales biosorbentes STQCP y CTQSP.

Así mismo, la selección del material STQCP se justifica debido a que la naturaleza de este material, compuesto por lignina, celulosa y hemicelulosa; que son grupos funcionales que forman una red interna permiten retener el metal en su estructura y removerlo de la solución contaminada. Por esa razón, los porcentajes de remoción de los puntos del material STQCP son mayores que los del CTQSP, ya que la estructura funcional del primer material se mantiene intacta con respecto al segundo.

### 3.3. Estudio de la capacidad de adsorción de Cromo VI.

Con el objetivo de evaluar la capacidad de adsorción del material biosorbente obtenido a partir de la cáscara de plátano (*Musa sp.*) en la remoción de Cromo VI se estudió la influencia de las variables cantidad de material y tiempo de contacto en el proceso.



### 3.3.1. Influencia de la cantidad de material biosorbente en el proceso de biosorción.

Para el establecimiento de la cantidad óptima de material biosorbente en los ensayos a realizar se trabajó con el tipo Sin Tratamiento Químico Con Pulpa (STQCP) a un diámetro de partícula de 0.25 mm, como se estableció anteriormente.

Con el fin de determinar la masa óptima de biosorbente se probó un rango inicial de masas desde 0.2 g hasta 0.4 g, variando en 0.05 g a un volumen de 25 mL de agua contaminada, ya que investigaciones previas reportaban resultados que a mayor cantidad de material existe una menor concentración final de contaminante. Sin embargo, en la Tabla 3.5 se muestra que los valores de absorbancia leídos en el equipo colorimétrico no variaron significativamente, esto indicaba que para ese rango de masas no se observa un valor de concentración final notoriamente distinto (calculada con la ecuación de la Figura 3.9), debido a que la diferencia entre estas es muy pequeña.

**Tabla 3.5** Prueba de las cantidades iniciales del material biosorbente.

Masa (g)	Absorbancia	Absorbancia promedio	Concentración final de Cr VI (mg/L)	Concentración final de Cr VI (mg/L) × F.D.=2000
0.2	0.375	0.386	0.4954	990.8963
	0.385			
	0.397			
0.25	0.341	0.338	0.4339	867.8036
	0.337			
	0.337			
0.3	0.369	0.368	0.4724	944.7365
	0.359			
	0.375			
0.35	0.531	0.496	0.6365	1272.9837
	0.476			
	0.480			
0.4	0.533	0.533	0.6839	1367.8677
	0.541			
	0.525			

Por lo tanto, para mantener la relación de masa de biosorbente a volumen de matriz de agua se reduce el volumen a 10 mL disminuyendo también las masas de

biosorbente para garantizar un mayor contacto entre el material y el agua residual (ver Tabla 3.6).

**Tabla 3.6** Disminución del volumen y de las cantidades utilizadas de material biosorbente.

<b>Masa (g)</b>	<b>Absorbancia</b>	<b>Absorbancia promedio</b>	<b>Concentración final de Cr VI (mg/L)</b>	<b>Concentración final de Cr VI (mg/L) × F.D.=2000</b>
0.02	0.441	0.430	0.5519	1103.7312
	0.440			
	0.410			
0.04	0.358	0.383	0.4916	989.2030
	0.382			
	0.410			
0.06	0.435	0.426	0.5467	1093.4735
	0.425			
	0.417			
0.08	0.441	0.429	0.5506	1101.1668
	0.467			
	0.380			
0.1	0.389	0.407	0.5224	1044.7493
	0.440			
	0.391			

Conforme a la Tabla 3.6 los valores de concentración final de Cromo VI no resultaron útiles debido a que son muy altos y cercanos entre sí, cuando se pretende que esos resultados disminuyan considerablemente a medida que se agrega mayor cantidad de material. Por lo tanto, se optó por realizar ensayos utilizando cantidades mayores de 1, 2.5 y 3.5 g con la finalidad de saturar la muestra de agua residual de 10 mL. A continuación, la Tabla 3.7 presenta los resultados obtenidos:

**Tabla 3.7** Masas de material biosorbente para saturación del volumen de agua residual.

Masa (g)	Absorbancia	Absorbancia promedio	Concentración final de Cr VI (mg/L)	Concentración final de Cr VI (mg/L) × F.D.=2000
1	0.007	0.008	0.0112	22.4695
	0.009			
	0.009			
2.5	0.011	0.010	0.0134	26.7436
	0.012			
	0.009			
3.5	0.019	0.020	0.0262	52.3881
	0.022			
	0.020			

Se tomó la masa de 1 g como punto máximo para el contacto con el volumen de agua de 10 mL según los resultados de la Tabla 3.7. Las masas de 2.5 y 3.5 g presentaron valores de absorbancia ligeramente mayores al de 1 g, ya que la coloración presente en la muestra analizada se debe a una mayor saturación del sistema reflejando una lectura falsa de Cromo VI. Luego de varias pruebas se establece como punto mínimo la masa de 0.25 g de material biosorbente para el sistema adsorbato-adsorbente, considerando los resultados obtenidos de la Tabla 3.6.

Los resultados de las concentraciones finales y porcentajes de remoción de Cromo VI se muestran en la Tabla 3.8 siguiendo la metodología para los ensayos de filtración descrita al final del apartado 3.2.2 y usando las cantidades de 0.25, 0.375, 0.5, 0.625, 0.75 y 1 g.

**Tabla 3.8** Variación de las cantidades de material biosorbente.

Masa (g)	Absorbancia	Absorbancia promedio	Concentración final de Cr VI (mg/L)	Concentración final de Cr VI (mg/L) × F.D.=2000	$\%R = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100\%$
0.25	0.386	0.327	0.4194	838.8195	40.47
	0.274				
	0.320				
0.375	0.258	0.260	0.3344	668.7110	52.54
	0.257				
	0.266				
0.5	0.182	0.187	0.2408	481.5061	65.83
	0.198				
	0.182				
0.625	0.094	0.094	0.1207	241.3026	82.87
	0.094				
	0.093				
0.75	0.076	0.077	0.0997	199.4166	85.85
	0.076				
	0.080				
1	0.007	0.008	0.0112	22.4695	98.41
	0.009				
	0.009				

### 3.3.2. Influencia del tiempo de contacto en el proceso de biosorción.

Una vez establecida la cantidad óptima de material biosorbente, cuya masa es de 1 g para un volumen de 10 mL como se reporta en la Tabla 3.8 se hace un estudio de la velocidad de adsorción a la que el biosorbente remueve el contaminante del agua residual siempre utilizando el material STQCP a un diámetro de partícula de 0.25 mm.

Para evaluar la influencia de la variable tiempo se hace el contacto entre el material y el agua residual a un tiempo total de 4 horas, tomando muestras cada 30 minutos hasta completar el tiempo total estipulado (es decir, la primera muestra se filtrará a los 30 minutos por triplicado, la segunda muestra a los 60 minutos y así sucesivamente hasta completar los 240 minutos) calculando la concentración final y el porcentaje de remoción de Cromo VI para cada una y percatándose del tiempo en el que el analito es retirado del medio. Todo esto se realiza siguiendo la misma metodología de los ensayos de filtración (ver Tabla 3.9).

**Tabla 3.9** Variación del tiempo de contacto del sistema adsorbato-adsorbente.

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Absorbancia</b>	<b>Absorbancia promedio</b>	<b>Concentración final de Cr VI (mg/L)</b>	<b>Concentración final de Cr VI (mg/L) × F.D.=2000</b>	<b>%R = <math>\frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100\%</math></b>
30	0.094	0.089	0.1151	230.1900	83.66
	0.088				
	0.086				
60	0.074	0.076	0.0980	195.9973	86.09
	0.073				
	0.081				
90	0.058	0.063	0.0818	163.5142	88.39
	0.064				
	0.068				
120	0.047	0.045	0.0578	115.6445	91.79
	0.046				
	0.041				
150	0.032	0.030	0.0394	78.8874	94.40
	0.032				
	0.027				
180	0.023	0.021	0.0279	55.8073	96.04
	0.020				
	0.021				
210	0.019	0.018	0.0241	48.1140	96.59
	0.018				
	0.018				
240	0.010	0.010	0.0138	27.5984	98.04
	0.011				
	0.010				

## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

El método considerado para la evaluación de la cáscara de plátano (*Musa sp.*) como material biosorbente fue dentro de un proceso discontinuo o batch, simulando a nivel de laboratorio el sistema de adsorción.

Para el análisis y discusión de resultados se utilizaron los métodos de calibración con la finalidad de establecer la regresión y correlación de los resultados obtenidos en la parte experimental, cuyo objetivo fue determinar si los factores variación de la cantidad agregada de material y tiempo de agitación establecidos, influyen en la variable respuesta que fue la concentración final de Cromo VI de las muestras de agua residual industrial.

### 4.1. Modelos isotérmicos y cinéticos de adsorción.

Considerando el apartado 1.3.4, los datos experimentales en condiciones de equilibrio del proceso se expresaron como isothermas de adsorción donde se describe la interacción entre adsorbato-adsorbente. Asimismo, para evaluar la velocidad con la cual el contaminante en estudio fue retirado del medio acuoso se establecieron los modelos cinéticos.

#### 4.1.1. Modelos isotérmicos aplicados al material biosorbente.

Las isothermas de Langmuir (1915) y Freundlich (1939) son los dos modelos comúnmente más utilizados para referir la adsorción de un notable componente. Los dos modelos son permitidos únicamente bajo ciertas condiciones y sus resultados no pueden ser extrapolados cuando se varían las condiciones del medio (Ordoñez Vinuesa y Moreno Farfán, 2013).

En este apartado se presentan los resultados obtenidos para el material STQCP a partir de los dos modelos isotérmicos de adsorción mencionados anteriormente, con el fin de determinar la capacidad de adsorción del material seleccionado y verificar cómo se lleva a cabo el proceso.

La capacidad de adsorción se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$q = \frac{(C_i - C_f) * V}{m} \text{ (Ecuación 4.1)}$$

Donde:

q: Capacidad de adsorción adsorbato – adsorbente (mg/g).

C<sub>i</sub>: Concentración inicial de adsorbato en solución (mg/L).

C<sub>f</sub>: Concentración final de adsorbato en solución (mg/L).

m: masa de material biosorbente agregada (g).

V: volumen de la muestra (L).

Para realizar los cálculos correspondientes a los modelos isotérmicos se realizó la linealización de las ecuaciones 1.2 y 1.3 del apartado 1.3.4 expresándose de la siguiente manera:

i. Linealización de la ecuación de Langmuir.

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_{max}K_L C_f} + \frac{1}{q_{max}} \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

ii. Linealización de la ecuación de Freundlich.

$$\log q = \frac{1}{n} \log C_f + \log K_F \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

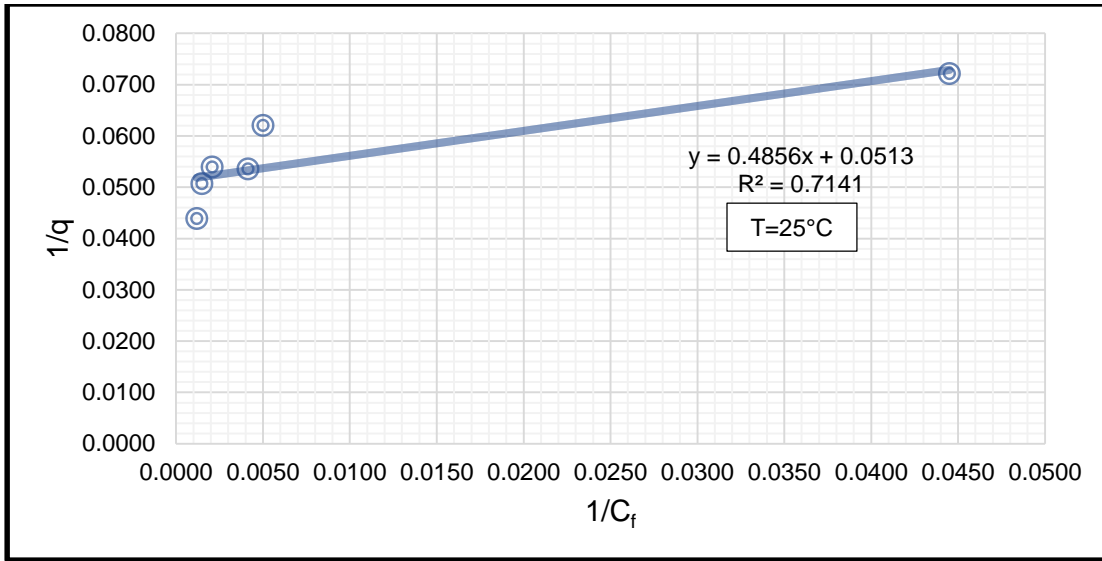
A partir de los resultados de la Tabla 3.8 se utilizaron las ecuaciones linealizadas establecidas anteriormente con el volumen definido de 10 mL de agua residual, considerando las masas de material biosorbente agregadas con sus respectivas concentraciones finales de Cromo VI.

A continuación, en la Tabla 4.1 se presentan los resultados de las ecuaciones de Langmuir y Freundlich linealizadas.

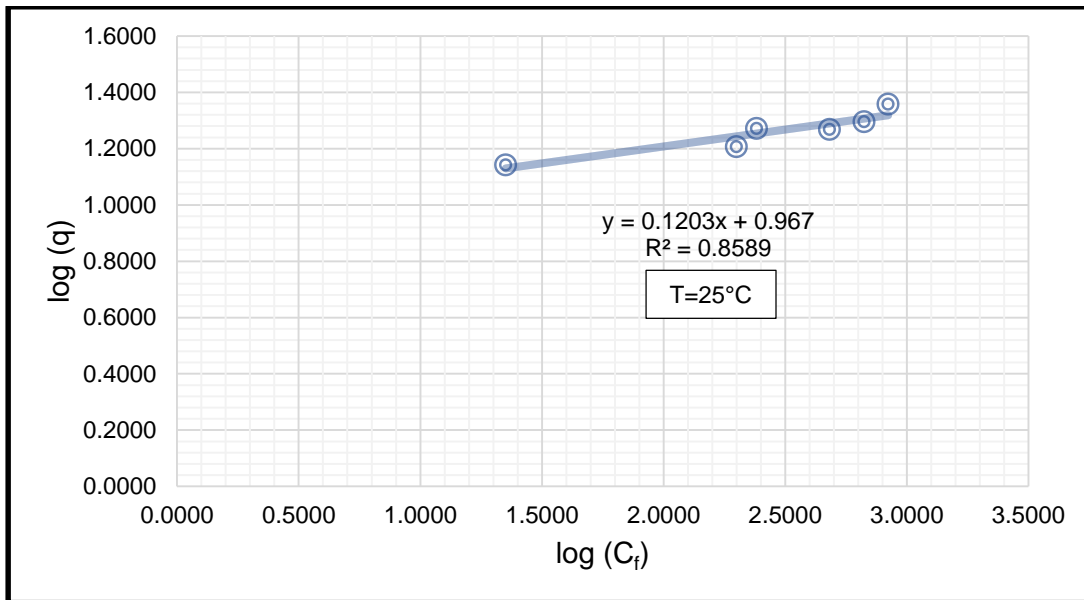
**Tabla 4.1** Resultados obtenidos a partir de la linealización de las isotermas de Langmuir y Freundlich.

Masa (g)	C <sub>i</sub> (mg/L)	C <sub>f</sub> (mg/L)	q (mg/g)	Langmuir		Freundlich	
				1/C <sub>f</sub>	1/q	log (C <sub>f</sub> )	log (q)
0.25	1408.9824	838.8195	22.8065	0.0012	0.0438	2.9237	1.3581
0.375		668.7110	19.7406	0.0015	0.0507	2.8252	1.2954
0.5		481.5061	18.5495	0.0021	0.0539	2.6826	1.2683
0.625		241.3026	18.6829	0.0041	0.0535	2.3826	1.2714
0.75		199.4166	16.1275	0.0050	0.0620	2.2998	1.2076
1		22.4695	13.8651	0.0445	0.0721	1.3516	1.1419

Seguidamente, en las Figuras 4.1 y 4.2 se muestran los dos modelos isotérmicos de adsorción definidos en la tabla anterior.



**Figura 4.1** Isotherma de Langmuir.



**Figura 4.2** Isotherma de Freundlich.

El criterio de selección de las gráficas de la ecuación de la línea recta, observando todos los puntos y su pendiente se basa en el aspecto de que las isothermas de adsorción estiman la influencia de la cantidad de material agregada y por lo tanto se consideró todo el rango de masas de material biosorbente agregadas al sistema en los diferentes ensayos.

El modelo proveniente de las dos isothermas resultó ser bueno basándose en los niveles de correlación como se muestra a continuación en la Tabla 4.2:



**Tabla 4.2** Niveles de correlación para el estudio del modelo.

$0 < R^2 < 0.6$	El modelo es pobre.
$0.6 < R^2 < 0.9$	El modelo es bueno.
$0.9 < R^2 < 1$	El modelo es muy bueno.

Fuente: Ordóñez Vinueza y Moreno Farfán, (2013).

Según los resultados obtenidos en las figuras anteriores, la isoterma que más se ajustó a los datos experimentales fue la isoterma de Freundlich, tomando en cuenta su coeficiente de correlación de  $R^2=0.8589$ . En cambio, el coeficiente de correlación para la isoterma de Langmuir fue de  $R^2=0.7141$ .

El modelo isotérmico de Freundlich representa una mayor linealidad debido a que esta isoterma no asume homogeneidad en la superficie, así como el límite en la carga máxima de adsorción. Esto concuerda con la selección del material STQCP mencionado en el apartado 3.2.2, al cual no se le ha alterado químicamente su estructura funcional, teniendo una superficie heterogénea y captando el contaminante de la solución mediante un mecanismo de adsorción física.

En la Tabla 4.3 se presentan las constantes involucradas de interés de los modelos isotérmicos de Langmuir y Freundlich.

**Tabla 4.3** Constantes de los modelos isotérmicos de Langmuir y Freundlich.

Langmuir		Freundlich	
$K_L$	$q_{m\acute{a}x}$	$K_F$	$n$
0.1056	19.4932	9.2683	8.3126

#### 4.1.2. Modelos cinéticos aplicados al material biosorbente.

La cinética de adsorción describe la velocidad a la que el adsorbato es eliminado del seno de la disolución debido a su retención sobre la superficie del sólido adsorbente. La cinética indica el tiempo medio que tarda una molécula de adsorbato en vencer las resistencias que se oponen a su unión a los grupos funcionales situados sobre la superficie del adsorbente (transferencia de masa desde el seno de la disolución hasta la partícula de sólido, difusión a través de la película interfacial sólido-disolución, reacción química).

El estudio de la cinética de adsorción en el tratamiento de aguas residuales es importante ya que proporciona un conocimiento a profundidad de los mecanismos por los que discurren las reacciones de adsorción (Sánchez Pina, 2014).

Los modelos cinéticos de adsorción mayormente utilizados son la ecuación de Pseudo – Primer Orden o modelo de Lagergren y la ecuación de Pseudo – Segundo

Orden o modelo de Ho y McKay. Ambos modelos se utilizaron para establecer una relación entre el material STQCP y el analito en estudio (Cromo VI), según la afinidad y características de uno hacia otro. También se estudió la velocidad a la cual el material fue capaz de retener el metal presente en la muestra.

Para realizar los cálculos correspondientes a los modelos cinéticos se realizó la linealización de las ecuaciones 1.5 y 1.7 del apartado 1.3.4 expresándose de la siguiente manera:

- i. Linealización del modelo de Pseudo – Primer Orden.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

- ii. Linealización del modelo de Pseudo – Segundo Orden.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (\text{Ecuación 4.5})$$

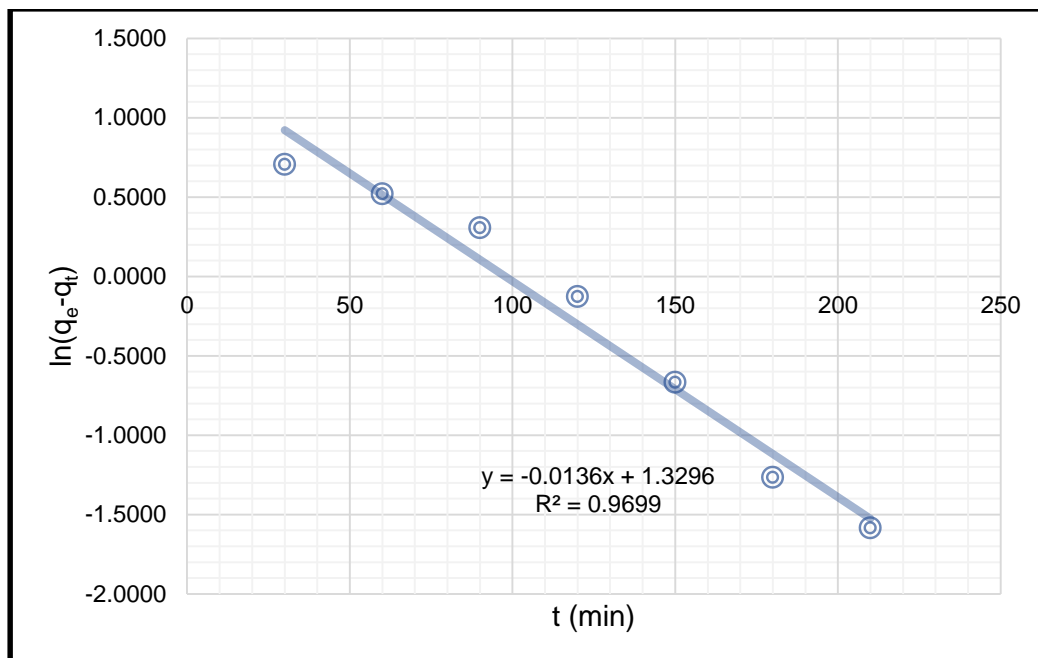
A partir de los resultados de la Tabla 3.9 se utilizaron las ecuaciones linealizadas establecidas anteriormente con el volumen definido de 10 mL de agua residual y una masa de 1 g de material STQCP, considerando el tiempo de contacto del sistema adsorbato – adsorbente con sus respectivas concentraciones finales de Cromo VI.

En la Tabla 4.4, se presentan los resultados de los modelos de Pseudo – Primer Orden y Pseudo – Segundo Orden linealizados.

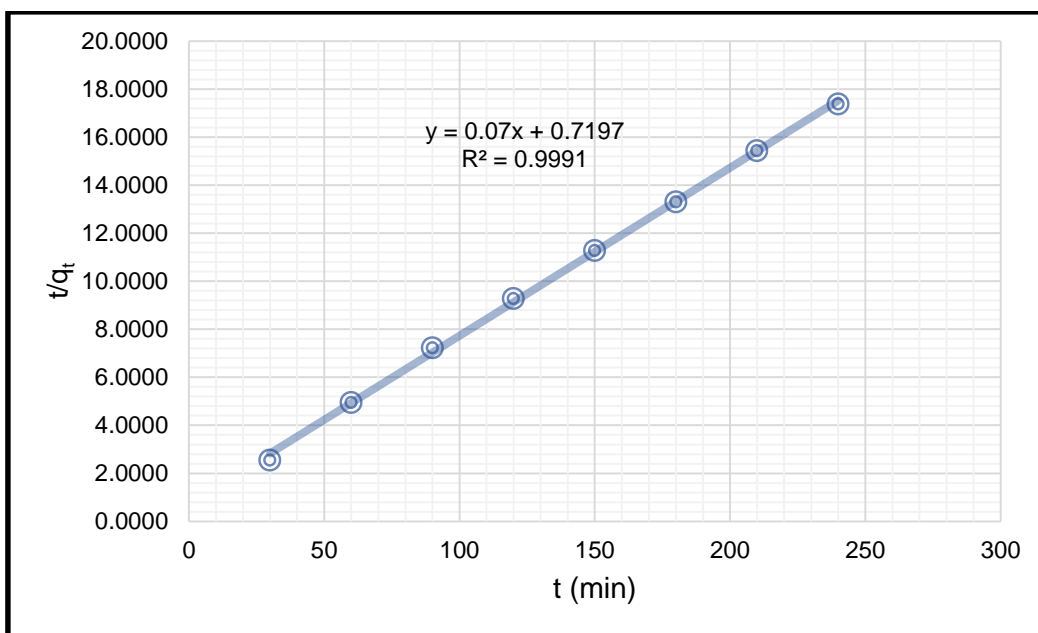
**Tabla 4.4** Resultados obtenidos a partir de la linealización de los modelos de Pseudo – Primer Orden y Pseudo – Segundo Orden.

Tiempo (min)	C <sub>i</sub> (mg/L)	C <sub>f</sub> (mg/L)	q <sub>t</sub> (mg/g)	Pseudo – Primer Orden	Pseudo – Segundo Orden
				ln (q <sub>e</sub> -q <sub>t</sub> )	t/q <sub>t</sub>
30	1408.9824	230.1900	11.7879	0.7060	2.5450
60		195.9973	12.1299	0.5212	4.9465
90		163.5142	12.4547	0.3069	7.2262
120		115.6445	12.9334	-0.1273	9.2783
150		78.8874	13.3009	-0.6677	11.2774
180		55.8073	13.5318	-1.2655	13.3020
210		48.1140	13.6087	-1.5840	15.4313
240		27.5984	13.8138	<b>INDEFINIDO</b>	17.3739

A continuación, las Figuras 4.3 y 4.4 muestran los dos modelos cinéticos de adsorción definidos en la tabla anterior.



**Figura 4.3** Modelo de Pseudo – Primer Orden.



**Figura 4.4** Modelo de Pseudo – Segundo Orden.

El criterio de selección de las gráficas de la ecuación de la línea recta, tomando en cuenta todos los puntos y su pendiente se basó en que los modelos cinéticos describen la velocidad de adsorción. Por lo tanto, era necesario considerar todo el rango de tiempo de trabajo, en el cual el sistema sólido – líquido estuvo en agitación.

La recta proveniente de los dos modelos cinéticos resultó ser muy buena basándose en los niveles de correlación como se mostró en la Tabla 4.2.

Según los resultados obtenidos en las figuras anteriores, el modelo cinético que más se ajustó a los datos experimentales fue la ecuación de Pseudo – Segundo Orden, tomando en cuenta su coeficiente de correlación de  $R^2=0.9991$ . En cambio, el coeficiente de correlación para la ecuación de Pseudo – Primer Orden fue de  $R^2=0.9699$ .

El modelo cinético de Pseudo – Segundo Orden presenta una mayor linealidad, debido a que describe de una mejor forma la velocidad de adsorción a la que el material biosorbente remueve el contaminante del agua industrial, teniendo un coeficiente superior al del otro modelo ensayado.

En la Tabla 4.5 se presentan las constantes involucradas de interés de los modelos cinéticos de Pseudo – Primer Orden y Pseudo – Segundo Orden.

**Tabla 4.5** Constantes de los modelos cinéticos de Pseudo – Primer Orden y Pseudo – Segundo Orden.

Pseudo – Primer Orden		Pseudo – Segundo Orden	
$k_1$	$q_e$	$k_2$	$q_e$
0.0136	3.7795	0.0068	14.2857

#### 4.2. Análisis de la aplicación de los métodos de calibración.

Los métodos instrumentales llevan a cabo técnicas que utilizan espectroscopía de absorción o emisión a varias longitudes de onda, diferentes métodos electroquímicos, espectrometría de masas, cromatografía gaseosa o líquida, métodos radioquímicos y térmicos, probablemente suponen al menos el 90% de todo el trabajo analítico actual. Existen varias razones para considerar estos métodos; en primer lugar, los métodos instrumentales pueden realizar análisis que son difíciles o imposibles por los métodos clásicos; en segundo lugar, para una gran variedad de muestras, el análisis instrumental suele ser muy rápido y a menudo más barato que la laboriosidad de los métodos manuales y en último lugar, los modernos instrumentos analíticos están casi siempre interconectados con computadoras personales que proporcionan sofisticados sistemas de control y de almacenamiento, tratamiento e informes de datos.

Los procedimientos estadísticos utilizados en análisis instrumental deben proporcionar siempre información de la precisión y exactitud de las medidas. Deben reflejar además las ventajas técnicas de dichos métodos, especialmente la

posibilidad de cubrir un gran intervalo de concentraciones, y manejar con rapidez muchas muestras (Miller, J.N. y Miller, J.C., 2002).

#### **4.2.1. Coeficiente de correlación momento – producto de los modelos isotérmicos y cinéticos.**

El grado con el que los datos experimentales se ajustaron a una línea recta se estimó con el cálculo del coeficiente de correlación momento – producto,  $r$ . El valor de  $r$  viene dado por:

$$r = \frac{\sum\{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})\}}{\sqrt{[\sum(x_i - \bar{x})^2][\sum(y_i - \bar{y})^2]}} \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

El valor de  $r$  reporta la relación lineal que existe entre los valores de “ $x$ ” y “ $y$ ”, es decir, puede tomar valores en el intervalo  $-1 \leq r \leq +1$ . Si  $r=-1$ , la correlación lineal es negativa perfecta (pendiente negativa) y si  $r=1$ , la correlación lineal es positiva perfecta (pendiente positiva).

El cálculo de los coeficientes de correlación es relativamente sencillo; sin embargo, a veces son mal interpretados con facilidad. La ecuación anterior siempre generará un valor de  $r$ , aunque los datos no mostraran un carácter lineal.

Esto es, si  $r=0$  no significa que “ $y$ ” y “ $x$ ” no estén relacionadas; solo significa que no están linealmente relacionadas.

A continuación, en la Tabla 4.6 se presenta el coeficiente de correlación momento-producto para los modelos isotérmicos de Langmuir y Freundlich:

**Tabla 4.6** Coeficiente de correlación momento – producto de los modelos isotérmicos.

<b>Modelo Isotérmico de Langmuir</b>						
$x_i (1/C_f)$	$y_i (1/q)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$
0.0012	0.0438	-0.0085	-0.0122	7.303E-05	1.480E-04	1.040E-04
0.0015	0.0507	-0.0082	-0.0054	6.794E-05	2.867E-05	4.413E-05
0.0021	0.0539	-0.0077	-0.0021	5.869E-05	4.417E-06	1.610E-05
0.0041	0.0535	-0.0056	-0.0025	3.129E-05	6.182E-06	1.391E-05
0.0050	0.0620	-0.0047	0.0060	2.231E-05	3.593E-05	-2.831E-05
0.0445	0.0721	0.0348	0.0161	1.209E-03	2.596E-04	5.602E-04
<b>TOTAL</b>				<b>1.462E-03</b>	<b>4.828E-04</b>	<b>7.099E-04</b>
$\bar{x}$	0.097	$\bar{y}$	0.0560	<b>Correlación momento – producto (r)</b>		0.8451
<b>Modelo Isotérmico de Freundlich</b>						
$x_i (\log C_f)$	$y_i (\log q)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$
2.9237	1.3581	0.5128	0.1009	0.2629	0.0102	0.0518
2.8252	1.2954	0.4143	0.0382	0.1717	0.0015	0.0158
2.6826	1.2683	0.2717	0.0112	0.0738	1.258E-04	0.0030
2.3826	1.2714	-0.0283	0.0143	8.033E-04	2.053E-04	-4.061E-04
2.2998	1.2076	-0.1111	-0.0495	0.0124	0.0025	0.0055
1.3516	1.1419	-1.0593	-0.1152	1.1221	0.0133	0.1220
<b>TOTAL</b>				<b>1.6437</b>	<b>0.0277</b>	<b>0.1978</b>
$\bar{x}$	2.4109	$\bar{y}$	1.2571	<b>Correlación momento – producto (r)</b>		0.9268

Con respecto a los valores de  $r$  obtenidos anteriormente el modelo isotérmico de Freundlich tuvo una correlación lineal mayor que el modelo de Langmuir, es decir, “ $x$ ” y “ $y$ ” se relacionan de una forma lineal más definida.

En la Tabla 4.7 se presenta el coeficiente de correlación momento – producto para los modelos cinéticos de Pseudo – Primer Orden y Pseudo – Segundo Orden:

**Tabla 4.7** Coeficiente de correlación momento – producto de los modelos cinéticos.

<b>Modelo Cinético de Pseudo – Primer Orden</b>						
$x_i (t)$	$y_i (\ln (q_e - q_t))$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$
30	0.7060	-90	1.0075	8100	1.0151	-90.6765
60	0.5212	-60	0.8227	3600	0.6768	-49.3596
90	0.3069	-30	0.6084	900	0.3701	-18.2508
120	-0.1273	0	0.1742	0	0.0303	0.0000
150	-0.6677	30	-0.3662	900	0.1341	-10.9860
180	-1.2655	60	-0.9640	3600	0.9294	-57.8421
210	-1.5840	90	-1.2825	8100	1.6448	-115.4241
<b>TOTAL</b>				<b>25200</b>	<b>4.8005</b>	<b>-342.5391</b>
$\bar{x}$	120	$\bar{y}$	-0.3015	<b>Correlación momento – producto (r)</b>		-0.9848
<b>Modelo Cinético de Pseudo – Segundo Orden</b>						
$x_i (t)$	$y_i (t/q_t)$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$
30	2.5450	-105	-7.6276	11025	58.1803	800.8979
60	4.9465	-75	-5.2261	5625	27.3121	391.9576
90	7.2262	-45	-2.9464	2025	8.6811	132.5870
120	9.2783	-15	-0.8943	225	0.7997	13.4139
150	11.2774	15	1.1048	225	1.2206	16.5722
180	13.3020	45	3.1295	2025	9.7936	140.8262
210	15.4313	75	5.2587	5625	27.6544	394.4060
240	17.3739	105	7.2013	11025	51.8588	756.1369
<b>TOTAL</b>				<b>37800</b>	<b>185.5007</b>	<b>2646.7978</b>
$\bar{x}$	135	$\bar{y}$	10.1726	<b>Correlación momento – producto (r)</b>		0.9995

Según los resultados previamente obtenidos en la Tabla 4.7 los datos experimentales se ajustaron mejor al modelo de Pseudo – Segundo Orden ya que

muestran una correlación lineal positiva mayor que el modelo de Pseudo – Primer Orden, que presentó una correlación lineal negativa menor.

Para verificar si estos coeficientes de correlación  $r$  son realmente significativos se hizo un contraste estadístico adecuado calculando una distribución  $t$  de Student y teniendo en cuenta el número de puntos usados en el cálculo con la siguiente ecuación:

$$t = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \text{ (Ecuación 4.7)}$$

Al realizar el contraste de significación se debe comprobar la veracidad de una hipótesis nula ( $H_0$ ) tomando un nivel de significancia del 5%. Además, debe establecerse una hipótesis alternativa ( $H_1$ ) para este análisis estadístico. Las hipótesis a comprobar fueron las siguientes:

- i. Hipótesis nula ( $H_0$ ): no existe una correlación lineal entre “x” y “y”.
- ii. Hipótesis alternativa ( $H_1$ ): sí existe una correlación lineal entre “x” y “y”.

En la Tabla 4.8 se presentan los resultados de los valores  $t$  para los modelos isotérmicos y cinéticos, teniendo en cuenta un valor de  $t$  tabulado o  $t$  crítico ( $t_c$ ) con un nivel de significancia de 0.05 y los grados de libertad ( $n-2$ ) correspondientes:

**Tabla 4.8** Distribución  $t$  de Student de los modelos isotérmicos y cinéticos.

<b>Modelos Isotérmicos</b>			
<b>Langmuir</b>		<b>Freundlich</b>	
<b>n-2</b>	4	<b>n-2</b>	4
<b>r</b>	0.8451	<b>r</b>	0.9268
<b>t</b>	3.16	<b>t</b>	4.93
<b><math>t_{c(0.05)}</math></b>	2.78	<b><math>t_{c(0.05)}</math></b>	2.78
<b>Modelos Cinéticos</b>			
<b>Pseudo – Primer Orden</b>		<b>Pseudo – Segundo Orden</b>	
<b>n-2</b>	5	<b>n-2</b>	6
<b>r</b>	-0.9848	<b>r</b>	0.9995
<b>t</b>	12.69	<b>t</b>	81.13
<b><math>t_{c(0.05)}</math></b>	2.57	<b><math>t_{c(0.05)}</math></b>	2.45

De la tabla anterior, el valor de  $t$  calculado utilizando la ecuación 4.7 se comparó con el valor tabulado ( $t_c$ ) al nivel de significancia de 0.05 y ( $n-2$ ) grados de libertad. Por lo tanto, la hipótesis nula en este caso se rechazó para todos los modelos, ya que el  $t$  calculado es mayor que el  $t$  tabulado ( $t > t_c$ ), es decir, que existe una



correlación lineal significativa entre “x” y “y” como indica la hipótesis alternativa y en consecuencia es la que se acepta.

#### **4.2.2. Rectas de regresión no ponderadas de los modelos isotérmicos y cinéticos.**

Al realizar estudios en los que se analiza un componente mediante determinado procedimiento analítico se obtienen datos experimentales sujetos a error, en los que, si se considera que los errores de los valores de “y” son constantes, se dice que son datos homocedásticos y pueden procesarse de dos formas como se muestra a continuación:

##### **1. La recta de regresión de “y” sobre “x”.**

La recta de regresión de “y” sobre “x” es aquella que exhibe una relación lineal entre la variable dependiente y la independiente; siempre se debe usar en los experimentos de calibración. Es la mejor línea recta a través de los puntos de la gráfica, los cuales están sujetos a un error experimental.

Por lo general, todos los errores se atribuyen al eje y; consecuentemente se trata de buscar la recta que minimice las desviaciones entre los puntos experimentales y los calculados por esa línea en la dirección de la variable dependiente. También que la línea debe pasar por el centro de gravedad de los puntos ( $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ), debido a que la desviación que exista entre el valor obtenido y calculado puede ser positiva o negativa.

Por esta razón, para minimizar la suma de los cuadrados de los residuos, que siempre será positiva se aplica el método de los mínimos cuadrados. La recta de mínimos cuadrados viene dada por:

- a) Pendiente de la recta de mínimos cuadrados.

$$b = \frac{\sum[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Ecuación 4.8})$$

- b) Ordenada en el origen de la recta de los mínimos cuadrados.

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (\text{Ecuación 4.9})$$

A partir de las ecuaciones anteriores y de los datos reportados en las Tablas 4.6 y 4.7 se obtuvieron las rectas de regresión de “y” sobre “x” de los modelos isotérmicos y cinéticos como se presenta en seguida:

**Tabla 4.9** Recta de regresión de “y” sobre “x” de los modelos isotérmicos y cinéticos.

<b>Modelos Isotérmicos</b>			
<b>Langmuir</b>		<b>Freundlich</b>	
<b>b</b>	0.4856	<b>b</b>	0.1203
<b>a</b>	0.0513	<b>a</b>	0.9670
y=0.4856x+0.0513		y=0.1203x+0.9670	
<b>Modelos Cinéticos</b>			
<b>Pseudo – Primer Orden</b>		<b>Pseudo – Segundo Orden</b>	
<b>b</b>	-0.0136	<b>b</b>	0.0700
<b>a</b>	1.3296	<b>a</b>	0.7197
y=-0.0136x+1.3296		y=0.0700x+0.7197	

Cabe resaltar que las cuatro rectas de regresión de “y” sobre “x” son exactamente iguales a las ecuaciones de línea recta correspondientes a las Figuras 4.1 y 4.2 para los modelos isotérmicos, y las Figuras 4.3 y 4.4 para los modelos cinéticos. Esto se debe a que los datos calculados provienen del mismo set de datos experimentales, aplicándose dos métodos de ajuste diferentes, pero obteniendo resultados iguales.

Las rectas de regresión calculadas indican cómo varió “y” cuando “x” se ajustó a los valores escogidos y su finalidad fue corroborar la linealidad coherente del experimento a partir del cálculo previo de r y de la inspección visual de los puntos experimentales.

## **2. Errores en la pendiente y ordenada en el origen de la recta de regresión.**

Una vez calculadas las ecuaciones de regresión de “y” sobre “x” se estimaron los errores aleatorios en los valores de la pendiente y ordenada en el origen. Debe considerarse el cálculo del estadístico  $s_{y/x}$ , el cual estima los errores aleatorios en la dirección “y” como se expresa a continuación:

$$s_{y/x} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}} \quad (\text{Ecuación 4.10})$$

La ecuación previamente establecida utiliza los residuos de y ( $y_i - \hat{y}_i$ ), donde los valores  $\hat{y}_i$  corresponden a los puntos sobre la recta de regresión calculada según los valores individuales de “x”, o sea, los valores de y ajustados.

También es importante el cálculo de  $s_b$  y  $s_a$ , los cuales corresponden a las desviaciones estándar de la pendiente y ordenada en el origen respectivamente, y vienen dadas por:

a) Desviación estándar de la pendiente.

$$S_b = \frac{S_{y/x}}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}} \quad (\text{Ecuación 4.11})$$

b) Desviación estándar de la ordenada.

$$S_a = S_{y/x} \sqrt{\frac{\sum_i x_i^2}{n \sum_i (x_i - \bar{x})^2}} \quad (\text{Ecuación 4.12})$$

Así mismo, los valores de  $s_b$  y  $s_a$  pueden utilizarse para estimar los límites de confianza de la pendiente y ordenada en el origen expresados por:  $b \pm t_{(n-2)} s_b$  y  $a \pm t_{(n-2)} s_a$ , donde por lo general el valor de  $t$  a  $(n-2)$  grados de libertad se obtiene para un nivel de confianza del 95%.

En las Tablas 4.10 y 4.11 se muestran los errores en la pendiente y ordenada en el origen de la recta de regresión de los modelos isotérmicos y cinéticos respectivamente.

**Tabla 4.10** Errores en la pendiente y ordenada en el origen de los modelos isotérmicos.

<b>Modelo Isotérmico de Langmuir</b>						
$x_i$ (1/C <sub>f</sub> )	$y_i$ (1/q)	$\hat{y}_i$	$y_i - \hat{y}_i$	$x_i^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
0.0012	0.0438	0.0519	-0.0080	1.421E-06	7.303E-05	6.423E-05
0.0015	0.0507	0.0520	-0.0014	2.236E-06	6.794E-05	1.827E-06
0.0021	0.0539	0.0523	0.0016	4.313E-06	5.869E-05	2.620E-06
0.0041	0.0535	0.0533	0.0002	1.717E-05	3.129E-05	5.289E-08
0.0050	0.0620	0.0537	0.0083	2.515E-05	2.231E-05	6.869E-05
0.0445	0.0721	0.0729	-0.0008	1.981E-03	1.209E-03	5.940E-07
<b>TOTAL</b>				<b>2.031E-03</b>	<b>1.462E-03</b>	<b>1.380E-04</b>
$S_{y/x}$	0.0059	<b><math>t_{(n-2)}</math> nivel de confianza 95%</b>		2.78	<b>Límites de confianza</b>	
$S_b$	0.1536				<b><math>b \pm t_{(n-2)} s_b</math></b>	0.4856±0.4270
$S_a$	0.0028				<b><math>a \pm t_{(n-2)} s_a</math></b>	0.0513±0.0078

continúa

**Tabla 4.10** Errores en la pendiente y ordenada en el origen de los modelos isotérmicos (continuación).

<b>Modelo Isotérmico de Freundlich</b>						
$x_i$ (log $C_f$ )	$y_i$ (log $q$ )	$\hat{y}_i$	$y_i - \hat{y}_i$	$x_i^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
2.9237	1.3581	1.3188	0.0392	8.5478	0.2629	0.0015
2.8252	1.2954	1.3070	-0.0116	7.9820	0.1717	1.348E-04
2.6826	1.2683	1.2898	-0.0215	7.1964	0.0738	4.611E-04
2.3826	1.2714	1.2537	0.0177	5.6766	8.033E-04	3.147E-04
2.2998	1.2076	1.2437	-0.0362	5.2889	0.0124	0.0013
1.3516	1.1419	1.1297	0.0123	1.8268	1.1221	1.505E-04
<b>TOTAL</b>				<b>36.5185</b>	<b>1.6437</b>	<b>0.0039</b>
$S_{y/x}$	0.0313	<b><math>t_{(n-2)}</math> nivel de confianza 95%</b>		2.78	<b>Límites de confianza</b>	
$S_b$	0.0244				<b><math>b \pm t_{(n-2)} S_b</math></b>	0.1203 $\pm$ 0.0678
$S_a$	0.0602				<b><math>a \pm t_{(n-2)} S_a</math></b>	0.9670 $\pm$ 0.1674

**Tabla 4.11** Errores en la pendiente y ordenada en el origen de los modelos cinéticos.

<b>Modelo Cinético de Pseudo – Primer Orden</b>						
$x_i$ (t)	$y_i$ (ln $(q_e - q_t)$ )	$\hat{y}_i$	$y_i - \hat{y}_i$	$x_i^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
30	0.7060	0.9219	-0.2158	900	8100	0.0466
60	0.5212	0.5141	0.0071	3600	3600	5.028E-05
90	0.3069	0.1063	0.2006	8100	900	0.0402
120	-0.1273	-0.3015	0.1742	14400	0	0.0303
150	-0.6677	-0.7093	0.0416	22500	900	0.0017
180	-1.2655	-1.1171	-0.1485	32400	3600	0.0220
210	-1.5840	-1.5248	-0.0591	44100	8100	0.0035
<b>TOTAL</b>				<b>126000</b>	<b>25200</b>	<b>0.1445</b>
$S_{y/x}$	0.1700	<b><math>t_{(n-2)}</math> nivel de confianza 95%</b>		2.57	<b>Límites de confianza</b>	
$S_b$	0.0011				<b><math>b \pm t_{(n-2)} S_b</math></b>	-0.0136 $\pm$ 0.0028
$S_a$	0.1437				<b><math>a \pm t_{(n-2)} S_a</math></b>	1.3296 $\pm$ 0.3693
<b>Modelo Cinético de Pseudo – Segundo Orden</b>						
$x_i$ (t)	$y_i$ (t/ $q_t$ )	$\hat{y}_i$	$y_i - \hat{y}_i$	$x_i^2$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
30	2.5450	2.8204	-0.2754	900	11025	0.0758
60	4.9465	4.9210	0.0255	3600	5625	6.493E-04

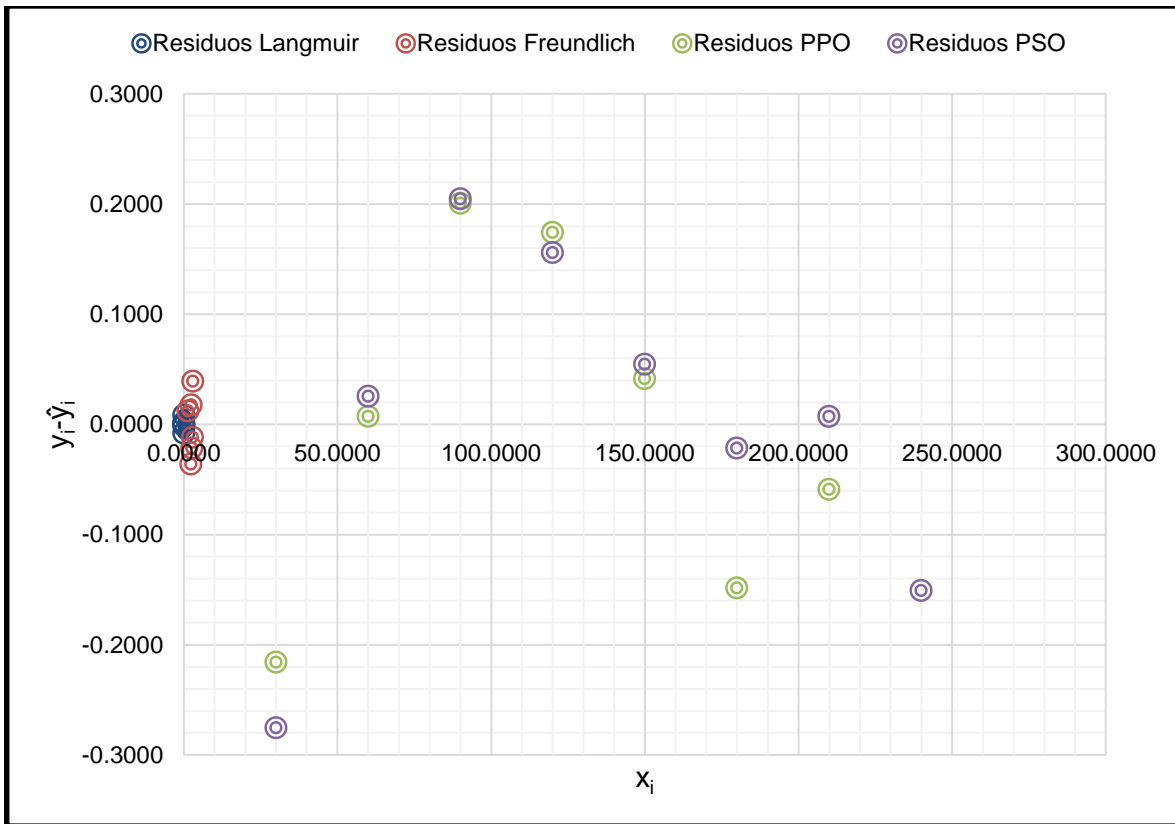
continúa

**Tabla 4.11** Errores en la pendiente y ordenada en el origen de los modelos cinéticos (continuación).

$x_i$ (t)	$y_i$ (t/ $q_t$ )	$\hat{y}_i$	$y_i - \hat{y}_i$	$x_i^2$	$(x_i - \bar{X})^2$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
90	7.2262	7.0216	0.2046	8100	2025	0.0418
120	9.2783	9.1223	0.1561	14400	225	0.0244
150	11.2774	11.2229	0.0545	22500	225	0.0030
180	13.3020	13.3235	-0.0215	32400	2025	4.613E-04
210	15.4313	15.4242	0.0072	44100	5625	5.132E-05
240	17.3739	17.5248	-0.1509	57600	11025	0.0228
<b>TOTAL</b>				<b>183600</b>	<b>37800</b>	<b>0.1689</b>
$S_{y/x}$	0.1678	<b><math>t_{(n-2)}</math> nivel de confianza 95%</b>		2.45	<b>Límites de confianza</b>	
$S_b$	8.631E-04				<b><math>b \pm t_{(n-2)} S_b</math></b>	0.0700 $\pm$ 0.0021
$S_a$	0.1308				<b><math>a \pm t_{(n-2)} S_a</math></b>	0.7197 $\pm$ 0.3205

De los resultados en las tablas anteriores se observa que los valores de desviación estándar de  $y/x$ , pendiente y ordenada en el origen fueron aceptables debido a que la diferencia es relativamente pequeña considerando los límites de confianza obtenidos.

Una forma de visualizar la diferencia entre los valores obtenidos experimentalmente y los calculados con las ecuaciones de ajuste fue realizar el cálculo de los residuos ( $y_i - \hat{y}_i$ ) versus  $x_i$ , según el modelo isotérmico y cinético del que se trate. Seguidamente, en la Figura 4.5 se muestran los residuos o residuales de “y” para los dos modelos isotérmicos y cinéticos:



**Figura 4.5** Gráfico de residuales de “y” para los cuatro modelos estudiados.

De acuerdo a la Figura anterior los residuales de la isoterma de Langmuir presentaron una distribución satisfactoria ya que la mayoría de puntos se acercó al valor esperado de  $y_i$ . En cambio, la isoterma de Freundlich presentó una distribución satisfactoria a excepción de dos puntos. Sin embargo, los residuales de los modelos cinéticos de Pseudo – Primer Orden (PPO) y Pseudo – Segundo Orden (PSO) tendieron a crecer a medida que crece  $y_i$ ; sugiriendo por tanto que sería adecuado un gráfico de regresión ponderado, como se establecerá en el siguiente apartado.

#### 4.2.3. Rectas de regresión ponderadas de los modelos cinéticos.

Los puntos reflejados en la Figura 4.5 con respecto a los modelos cinéticos tienen una desviación estándar de los valores de “y” a medida que aumenta el valor de la diferencia en la variable dependiente, en lugar que los errores presenten un valor constante. Esto hace que los datos sean considerados heterocedásticos y tenga lugar la aplicación de las rectas de regresión ponderadas para el analito estudiado en el procedimiento analítico.

El cálculo de la recta de regresión ponderada se realizó por la sospecha de heterocedasticidad de los datos de los modelos cinéticos. Este resultado se logró dando a cada punto una ponderación inversamente proporcional a la varianza correspondiente ( $s_i^2$ ) como se establece en la siguiente ecuación:

$$w_i = \frac{s_i^{-2}}{\frac{\sum_i s_i^{-2}}{n}} \quad (\text{Ecuación 4.13})$$

De igual manera, se calcula la pendiente y ordenada en el origen en la recta de regresión ponderada, que vienen dadas por:

a) Pendiente ponderada.

$$b_w = \frac{(\sum_i w_i x_i y_i) - n \bar{x}_w \bar{y}_w}{(\sum_i w_i x_i^2) - n \bar{x}_w^2} \quad (\text{Ecuación 4.14})$$

b) Ordenada en el origen ponderada.

$$a_w = \bar{y}_w - b_w \bar{x}_w \quad (\text{Ecuación 4.15})$$

Así mismo, la desviación estándar ponderada se expresa como:

$$s\left(\frac{y}{x}\right)_w = \sqrt{\frac{\sum_i w_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}} \quad (\text{Ecuación 4.16})$$

En la Tabla 4.12 se presentan los resultados de la aplicación de las rectas de regresión ponderadas para los modelos cinéticos de Pseudo – Primer Orden y Pseudo – Segundo Orden. También se reflejan los valores de desviación estándar ponderados como sigue:

**Tabla 4.12** Valores de la pendiente y ordenada en el origen ponderados de los modelos cinéticos.

<b>Modelo cinético de Pseudo – Primer Orden</b>										
$x_i$ (t)	$y_i$ ( $\ln(q_e - q_t)$ )	$s_i$	$1/s_i^2$	$w_i$	$w_i x_i$	$w_i y_i$	$w_i x_i y_i$	$w_i x_i^2$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$	$w_i (y_i - \hat{y}_i)^2$
30	0.7060	10.6767	0.0088	0.1064	3.1924	0.0751	2.2539	95.7711	0.0466	0.0050
60	0.5212	11.1782	0.0080	0.0971	5.8247	0.0506	3.0356	349.4819	5.028E-05	4.8814E-06
90	0.3069	12.9075	0.0060	0.0728	6.5528	0.0223	2.0108	589.7483	0.0402	0.0029
120	-0.1273	8.2436	0.0147	0.1785	21.4197	-0.0227	-2.7269	2570.3640	0.0303	0.0054
150	-0.6677	7.4029	0.0182	0.2213	33.2012	-0.1478	-22.1682	4980.1763	0.0017	3.8279E-04
180	-1.2655	3.9173	0.0652	0.7905	142.2869	-1.0004	-180.0684	25611.6352	0.0220	0.0174
210	-1.5840	1.4806	0.4562	5.5334	1162.0097	-8.7648	-1840.6053	244022.0449	0.0035	0.0194
<b>TOTAL</b>			<b>0.5771</b>	<b>7.0000</b>	<b>1374.4873</b>	<b>-9.7876</b>	<b>-2038.2685</b>	<b>278219.2218</b>	<b>0.1445</b>	<b>0.0505</b>
$\bar{x}_w = \frac{\sum_i w_i x_i}{n}$		196.3553	$\bar{y}_w = \frac{\sum_i w_i y_i}{n}$		-1.3982	<b><math>b_w</math></b>	-0.0140	<b><math>a_w</math></b>	1.3456	<b><math>S(y/x)_w</math></b>
										0.1005

continúa



**Tabla 4.12** Valores de la pendiente y ordenada en el origen ponderados de los modelos cinéticos (continuación).

<b>Modelo cinético de Pseudo – Segundo Orden</b>										
<b>x<sub>i</sub> (t)</b>	<b>y<sub>i</sub> (t/q<sub>i</sub>)</b>	<b>s<sub>i</sub></b>	<b>1/s<sub>i</sub><sup>2</sup></b>	<b>w<sub>i</sub></b>	<b>w<sub>i</sub>x<sub>i</sub></b>	<b>w<sub>i</sub>y<sub>i</sub></b>	<b>w<sub>i</sub>x<sub>i</sub>y<sub>i</sub></b>	<b>w<sub>i</sub>x<sub>i</sub><sup>2</sup></b>	<b>(y<sub>i</sub> - ŷ<sub>i</sub>)<sup>2</sup></b>	<b>w<sub>i</sub>(y<sub>i</sub> - ŷ<sub>i</sub>)<sup>2</sup></b>
30	2.5450	10.6767	0.0088	0.0679	2.0377	0.1729	5.18583691	61.1303	0.0758	0.0052
60	4.9465	11.1782	0.0080	0.0620	3.7179	0.3065	18.3903945	223.0727	6.493E-04	4.023E-05
90	7.2262	12.9075	0.0060	0.0465	4.1826	0.3358	30.2242749	376.4337	0.0418	0.0019
120	9.2783	8.2436	0.0147	0.1139	13.6721	1.0571	126.854078	1640.6518	0.0244	0.0028
150	11.2774	7.4029	0.0182	0.1413	21.1922	1.5933	238.992268	3178.8242	0.0030	4.196E-04
180	13.3020	3.9173	0.0652	0.5046	90.8211	6.7117	1208.10622	16347.7918	4.613E-04	2.327E-04
210	15.4313	1.4806	0.4562	3.5319	741.7056	54.5024	11445.4989	155758.1758	5.132E-05	1.813E-04
240	17.3739	1.4806	0.4562	3.5319	847.6635	61.3634	14727.2049	203439.2500	0.0228	0.0804
<b>TOTAL</b>			<b>1.0332</b>	<b>8.0000</b>	<b>1724.9926</b>	<b>126.0430</b>	<b>27800.4568</b>	<b>381025.3303</b>	<b>0.1689</b>	<b>0.0912</b>
$\bar{x}_w = \frac{\sum_i w_i x_i}{n}$		215.6241	$\bar{y}_w = \frac{\sum_i w_i y_i}{n}$		15.7554	<b>b<sub>w</sub></b>	0.0686	<b>a<sub>w</sub></b>	0.9642	<b>S<sub>(y/x)w</sub></b>
										0.1233

La aplicación de la recta de regresión ponderada tanto para el modelo de Pseudo – Primer Orden como Pseudo – Segundo Orden se realizó con la finalidad de ajustar las rectas de regresión lineal no ponderada. Según la Tabla 4.13 las rectas de regresión ponderada y no ponderada para ambos modelos cinéticos no variaron significativamente, incluso si la dispersión de los puntos respecto de la recta resultara esencial, como se muestra a continuación:

**Tabla 4.13** Rectas de regresión ponderadas y no ponderadas de los modelos cinéticos.

<b>Modelo cinético de Pseudo – Primer Orden</b>	
<b>Ponderada</b>	<b>No Ponderada</b>
$y=-0.0140x+1.3456$	$y=-0.0136x+1.3296$
<b>Modelo cinético de Pseudo – Segundo Orden</b>	
<b>Ponderada</b>	<b>No Ponderada</b>
$y=0.0686x+0.9642$	$y=0.0700x+0.7197$

## **CAPÍTULO 5. DISPOSICIÓN FINAL DEL RESIDUO OBTENIDO DEL PROCESO DE BIOSORCIÓN.**

Los residuos obtenidos de este proceso de biosorción discontinuo son de naturaleza líquida y sólida, los cuales tienen que ser manejados, descargados y dispuestos adecuadamente.

A los residuos líquidos obtenidos que contienen el mínimo porcentaje de Cromo VI remanente en solución puede agregárseles una cantidad suficiente de material biosorbente, con la finalidad de sobresaturar la solución y retirar el metal; de esta manera se podrá realizar una descarga segura después de llevar a cabo el proceso.

Así mismo, se sabe que del proceso de filtración se obtiene un residuo sólido, que en este caso es el material biosorbente contaminado con Cromo VI, que queda retenido en el proceso. Existen diferentes alternativas de gestión de materiales utilizados y a partir de esto se establecen sugerencias de disposición del material sólido.

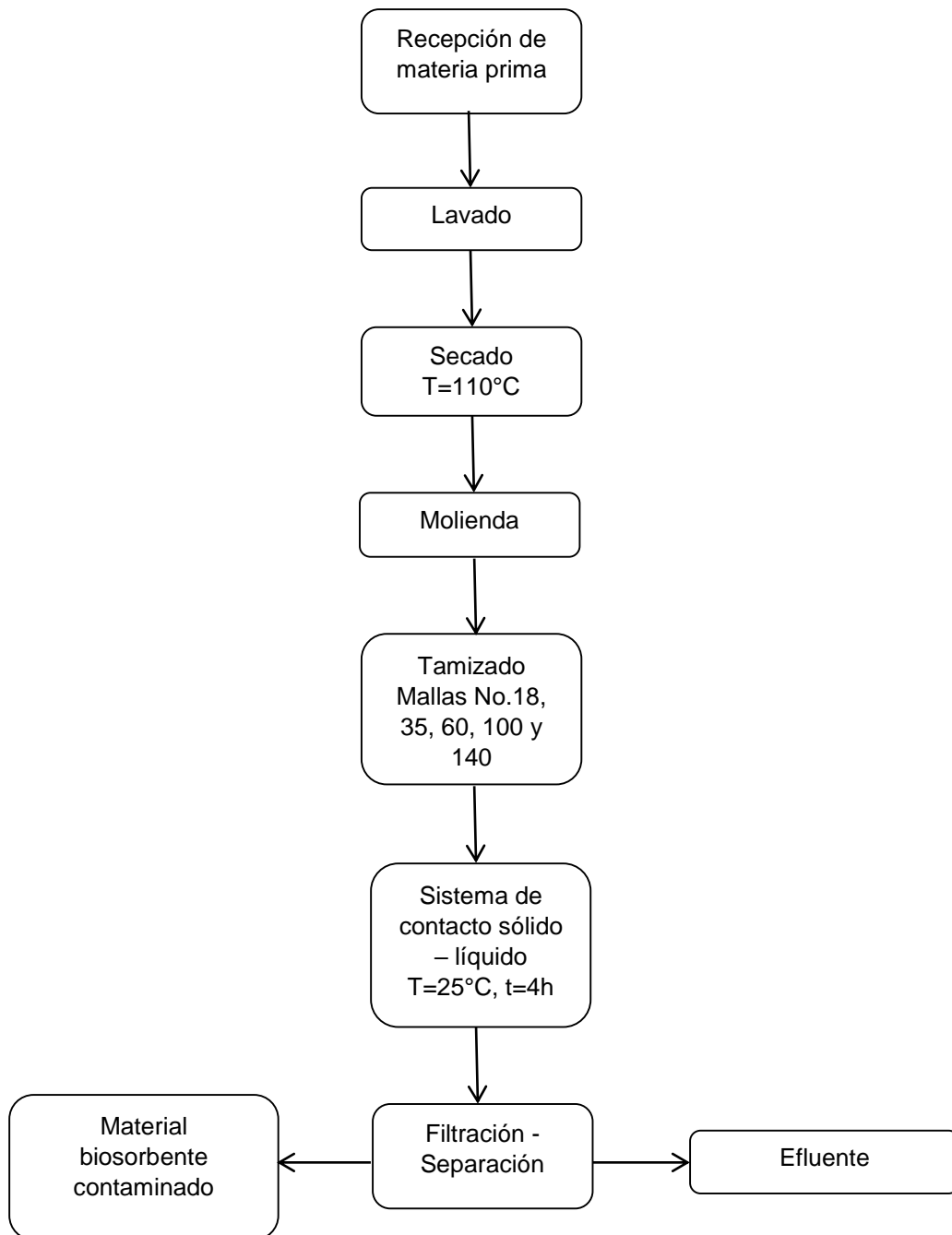
### **5.1. Evaluación del proceso discontinuo de biosorción para la aplicación del material biosorbente.**

El plátano (*Musa sp.*) es la materia prima del proceso de producción de las empresas dedicadas a la comercialización de Snacks, en las cuales se utiliza la pulpa para la elaboración de sus productos y se desecha la cáscara. Por lo tanto, las cáscaras de plátano pueden ser utilizadas como materia base para el tratamiento de aguas residuales en un proceso discontinuo o batch a nivel industrial; por lo que, deben ser transportadas lo más pronto posible debido a la degradación oxidativa y la proliferación de roedores.

Luego, las cáscaras de plátano deben lavarse con agua potable en una lavadora industrial de frutas y hortalizas. Posteriormente, las cáscaras serán colocadas en un horno industrial a la temperatura óptima de 110 °C con un tiempo de secado de 12 horas.

Seguidamente, se realizará una reducción de tamaño de las cáscaras de plátano con un molino para trituración en seco y se utilizará una torre de tamices con el fin de obtener partículas menores a 1 mm. De esta forma se culmina la elaboración del material biosorbente útil en el tratamiento de las aguas residuales; que consistirá en agregar el material biosorbente a un tanque batch para retirar el Cromo VI del efluente industrial.

A continuación, en la Figura 5.1 se muestra el proceso de producción del material biosorbente a partir de la cáscara de plátano (*Musa sp.*) y la aplicación del mismo para el tratamiento del efluente industrial.

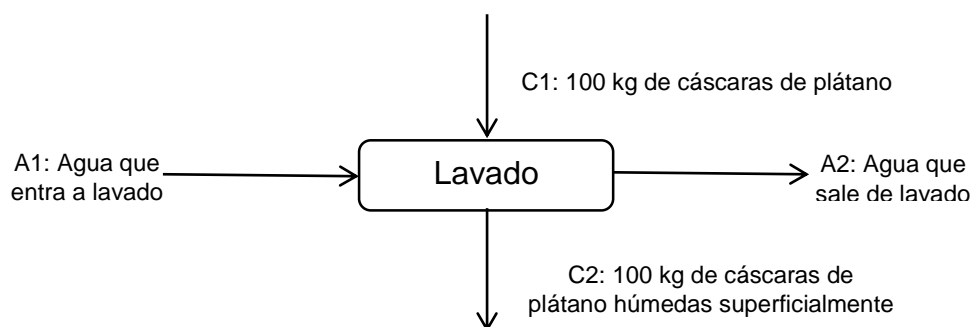


**Figura 5.1** Diagrama de bloques del proceso de producción de material biosorbente a partir de la cáscara de plátano (*Musa sp.*) y la aplicación del mismo para el tratamiento del efluente industrial.

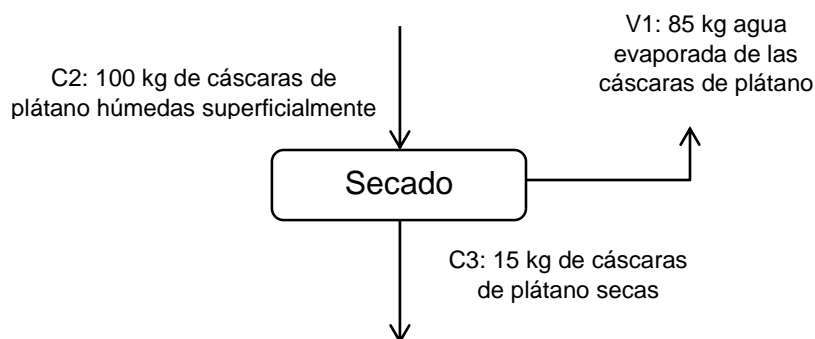
### 5.1.1. Balance de masa de la elaboración del material biosorbente a partir de la cáscara de plátano (*Musa sp.*).

La producción del material biosorbente descrita en la Figura 5.1 se desglosa de la siguiente manera: las cáscaras de plátano son adquiridas, transportadas y ubicadas en el sitio de recepción de materia prima. Luego, son llevadas a lavado con agua de la red para una limpieza superficial. Considerando una base de 100 kg de cáscaras de plátano se utilizará un volumen de 75 L para realizar el lavado inicial.

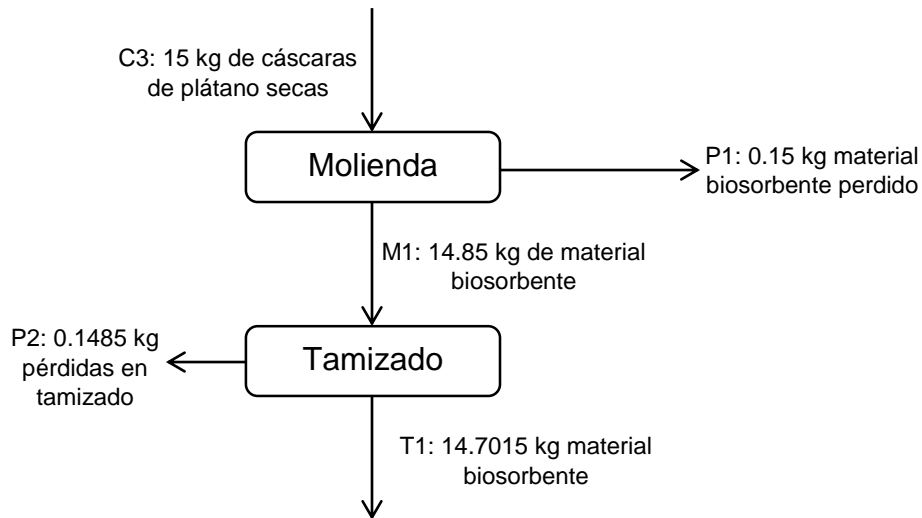
Base: 100 kg de cáscaras de plátano.



Debido a que el gasto de agua no es muy grande y se hace el escurrido de las cáscaras, la hidratación en estas será superficial y despreciable en cuanto al aumento significativo en peso unitario por cáscara. Además, se asumirá que la corriente A1 es igual a la corriente A2; por lo que el agua de lavado de salida podrá descargarse directamente al alcantarillado por no contener contaminantes tóxicos.



El contenido de humedad de las cáscaras de plátano se estima en un valor de 15% en C3, por ello de los 100 kg que procedían de C2, se evaporan 85 kg de agua en forma de vapor en la corriente V1 y 15 kg de cáscaras de plátano pasan a la siguiente etapa.



La trituración de las cáscaras de plátano secas (C3) se realizará en un molino considerando un 1% de pérdidas de material en el equipo (P1). La corriente M1 contendrá el polvo que será tamizado; en este proceso existirá un 1% de pérdidas aproximadamente (P2) y la diferencia de material pasará a T1.

El rendimiento se calcula dividiendo la cantidad de material biosorbente obtenido (T1) entre la cantidad de cáscara de plátano que ingresa como materia prima (C1).

$$\text{Rendimiento} = \frac{14.7015 \text{ kg de material biosorbente}}{100 \text{ kg de cáscara de plátano}}$$

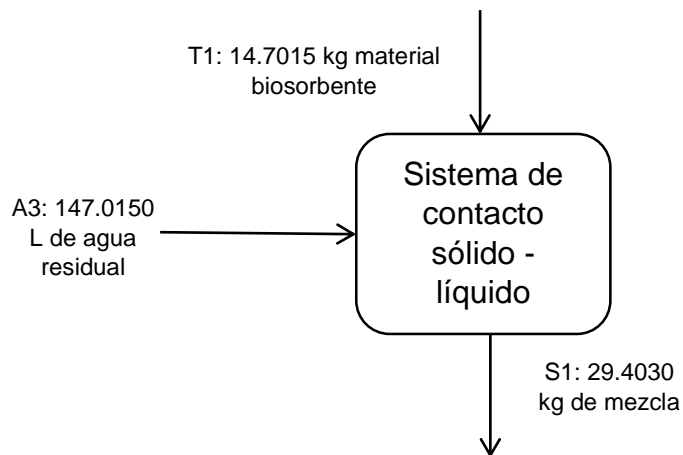
$$\text{Rendimiento} = \frac{0.147015 \text{ kg de material biosorbente}}{\text{kg de cáscara de plátano}}$$

### 5.1.2. Proceso discontinuo del material biosorbente y el efluente industrial.

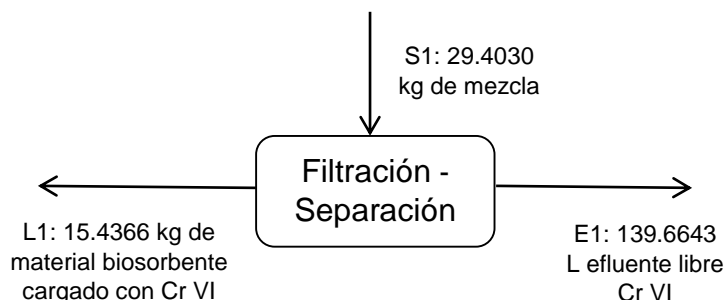
El uso del material biosorbente a partir de la cáscara de plátano (*Musa sp.*) tiene grandes beneficios a nivel ambiental, ya que se eliminan cantidades considerables de Cromo VI del efluente industrial de una curtiembre. Este metal puede provocar repercusiones serias a la salud humana, animal y vegetal como se mencionó en la sección 1.4.

Actualmente en El Salvador la cáscara de plátano no tiene un valor comercial; por lo que, se considera como un desecho común. Sin embargo, este residuo agrícola puede utilizarse como materia prima mediante una transformación necesaria a un producto final, que puede incorporarse en el tratamiento de las aguas residuales y que sería amigable con el medio ambiente al aprovechar un recurso natural.

Una vez elaborado el material biosorbente (T1) puede colocarse en contacto dentro de un sistema sólido líquido con el agua residual.



Según el rendimiento obtenido anteriormente, la cantidad de 14.7015 kg de material biosorbente puede tratarse con un volumen de agua residual de 147.015 L (A3) considerando la relación óptima de la variación de cantidades de material biosorbente en el volumen de agua residual como se mostró en la Tabla 3.8 al presentar el mayor porcentaje de remoción de Cromo VI.



Luego de un tiempo de agitación de 4 horas del sistema sólido líquido debe realizarse la separación de las fases involucradas, de lo cual se obtendrán dos corrientes que serán el material biosorbente cargado con Cromo VI (L1), el cual ha aumentado 5% su masa por la absorción de agua residual y el efluente descontaminado (E1).

El efluente tratado ya no presentará un riesgo ambiental debido a que se disminuye casi por completo la concentración del metal. No obstante, el material biosorbente será considerado como un lodo, el cual tiene que disponerse adecuadamente mediante diferentes alternativas de gestión ambiental como se presentará más adelante.

## 5.2. Propuesta de gestión ambiental del material biosorbente utilizado.

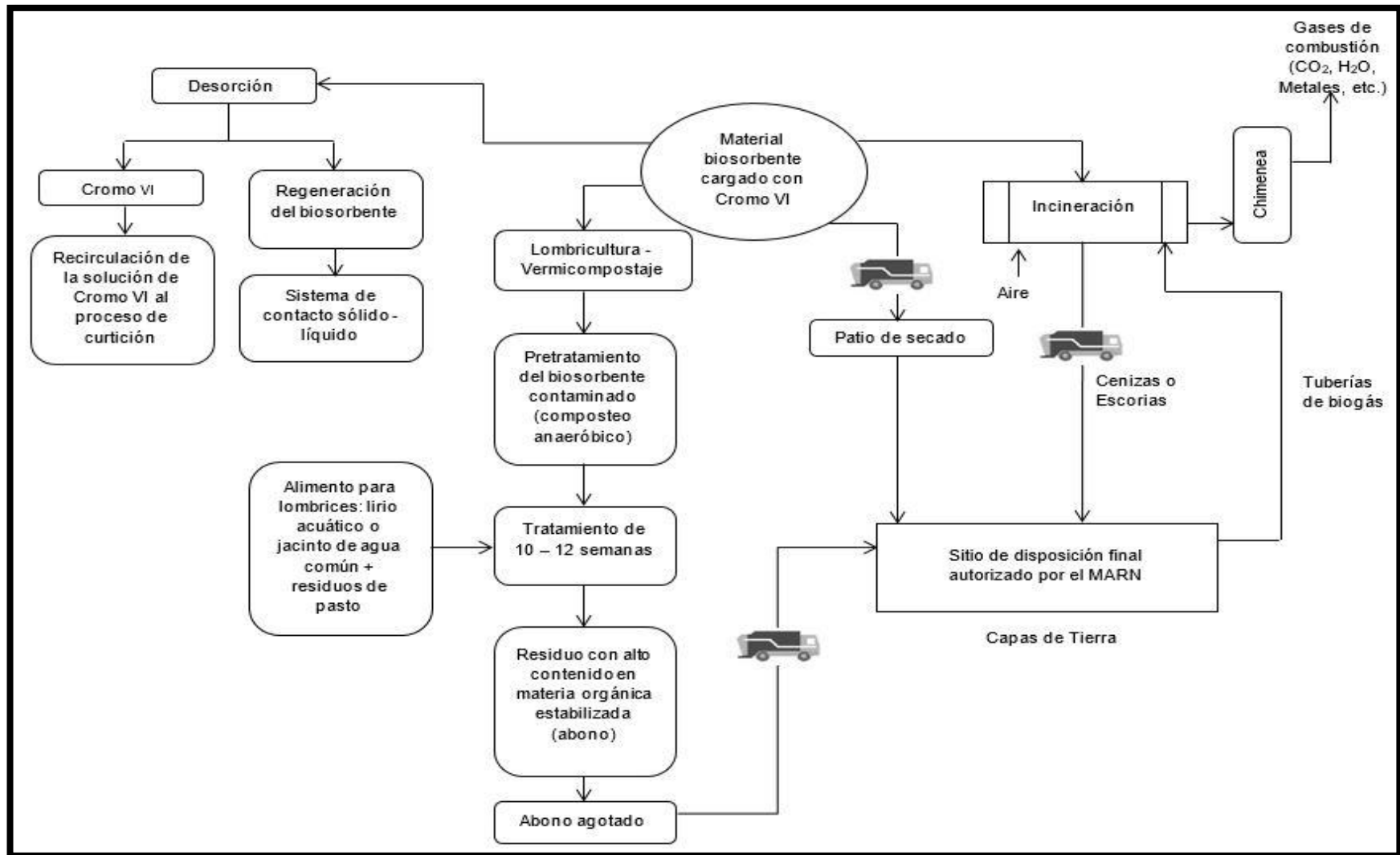
En el país se encuentra en trámite de revisión el reglamento especial de aguas residuales y lodos que pretende desarrollar las disposiciones de la Ley del Medio Ambiente, relacionadas a la gestión de las aguas residuales y lodos, y que mediante

el adecuado manejo, tratamiento, uso, reuso y disposición final espera contribuir a la recuperación, protección y aprovechamiento sostenible del recurso hídrico y del suelo.

Debido a la ausencia de normas, reglamentos o leyes en el país que regulen estos mecanismos de gestión de lodos existe una problemática, en las industrias en general, que poseen plantas de tratamiento de aguas residuales, ya que los lodos obtenidos en muchas ocasiones son almacenados en lugares y recipientes inadecuados, o bien sus características particulares no son aprovechadas y son enviadas al relleno sanitario para su disposición final (Campos Aguilar, Cardona Anaya y Centeno Pérez, 2016).

De acuerdo a la sección 1.6 existen diferentes alternativas de gestión ambiental de materiales utilizados; por tanto, a partir de esto se propondrán algunas soluciones para el tratamiento del material sólido de interés como se muestra a continuación en la Figura 5.2:





**Figura 5.2** Esquema de gestión final del material biosorbente utilizado en el tratamiento de aguas residuales de la industria de curtiembre.

Seguidamente, se puntualizan las principales soluciones de la propuesta:

- i. La desorción es una opción para disponer el material biosorbente, en la que se podrá regenerar este material conteniendo mínimo porcentaje de Cromo VI usando una solución ácida o básica para separar el metal del sólido. En este proceso de separación se obtendría el material sólido para incorporarse a un nuevo ciclo de adsorción, considerando la robustez del mismo y las características apropiadas para una adsorción efectiva; en consecuencia, se reduciría la cantidad de cáscaras de plátano procesada para la elaboración del adsorbente. El Cromo VI remanente en la solución desorbente debe analizarse en el laboratorio para determinar la concentración real y de esta manera valorar la recirculación del metal al proceso de curtición.
- ii. La lombricultura es una alternativa con bajo impacto ambiental, debido a que las lombrices tienen la capacidad de digerir metales y convertirlos en nutrientes. En este caso, el material orgánico combinado con el metal sería el alimento de las lombrices para generar en sus productos la carne y humus de lombriz, los cuales tienen un valor nutritivo rico en proteínas y de gran utilidad para la vegetación y animales.
- iii. Antes de considerar el sólido biosorbente obtenido del tratamiento del agua residual como combustible auxiliar en una instalación adecuada como es el caso de una cementera, debe evaluarse el aprovechamiento energético de este residuo para minimizar el impacto ambiental del proceso de valorización. El material debe reunir ciertas características importantes que sean congruentes con el proceso productivo y pueda ser considerado como materia prima alternativa del proceso. Una de ellas es determinar el poder calorífico del material para comprobar la efectividad del biosorbente como combustible. Sin embargo, debe existir un control riguroso en cuanto a la calidad del clínker y las emisiones de gases a la atmósfera. En el caso de que el sólido se utilice como combustible alternativo en una industria cementera, sería conveniente mezclar estos residuos con otros para que el contenido de metales se encuentre en un nivel aceptable y no afecte la calidad del producto final.
- iv. Una opción para el tratamiento de los residuos, que conlleva a la reducción del volumen y la peligrosidad de estos es la incineración. En esta alternativa se capturan, concentran o destruyen las sustancias potencialmente nocivas; y a pesar del inconveniente por los gases contaminantes y generación de otros residuos como las escorias, ofrece un medio que permite la recuperación del contenido energético, mineral o químico de los residuos para otros procesos.
- v. Los sitios de disposición final autorizados por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) son la última solución para desechar el material biosorbente, ya que si se aplica el proceso de desorción y el material no es apto para un nuevo ciclo de biosorción debe transportarse hasta el depósito en

vertedero, así como ocurriría con los residuos provenientes de la lombricultura - vermicompostaje y las cenizas o escorias del proceso de incineración. También si se diera el caso de que la masa residual del contacto sólido – líquido no pudiera tratarse con ninguna de las alternativas anteriores, se vuelve necesario colocarla en un patio de secado y transportar posteriormente este desecho al sitio autorizado. Es de vital importancia preparar adecuadamente la zona en la que se ubicará este depósito evaluando la calidad del recurso suelo, además de colocar tuberías de las que se pueden recuperar energéticamente los gases y alimentarse a un horno de combustión. Según la NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL DEL RECURSO SUELO Y CRITERIOS DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS de la República de Ecuador, una medida de restauración del recurso que ha sido destinado para disponer y acondicionar el desecho es la remediación de este impacto ambiental para garantizar la recuperación y el mantenimiento permanente de la calidad del suelo, teniendo en cuenta el valor máximo permisible de 1.4 mg de Cr VI/ kg de peso seco de suelo en el sector industrial. Además, si aplicando esta técnica no se logra alcanzar el nivel de calidad inicial del suelo, se podrán aplicar medidas de contención o confinamiento del área de suelo afectada.

Por lo tanto, las alternativas anteriores para la disposición final del material biosorbente son viables y puede tomarse la mejor opción según la conveniencia del caso. Así como los recursos disponibles de material, equipo, personal especializado y los convenios que se establezcan con las empresas e industrias prestadoras de los servicios.

## CONCLUSIONES

- I. El Salvador es un país con condiciones geográficas y climáticas favorables para el cultivo del plátano, y con esto seguir siendo un fruto perenne. Por lo que se garantiza un aprovechamiento de la cáscara de plátano como materia prima para la elaboración de materiales biosorbentes y su utilización en el tratamiento de aguas residuales.
- II. La temperatura óptima de secado de las cáscaras de plátano fue de 110° C para garantizar una consistencia quebradiza y con ello realizar un proceso de trituración sin inconvenientes.
- III. El material biosorbente óptimo a utilizar fue el Sin Tratamiento Químico Con Pulpa (STQCP) debido a que la correlación de los datos presentó un mejor ajuste con un  $R^2$  de 0.997 cuando se trazó el porcentaje de remoción de Cromo VI según el diámetro de partícula, el cual fue de 0.25 mm ya que en este número de malla el material se homogenizó de una mejor manera. Esto se debió, a la presencia de lignina, celulosa y hemicelulosa en la estructura del material, que le confirieron excelentes propiedades de adsorción.
- IV. Las variables de cantidad de material biosorbente y tiempo de contacto en el proceso influyen directamente en la capacidad de adsorción de Cromo VI; teniendo los valores óptimos de 1 g de material biosorbente en 10 mL de agua residual a un tiempo de 4 horas.
- V. El sistema de contacto sólido líquido después del tiempo estipulado de 4 horas logró remover aproximadamente un 98% de Cromo VI, con lo que se garantiza la descarga segura al Alcantarillado de un efluente líquido descontaminado.
- VI. El modelo isotérmico de adsorción que más se ajustó a los datos experimentales fue la isoterma de Freundlich, tomando en cuenta su coeficiente de correlación de  $R^2=0.8589$ . La linealidad mayor correspondió con la heterogeneidad de la superficie del material STQCP y del mecanismo de adsorción física mediante el cual se realizó el proceso.
- VII. El modelo cinético de adsorción que más se ajustó a los datos experimentales fue el modelo de Pseudo Segundo Orden, tomando en cuenta su coeficiente de correlación de  $R^2=0.9699$ . El gran ajuste de los datos concordó con la excelente descripción de la velocidad de adsorción.

- VIII. La disposición final del material biosorbente a nivel químico industrial dependerá de la solución que más se adecue al caso, según los recursos disponibles y el nivel de contaminación presente en el sólido.

## RECOMENDACIONES

- I. Controlar atentamente el sistema de agitación de las cáscaras de plátano con la solución reactiva para el tratamiento químico de estas; de forma que el contacto sea efectivo y pueda verificarse posteriormente el aumento o disminución de la capacidad de adsorción.
- II. Realizar un estudio secando las cáscaras de plátano con otra técnica de secado, sea natural como el secado al sol o artificial como el secado en microondas con la finalidad de evaluar la efectividad del material elaborado.
- III. Caracterizar desde un aspecto morfológico, botánico, químico y físico el material biosorbente elaborado para analizar su estructura y funcionalidad en el proceso involucrado.
- IV. Ensayar pruebas a nivel de laboratorio con el material biosorbente para diferentes concentraciones iniciales de agua residual industrial y verificar el rango de aplicación de este.
- V. Proponer la implementación a nivel industrial del aprovechamiento de materiales biosorbentes en el tratamiento de aguas residuales de la industria de curtiembre y en otras donde pueda ser aplicable. Debido a los beneficios ambientales de su uso y la explotación de masas orgánicas de desecho de industrias alimentarias.
- VI. El método de biosorción a escala industrial deberá considerar la evaluación del impacto ambiental que pueda generar la producción de los materiales biosorbentes naturales. Asimismo, la implementación de sistemas de gestión de calidad al proceso productivo; planteando mejoras para su elaboración y obtención de un producto de alta calidad.
- VII. Continuar con el estudio del aprovechamiento de la cáscara de plátano como material biosorbente para la adsorción de contaminantes, analizando el fenómeno por medio de un sistema continuo para calcular la capacidad máxima de adsorción del analito y evaluando el proceso según los parámetros de interés.
- VIII. Desarrollar la investigación evaluando las propiedades mecánicas del material biosorbente a partir de la cáscara de plátano y el conformado o estructura empaquetada que podría dársele al polvo para utilizarlo en el sistema de contacto con la finalidad de remover los metales pesados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abud, Y., Trujillo, M., y Navarro, M. (2013). Evaluación de la toxicidad ocasionada por el exceso de micronutrientes en plantas de *Arabidopsis thaliana*. *Biológicas. Revista de la DES Ciencias Biológico Agropecuarias*, 14(1), 30-36. Recuperado de <https://www.biologicas.umich.mx/index.php/biologicas/article/view/123/122>
2. Aguilar Casas, P., Cordovez Wandurraga, C. y Molina Montoya, N. (2010). Plomo, cromo III y cromo VI y sus efectos sobre la salud humana. *Ciencia y Tecnología para Salud Visual y Ocular*, 8 (1), 77-88. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5599145.pdf>
3. Aguirre Salgado, E. (2009). *Adsorción de Cd<sup>2+</sup> y 4-clorofenol por silicalita-1 sintetizada a partir de la cáscara de arroz*. (Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México. Recuperado de Tesis del Sistema Bibliotecario de la UNAM.
4. Almendros Molina, A. I. (2016). *Biosorción de níquel con residuos vegetales. Valorización del biosorbente agotado mediante tratamientos termoquímicos*. (Tesis para optar el grado de Doctor). Universidad de Granada, Granada, España. Recuperado de Repositorio Institucional de la Universidad de Granada.
5. Angulo Zavaleta, K.J. y Ayala Garay, S.B. (2011). *MANEJO DE EFLUENTES LÍQUIDOS MEDIANTE GESTIÓN AMBIENTAL EN EL CAMAL DEL DISTRITO EL PORVENIR*. (Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú. Recuperado de Repositorio Institucional UNITRU.
6. Asociación Nacional de Empresarios de Colombia. (1997). *Manual de caracterización de aguas residuales industriales*. Recuperado de <http://www.acodal.org.co/holland/memorias/Taller%20Vertimientos/MANUAL%20DE%20CARACTERIZACION%20DE%20AGUAS%20RESIDUALES%20INDUSTRIALES.pdf>
7. Asociación Salvadoreña de Industriales. (2018). *Ranking de Exportadores Industriales 2018*. Recuperado de <https://industriaelsalvador.com/>
8. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (septiembre 2000). *Resumen de Salud Pública, Cromo*. Recuperado de <http://www.davidborowski.com/work/ATSDR%20ToxFAQs%20and%20PHS%202007/Data/Spanish/PHS%20for%20CROMO.pdf>

9. Barrera Trujillo, V. (2016). *Operaciones para la gestión de residuos industrial (UF0289)*. Recuperado de [https://books.google.com/sv/books?id=ybpWDwAAQBAJ&hl=es&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.com/sv/books?id=ybpWDwAAQBAJ&hl=es&source=gbs_navlinks_s)
10. Bello-Pérez, L., Pano, Y., Agama, E. y Paredes O. (1999). Isolation and partial characterization of banana starches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(3), 854–857. doi 10.1021/jf980828t
11. Benítez Montenegro, A., Morales Candell, V. y Renderos Portillo, M. (2012). *Plan de comercialización para los micro y pequeños productores de calzado que forman parte de la base de proveedores del Programa Paquetes Escolares, del departamento de San Salvador*. (Tesis para optar al grado de Licenciado en Administración de Empresas). Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador. Recuperado de Repositorio Institucional de la UES.
12. Bioinformática. (2018). *INTRODUCCIÓN A LA BIORREMEDIACIÓN*. Recuperado de <http://bioinformatica.uab.es/biocomputacio/treballs02-03/RBurgos/dades/INDICE.html>
13. Blasco López, G. y Gómez Montaña, J.G. (2014). Propiedades funcionales del plátano (*Musa sp.*). *Revista Médica de la Universidad Veracruzana*, 14(2), 22-26. Recuperado de [https://www.uv.mx/rm/num\\_anteriores/revmedica\\_vol14\\_num2/articulos/propiedades.pdf](https://www.uv.mx/rm/num_anteriores/revmedica_vol14_num2/articulos/propiedades.pdf)
14. Campos Aguilar, K.E., Cardona Anaya, J.G. y Centeno Pérez, A.M. (2016). *Propuesta de un sistema de gestión ambiental para lodos procedentes de la industria textil en El Salvador*. (Trabajo de Grado para optar al título profesional de: Ingeniero Químico). Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador. Recuperado de Repositorio Institucional de la UES.
15. Características de aguas residuales. (Mayo 2018). Recuperado de <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/Caracteristicas.PDF>
16. Caviedes Rubio, D.I., Muñoz Calderón, R.A., Perdomo Gualtero, A., Rodríguez Acosta, D. y Sandoval Rojas, I.J. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1), 73-90. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5432290>



17. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal. (2002). *Guía Técnica Cultivo de Plátano*. Recuperado de <http://centa.gob.sv/docs/guias/frutales/Platano.pdf>
18. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal “Enrique Álvarez Córdova”. (2010). *Guía Técnica Cultivo de Plátano*. Recuperado de <http://centa.gob.sv/docs/guias/frutales/GUIA%20CULTIVO%20PLATANO%202011.pdf>
19. Cespón Romero, R. (2008). *Desarrollo de métodos analíticos automáticos para la determinación de metales en el medio ambiente laboral*. (Memoria para optar el grado de Doctora en Química). Universidad de Santiago de Compostela, Galicia, España. Recuperado de <https://books.google.com.sv/books?id=BQwTqorJNIsC&printsec=frontcover&hl=es>
20. China, R., Dutta, S., Sen, S., Chakrabarti, R., Bhowmik, D., Ghosh, S. & Dhar P. (2011). In vitro antioxidant activity of different cultivars of banana flower (*Musa paradisiaca* L) extracts available in India. *Journal of Food Science*, 76(9), 1292-1299. doi: 10.1111/j.1750-3841.2011.02395.x.
21. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. (11 de marzo 2009). Norma Salvadoreña Obligatoria: 13.49.01:09. “Aguas. Aguas Residuales descargadas a un cuerpo receptor”. En *Diario Oficial Acuerdo No. 249*. Recuperado de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/els87596.pdf>
22. Corporación Nacional Forestal. (2009). *Lombricultura y Vermicompostaje*. Recuperado de <http://www.alternativasquemas.cl/fileadmin/ArchivosPortal/Alternativas/LOMBR/CULTURA/ficha6.pdf>
23. Corredor Rivera, J. L. (2006). El residuo líquido de las curtiembres estudio de caso: Cuenca Alta del río Bogotá. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 16(2), 14-28. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/911/91116203.pdf>
24. Cruz Ramales, S., Ramírez Perucho, A., Torres López, D., Coyotl Castillo, A. C. y Silveti Loeza, Á. (2010). Evaluación de metales pesados en la mezcla biosólido-cáscara de naranja. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, 1 (2), 32-44. Recuperado de [http://cmas.siu.buap.mx/portal\\_pprd/work/sites/rlac/resources/LocalContent/65/1/Evaluacion%20de%20metales%20Cruz-Ramales.pdf](http://cmas.siu.buap.mx/portal_pprd/work/sites/rlac/resources/LocalContent/65/1/Evaluacion%20de%20metales%20Cruz-Ramales.pdf)

25. Cuesta-Parra, D. M., Velazco-Rincón, C. L. y Castro-Pardo, J. C. (2018). Evaluación ambiental asociada a los vertimientos de aguas residuales generados por una empresa de curtiembres en la cuenca del río Aburrá. *Revista UIS Ingenierías*, 17(2), 141-152. Recuperado de <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/8116>
26. Cury Regino, K.I. (2004). *Aguas Residuales efluentes de procesos de curtición*. (Tesis previa a la obtención del título de Ingeniera Agroindustrial). Universidad de Sucre, Sincelejo, Colombia. Recuperado de Repositorio Digital de la Universidad de Sucre.
27. Definiciones-de.com (20 de octubre 2010). *Definición de fisisorción (adsorción física)*. Recuperado de <http://www.definiciones-de.com/Definicion/de/fisisorcion.php>
28. Díaz de Santos, S.A. (1992). *Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Madrid, España.
29. Díaz Rengifo, J. A. (2001). *Desarrollo de un sistema integrado para la monitorización "in situ" de metales pesados*. (Tesis para optar el grado de Doctor de Ingeniero Químico). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/94294/Tesis.pdf>
30. Driss Alami, S.B. (2010). *Aprovechamiento de hueso de aceituna BIOSORCIÓN de iones metálicos*. (Tesis Doctoral). Universidad de Granada, Granada, España. Recuperado de Repositorio Institucional de la Universidad de Granada.
31. EPA U.S.A. (1992). *Método 7196A, Cromo Hexavalente (Colorimétrico)*. Traducido al español.
32. Federación de Asociaciones de Regantes de El Salvador. (mayo 2002). *Estudio Técnico y de Mercado del plátano*. San Vicente, El Salvador. Recuperado de <http://www.sanvicenteproductivo.org/est/Estudio%20Platano.pdf>
33. Figueroa, D., Moreno, A. y Hormaza, A. (2015). Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14 (26), 105-120. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v14n26/v14n26a08.pdf>

34. Floresyplantas.net (18 de noviembre 2012). *Biopolímeros para eliminar contaminantes*. Recuperado de <https://www.floresyplantas.net/biopolimeros-para-eliminar-contaminantes/>
35. Galváo, L., y Corey, G. (1987). *Cromo*. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud en Meltepec, México. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsea/e/fulltext/cromo/cromo.pdf>
36. García Barrera, A. V. (2016). *Elaboración de una biorresina intercambiadora de cationes a partir de cáscara de plátano o guineo para eliminar metales pesados en agua contaminada*. Escuela Especializada en Ingeniería ITCA-FEPADE, Escuela de Ingeniería Química, Santa Tecla, El Salvador.
37. García Ríos, M. (junio 2008). *Biosorción de cadmio con raspo de uva. Aproximación a la monitorización del proceso mediante sensores químicos*. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/5503/MEMORIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
38. Garófalo, M. y Ramírez, J. (2002). Cinética Homogénea: Energía de activación. *Revista RECITEIA*, 2(1), 5. Recuperado de <https://books.google.com.sv/books?id=zDiYBXaYPmIC&printsec=frontcover&hl=es>
39. Greenpeace (febrero 2013). *Cueros tóxicos II. Curtiembres: Actualización de evidencias de contaminación en la Cuenca Matanza*. Buenos Aires, Argentina. Recuperado de <https://www.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/report/2013/contaminacion/Cueros-toxicos-II-Greenpeace.pdf>
40. Instituto de Toxicología de la Defensa. (8 de noviembre 2016). *PROTOCOLO DE TOMA DE MUESTRAS DE AGUA RESIDUAL*. Recuperado de <http://www.defensa.gob.es/itoxdef/Galerias/documentacion/protocolos/ficheros/PROTOCOLO DE TOMA DE MUESTRAS DE AGUA RESIDUAL ver 2.pdf>
41. Kudan M. (1975). *Encyclopedia of fruits, vegetables, nuts and seeds for healthful living*. Hattiesburg Maryland: Parker Publishers Inc.
42. Leitzmann, M. (2005). Bethesda, Maryland: National Cancer Institute.

43. Linnaeus, C.V. (1753). Plátano. *Species Plantarum*, 2(1043). Recuperado de <https://www.ecured.cu/Pl%C3%A1tano>
44. Mc Cann, M. (1998). Capítulo 88. Cuero, pieles y calzado. En Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo 3(3), 1-5. España: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. Subdirección General de Publicaciones. Recuperado de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/88.pdf>
45. McLaren, D. & Frigg, M. (2001). Sight and Life Manual on Vitamin A Deficiency Disorders (VADD), 2<sup>nd</sup> Ed. Basel: Task Force Sight and Life.
46. Miller, N.J. y Miller, J.C. (2002). Métodos de calibración en análisis instrumental: regresión y correlación. En Miller, N.J. y Miller, J.C. (Ed.), *Estadística y Quimiometría para Química Analítica* (pp. 111-140). Madrid: Prentice Hall.
47. Muñoz Carpio, J. (2007). *Biosorción de plomo (II) por cáscara de naranja "citrus cinensis" pretratada*. (Tesis para optar el Título Profesional de Químico). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. Recuperado de Repositorio de Tesis Digitales UNMSM.
48. Muñoz García, P., Urrutia Vasquez, C. y Vaquero Andrade, N. (2005). *Aplicación de Tecnologías de producción más limpia para la pequeña y media industria de curtiembre en El Salvador*. (Tesis para optar el grado de Ingeniero Químico) Universidad de El Salvador. Recuperado de Repositorio Institucional de la UES.
49. Nordberg, G. (1998). Capítulo 63. Metales: Propiedades químicas y toxicidad. En Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo 2(3), 15-18. España: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. Subdirección General de Publicaciones. Recuperado de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/63.pdf>
50. Ordóñez Vinueza, J.L. y Moreno Farfán, R.A. (2013). *Estudio del aprovechamiento de residuos orgánicos de cultivos de flores (tallos de rosa) como biosorbente de Cadmio para el tratamiento de aguas residuales*. (Tesis previa a la obtención del título de Ingenieros Ambientales). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. Recuperado de Repositorio Institucional de la UPS

51. Palacios, A. y América, L. (1997). Contaminación ambiental, origen, clases, fuentes y efectos. En ECO. Introducción a la toxicología ambiental, 37-52. México: Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-01a4.pdf>
52. Parker, A. (2001). Principios de la reducción de contaminantes en las descargas gaseosas. En Parker, A. (Ed.), *Contaminación del aire por la industria* (pp. 203). Barcelona: REVERTÉ.  
Recuperado de <https://books.google.com/sv/books?id=LHSl6tJfpolC&printsec=frontcover&hl=es>
53. Peña Rodón, J.A. (29 de septiembre 2012). *Gestión ambiental del agua en las empresas de curtiembre*. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/108210151/Gestion-ambiental-Curtiembre>
54. Pinzón Bedoya, M.L. y Vera Villamizar, L.E. (2009). MODELAMIENTO DE LA CINÉTICA DE BIOADSORCIÓN DE Cr (III) USANDO CÁSCARA DE NARANJA. *DYNA*, 76 (160), 95-106. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/viewFile/13588/14380>
55. Plataforma Educativa Aragonesa. (21 de octubre 2016). *Tierra, medio ambiente y humanidad: La ciudad produce residuos*. Recuperado de [http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/2500/2643/html/32\\_almacenamiento\\_de\\_residuos\\_vertederos\\_y\\_depsitos.html](http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/2500/2643/html/32_almacenamiento_de_residuos_vertederos_y_depsitos.html)
56. Raffo Lecca, E. y Ruiz Lizama, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*, 17(1), 71-80. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/816/81640855010.pdf>
57. Ramos Rincón, J.M. (2010). *ESTUDIO DEL PROCESO DE BIOSORCIÓN DE COLORANTES SOBRE BORRA (CUNCHO) DE CAFÉ*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Recuperado de Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Colombia.
58. Reciclame (abril 2018). *Vertederos controlados*. Recuperado de <http://www.reciclame.info/gestion-de-residuos-2/vertederos-controlados/>
59. Ronda Gálvez, A. (2016). *Preparación y aplicación de biosorbentes activados químicamente para la eliminación de plomo de medios acuosos*. (Tesis

- Doctoral). Universidad de Granada. Recuperado de Granada, España. Recuperado de Repositorio Institucional de la Universidad de Granada.
60. Sala, L.F., García, S.I., González, J.C., Frascaroli, M.I., Bellú, S., Mangiameli, F., Blanes, P., Mogetta, M.H., Andreu, V., Arita, A.M. y Salas Peregrin, J.M. (2010). Biosorción para la eliminación de metales pesados en aguas de desecho. *Química y Medio Ambiente*, 106(2), 114-120. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3235861>
61. Sánchez Pina, J. (2014). *Eliminación de Metales Pesados de Efluentes Líquidos por Adsorción en Materiales Naturales Residuales de Bajo Coste (Acículas de Pino)*. (Tesis para optar el grado de Doctor). Universidad de Murcia, Murcia, España. Recuperado de Repositorio Institucional de la Universidad de Murcia
62. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. (15 de agosto 2007). *Programas de Reconversión Industrial-PRI. Sector: Curtiembres. Optimización del uso de agua y Manejo de Aguas Residuales Industriales*. Buenos Aires, Argentina.
63. Serpa Juli, M.S. (2017). *Remoción de metales pesados Cd y Hg en lodos residuales de la laguna de estabilización secundaria El Espinar-Puno, utilizando vermicomposteo*. (Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Químico). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú. Recuperado de Repositorio Institucional Digital de la Universidad Nacional del Altiplano.
64. Servicio Nacional para la Sostenibilidad de Servicios en Saneamiento Básico. (2015). *Guía para la toma de muestras de agua residual*. Recuperado de [https://periaqua.webmo.info/img\\_auth.php/7/7f/Guia\\_para\\_la\\_toma\\_de\\_muestra\\_de\\_agua\\_residual.pdf](https://periaqua.webmo.info/img_auth.php/7/7f/Guia_para_la_toma_de_muestra_de_agua_residual.pdf)
65. Someya, S., Yoshiki, Y. & Okubo K. (2002). Antioxidant compounds from bananas (*Musa Cavendish*). *Food Chemistry*, 79(3), 351–54. doi 10.1016/s0308-8146(02)00186-3
66. Tejada Tovar, C., Villabona Ortiz, A. y Garcés Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecnológicas*, 18 (34), 109-123. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v18n34/v18n34a10.pdf>

67. Treybal, R.E. (1980). Operaciones sólido – fluido. En Treybal, R.E. (Ed.), *OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA* (pp. 646-690). McGraw-Hill: Ciudad de México.  
Recuperado de <https://fenomenosdetransporte.files.wordpress.com/2008/05/operaciones-de-transferencia-de-masa-robert-e-treybal.pdf>
68. Vásquez García, D. A. (marzo 2011). *Análisis de caso de éxito en la internacionalización de producto de calzado. Caso: Industrias Caricia*. (Investigaciones de Posgrados, Universidad Dr. José Matías Delgado).  
Recuperado de <http://webquery.ujmd.edu.sv/siab/bvirtual/BIBLIOTECA%20VIRTUAL/TESIS/30/MNI/ADVA0000899.pdf>
69. Veglio, F. & Beolchini, F. (1997). Removal of metals by biosorption: a review. *Hydrometallurgy*, 44(3), 301-316. doi: 10.1016/s0304-386x(96)00059-x
70. Villanueva Carrillo, A. (2017). *Estudio de la remoción de Cromo hexavalente presente en solución acuosa, empleando la biomasa de la Musa Paradisiaca como biosorbente*. (Tesis para obtener el título de Licenciada en Ciencias Ambientales). Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.  
Recuperado de Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma del Estado de México.

## ANEXO A

### Lugares adecuados para tomar muestras de aguas residuales (SENASBA, 2015).

Para conocer la eficiencia de una PTAR se toma en general una muestra del efluente y del afluente, es decir de la salida y de la entrada del agua a la PTAR.

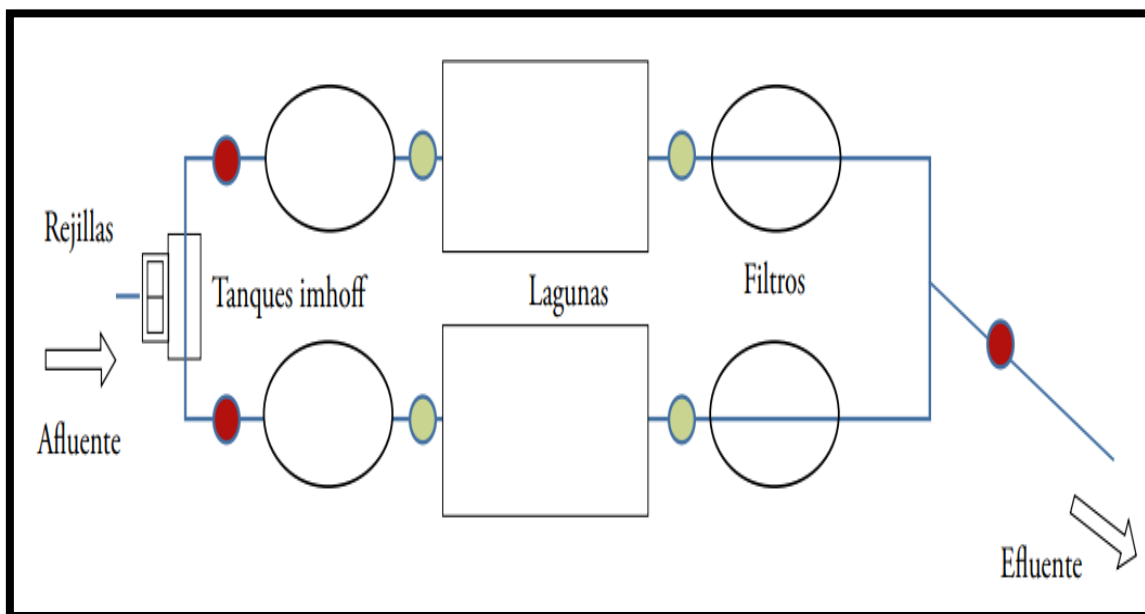
Estas muestras se deben tomar en el afluente, después de la rejilla y del desarenador, para evitar que cuerpos gruesos y arena interfieran con los resultados de la muestra.

Respecto al efluente la muestra se debe tomar en el canal de salida que transporta el agua hacia el cuerpo receptor.

En los siguientes esquemas se puede observar los ejemplos de donde es el lugar adecuado para la toma de muestras según el sistema de tratamiento que se tiene, los cuales están caracterizados por un punto rojo.

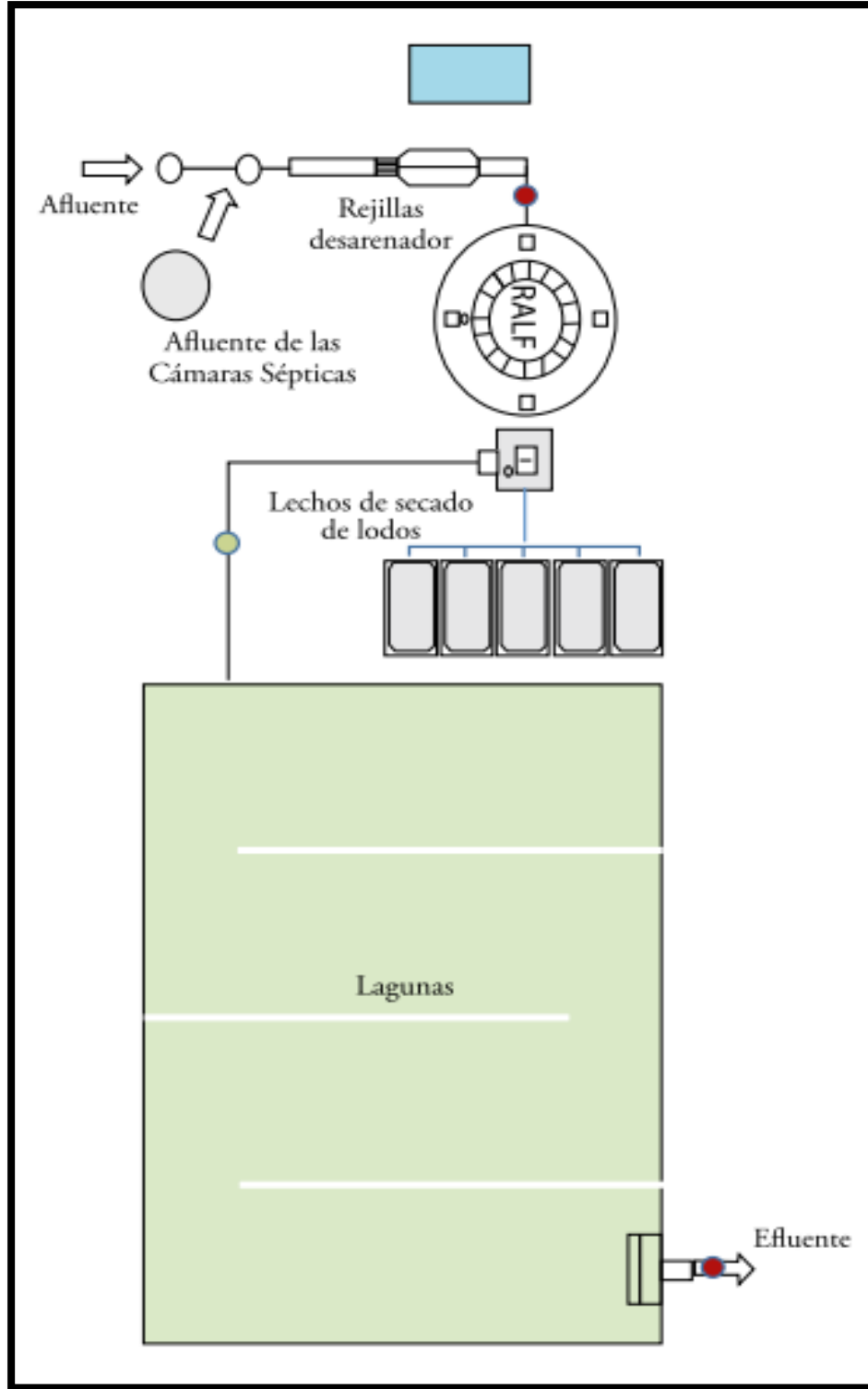
A veces también es necesario conocer la eficiencia de cada uno de los procesos del tratamiento, como por ejemplo en las lagunas o los reactores, esto con el fin de comprobar su funcionamiento.

En este caso se aconseja tomar la muestra en la tubería o el canal de conexión entre dos dispositivos. En las siguientes imágenes, estos puntos de muestreo están identificados de color verde.



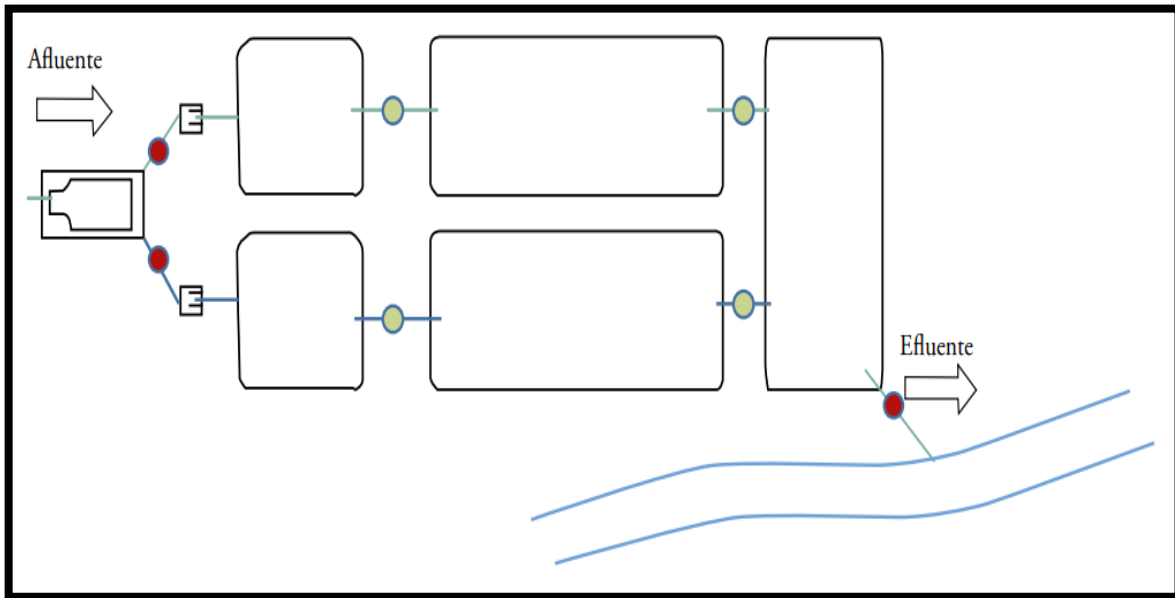
**Figura A.1** Diagrama de una PTAR de lagunas combinadas con otros dispositivos





**Figura A.2** Diagrama de una PTAR con RALF<sup>10</sup> y una laguna de maduración.

<sup>10</sup> Reactor Anaeróbico de Lodo Fluidizado.



**Figura A.3** Diagrama de una PTAR de lagunas.

## ANEXO B

### Métodos de análisis para la determinación de los parámetros contemplados en los Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (1992).

#### A. Método 5520 D - Grasas y/o Aceites.

##### *Principio.*

Los aceites disueltos, emulsificados y la grasa son extraídos del agua por extracción sólido-líquido con éter de petróleo, duración del proceso de 3-4 horas. Después de la extracción el residuo es evaporado para retirar el solvente y determinar el contenido de grasas y aceites.

##### *Cálculo.*

$$\frac{\text{mg aceites } \frac{\text{y}}{\text{o}} \text{ grasas}}{\text{L}} = \frac{(A - B) * 1000}{\text{mL muestra}}$$

Donde:

A= peso del balón seco, mg.

B= peso del balón vacío, mg.

#### B. Método 5220 B - Demanda Química de Oxígeno (DQO).

##### *Principio.*

La Demanda Química de Oxígeno es una medida que se usa para determinar el oxígeno equivalente a la cantidad de materia orgánica que es susceptible de oxidación por medio de un agente químico fuerte. En este caso el oxidante fuerte es el Dicromato de Potasio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) en medio ácido ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). La digestión se hace durante 2 horas acompañada con un blanco.

##### *Cálculo.*

$$\frac{\text{DQO mg O}_2}{\text{L}} = \frac{(B - A) * N * 8000}{\text{mL muestra}}$$

Donde:

N= Normalidad del FAS.

A= ml de FAS gastado en el blanco.

B= ml de FAS gastado en la muestra.

FAS= Sulfato Ferroso Amoniacal, reactivo titulante del exceso de dicromato.

### C. Método 5210 B - Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>).

#### **Principio.**

Consiste en incubar la muestra de agua con microorganismos aeróbicos determinando el consumo de oxígeno a los cinco días de iniciado el proceso de degradación biológica. Se determina el oxígeno inicial y a los cinco días de sembrada la muestra. Esta siembra se realiza por triplicado y con un blanco para asegurar que el consumo de oxígeno se debió solamente a la degradación de la muestra de agua. La medida del consumo de oxígeno señala que tan biodegradable es el agua con respecto a la demanda química de oxígeno. Es un dato empírico de esta degradación.

#### **Cálculo.**

$$\frac{\text{DBO}_5 \text{ mg O}_2}{\text{L}} = \frac{[(A-B)-(D-C)*f]}{\text{P}}$$

Donde:

A = Oxígeno disuelto al día 0 de la muestra.

B = Oxígeno disuelto al día 5 de la muestra.

D = Oxígeno disuelto al día 0 del blanco.

C = Oxígeno disuelto al día 5 del blanco.

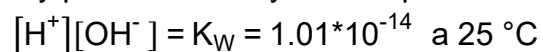
f = Relación de semilla usada en la muestra/semilla usada en el blanco.

### D. Método 4500 – H<sup>+</sup> B pH.

#### **Principio.**

La medida de pH es uno de los test más significativos y más frecuentes usados en la química del agua. Prácticamente todo suministro de agua y tratamiento de agua residual depende del pH por ejemplo neutralización ácido – base, ablandamiento del agua, precipitación, coagulación, desinfección y control de corrosión, depende del pH. A una temperatura dada, la intensidad del carácter ácido o básico de una solución es indicada por el pH o por la actividad del ion hidrogeno. La alcalinidad y acidez son las capacidades neutralizantes de ácidos y bases de un agua y normalmente se expresan como miligramos de CaCO<sub>3</sub> por litro.

Sorenson definió el pH como el  $-\log [H^+]$ ; es el factor de “intensidad” o acidez. El agua pura está muy poco ionizada y en el equilibrio el producto iónico es:



$$[H^+] = [OH^-] = 1.005 \cdot 10^{-7}$$

Donde:

$[H^+]$  = actividad de iones hidrógeno, moles/L.

$[OH^-]$  = actividad de iones hidroxilo, moles/L.

$K_w$  = producto iónico del agua.

Debido a las interacciones en todas las soluciones, excepto en las muy diluidas, es necesario utilizar la "actividad" de un ion y no su concentración molar. El uso del término pH supone que se está considerando la actividad del ion hidrógeno, a  $H^+$ . Para expresar una amplia gama de actividades iónicas es conveniente una escala logarítmica. La ecuación en forma logarítmica y corregida para reflejar la actividad es:

$$(-\log_{10} a_{H^+}) + (-\log_{10} a_{OH^-}) = 14 \quad \text{ó}$$
$$pH + pOH = pK_w$$

Donde:

$$pH = \log_{10} a_{H^+}$$

$$pOH = -\log_{10} a_{OH^-}$$

La medida se realiza frecuentemente por métodos electrométricos teniendo como principio básico la determinación electrométrica del pH es la medida de la actividad de los iones hidrógeno por mediciones potenciométricas utilizando un electrodo patrón de hidrógeno y otro de referencia. El electrodo de hidrógeno consiste en un electrodo de platino por el que se pasan burbujas de hidrógeno gaseoso a una presión de 101 kPa. Debido a la dificultad de utilizarlo y al potencial de intoxicación del electrodo de hidrógeno, se utiliza comúnmente el electrodo de vidrio.

La fuerza electromotriz (fem) producida en el sistema de electrodo de vidrio varía linealmente con el pH y esta relación lineal se describe comparando la fem medida con el pH de diferentes tampones. El pH de la muestra se determina por extrapolación.

La escala operativa del pH se utiliza para medir el pH de la muestra y se define como:

$$pH_x = pH_B \mp \frac{F (E_x - E_S)}{2.303 RT}$$

Donde:

pH<sub>x</sub> = pH de la muestra medido potenciométricamente.

F = Faraday:  $9.649 \cdot 10^4$  culombios / mol.

E<sub>x</sub> = muestra fem, V.

E<sub>s</sub> = tampón fem, V.

R = Constante del gas, 8.314 julio/ (mol °K).

T = Temperatura absoluta, °K.

La temperatura afecta a la medida del pH de dos formas: efectos mecánicos producidos por cambios en las propiedades de los electrodos y efectos químicos causados por cambios de equilibrio. Dado que el equilibrio químico afecta al pH, los tampones patrón de pH tienen un pH específico a las temperaturas indicadas. Por ello, se debe indicar siempre a qué temperatura se ha medido el pH.

#### **E. Método 2550 – Temperatura.**

##### ***Principio.***

Normalmente las medidas de temperatura pueden ser hechas con cualquier termómetro en grados Celsius (°C) lleno de mercurio (Hg). Como mínimo el termómetro deberá tener una escala marcada cada 0.1 °C, con las marcas hechas en el capilar. El termómetro debe poseer una capacidad térmica mínima que permita un equilibrio rápido. La medida de temperatura es importante debido a que temperaturas elevadas que resultan de las descargas de agua caliente pueden tener un impacto ecológico significativo. Plantas industriales a menudo requieren datos de temperatura de agua para ser usadas en un proceso o para cálculos de transferencia de calor.

#### **F. Método 2540 B – Sólidos Totales.**

##### ***Principio.***

Un volumen fijo de agua se hace evaporar en un beaker de peso conocido en una mufla a una temperatura de 103-105 °C, hasta llegar el recipiente a peso constante.

##### ***Cálculos.***

$$\frac{\text{mg sólidos totales}}{L} = \frac{(A - B) \cdot 1000}{\text{mL muestra}}$$

Donde:

A = peso del residuo seco + peso beaker vacío, mg.

B = peso del beaker vacío, mg.

## G. Método 2540 D – Sólidos Suspendidos Totales.

### **Principio.**

Una muestra de agua es filtrada a través de un papel de fibra de vidrio (Whatman 934 AH = S&S 30) de peso conocido, el residuo es secado en una mufla a 103–105 °C hasta llegar a peso constante.

### **Cálculos.**

$$\frac{\text{mg sólidos suspendidos totales}}{L} = \frac{(A - B) * 1000}{\text{mL muestra}}$$

Donde:

A = peso del residuo + peso vacío del papel, mg

B = peso del papel vacío, mg.

## H. Método 2540 F - Sólidos Sedimentables.

### **Principio.**

Sólidos sedimentables en agua de superficie y salinas al igual que desechos domésticos e industriales puede ser reportado y determinados en base volumen (mL/L – h) o en base peso (mg/L).

### **Instrumento.**

El test volumétrico requiere solamente de un cono Imhoff de 1 litro, se toma un litro de muestra se vierte en el cono, transcurrido una hora (1 h) se leen los mililitros de material que sedimentó.

### **Cálculos.**

i. Base peso:

$$\frac{\text{mg Sólidos Sedimentables}}{L} = \frac{(\text{mg SST} - \text{mg Sólidos no sedimentables})}{L}$$

Siendo SST = Sólidos Suspendidos Totales.

ii. Base volumen:

$$\frac{\text{mL de sólidos sedimentables}}{L} = \frac{\text{mL que sedimentaron}}{\text{Litro de muestra-hora}}$$

#### I. Método 3500 –Cr.

**Selección de método:** Utilícese el método colorimétrico para determinar el cromo hexavalente en agua natural o tratada para su potabilidad. Empléese el método espectrométrico de absorción atómica electrotérmica (horno de grafito) para determinar niveles bajos de cromo total (< 50 mg/L) en aguas naturales y residuales. Utilícese el método espectrométrico de absorción atómica de llama o el método de plasma de acoplamiento inductivo para medir concentraciones del orden de miligramos por litro.

**Manipulación de las muestras:** Si únicamente se trata de determinar el metal disuelto, fíltrese la muestra a través de un filtro de membrana de 0.45 µm en el momento de su toma. Después de la filtración, acidúlese el filtrado con ácido nítrico concentrado (HNO<sub>3</sub>) hasta pH < 2. Si lo que se desea es el contenido de cromo total, acidúlese la muestra sin filtrar con HNO<sub>3</sub> concentrado hasta pH < 2 en el momento de tomarla.

En la Tabla B.1, se presenta una breve explicación de cada uno de los métodos de análisis para la determinación del metal pesado Cromo, tomando en cuenta el número de referencia de “Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales”, lo que analiza y el principio de cada uno de ellos.



**Tabla B.1** Métodos de determinación de Cromo en análisis de aguas potables y residuales.

Número de referencia Standard Methods	Nombre del Método	Analiza	Principio
3500-Cr D	Método Colorimétrico	Determina el Cromo Hexavalente en agua natural o tratada para potabilización.	El cromo hexavalente se determina colorimétricamente por una reacción con difenilcarbazida en solución ácida. Se produce un color rojo violeta de composición desconocida. La reacción es muy sensible, siendo la capacidad de absorción molar, basada en el cromo, de aproximadamente 40000/ g* cm a 540 nm. Para determinar el cromo total, digiérase la muestra con una mezcla acida sulfúrico-nítrico y oxídese después con permanganato potásico antes de la reacción con la difenilcarbazida.
3111	Método por Espectrometría de absorción atómica de llama	Determina concentraciones del orden de miligramos por litro.	Mide la cantidad de luz emitida, mientras que en la espectrometría de absorción atómica se dirige un rayo luminoso a través de una llama a un monocromador y sobre un detector que mide la cantidad de luz absorbida por el elemento atomizado en la llama. Como cada metal tiene su propia longitud de onda de absorción característica, se utiliza como fuente luminosa una lámpara compuesta de dicho elemento; esto proporciona un método relativamente libre de interferencias espectrales o de radiación. La cantidad de energía absorbida en la llama a una longitud de onda característica es proporcional a la concentración del elemento en la muestra, en un intervalo de concentraciones limitado. La mayor parte de los instrumentos de absorción atómica están equipados para funcionar también en la forma de emisión.

continúa

**Tabla B.1** Métodos de determinación de Cromo en análisis de aguas potables y residuales (continuación).

<b>Número de referencia Standard Methods</b>	<b>Nombre del Método</b>	<b>Analiza</b>	<b>Principio</b>
<b>3120 B</b>	Método de plasma de acoplamiento inductivo (PAI)	Determina concentraciones del orden de miligramos por litro.	<p>Una fuente de PAI consiste en una corriente de flujo de gas argón ionizado por aplicación de un campo de radiofrecuencias típicamente oscilantes a 27.1 MHz. Este campo está acoplado inductivamente al gas ionizado por una bobina refrigerada con agua que rodea a una lámpara de cuarzo que soporta y confina el plasma. En un apropiado nebulizador y cámara de pulverización se genera un aerosol de la muestra que se lleva al plasma a través de un tubo inyector colocado dentro de la lámpara.</p> <p>La eficaz excitación proporcionada por PAI da lugar a bajos límites de detección para muchos elementos. Esto, unido al extenso recorrido dinámico, permite una determinación multielemental eficaz de metales.</p>
<b>3113 B</b>	Método espectrométrico de absorción atómica electrotérmica	Determinar niveles bajos de Cromo Total (<50 mg/L) en aguas naturales y residuales.	<p>Se basa en el mismo principio que la atomización directa a la llama, con la diferencia de que en este caso se emplea un atomizador calentado eléctricamente o un horno de grafito en lugar de una cabeza de quemador estándar. Se introduce un volumen discreto de muestra en el tubo de muestras de grafito (o cubilete). Normalmente, la determinación se realiza por calefacción de la muestra en tres o más etapas. Primero, una corriente de baja intensidad calienta el tubo para secar la muestra. En la segunda etapa, o carbonización, se destruye la materia orgánica y se volatilizan otros componentes de la matriz a una temperatura intermedia. Por último, una corriente de elevada intensidad calienta el tubo hasta la incandescencia y atomiza el elemento cuya concentración se determina en una atmósfera inerte.</p>

## J. Método 2120 C de espectrofotométrico.

### **Principio.**

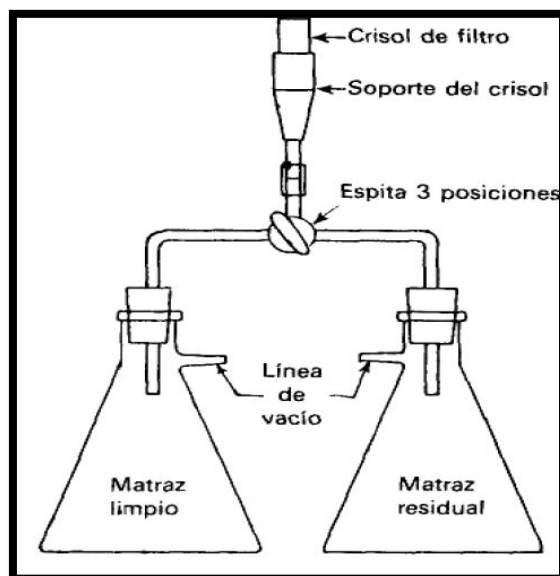
El color de una muestra filtrada se expresa en términos que describen la sensación percibida al observarla. La tonalidad (rojo, verde, amarillo, etcétera) se designa como longitud de onda dominante, el grado de brillantez como luminancias y la saturación (pálido, pastel, etc.) como pureza. Como mejor se detectan estos valores es a partir de las características de transmisión de la luz de una muestra filtrada, mediante espectrofotometría.

### **Aplicación.**

Este método es aplicable en aguas potables y de superficie, y en aguas residuales, tanto domésticas como industriales.

### **Instrumento.**

- a) El espectrómetro tendrá células de absorción de 10 mm, una banda espectral limitada (10 nm o menos) y un margen operativo eficaz comprendido entre 400 y 700 nm.
- b) Sistema de filtrado, que consta de lo siguiente:
  - i. Matraces de filtrado, 250 ml, con tubos laterales.
  - ii. Soporte de crisol Walter.
  - iii. Crisol de filtro micrometálico, tamaño medio de poro, 40 unidades.
  - iv. Auxiliar de filtrado por calcinación.
  - v. Sistema de vacío.



**Figura B.1** Sistema de filtrado para determinaciones de color.

Fuente: Díaz de Santos, (1992).

## **ANEXO C**

### **MÉTODO 7196A CROMO HEXAVALENTE, COLORIMÉTRICO (EPA, 1992).**

#### **1. ÁMBITO DE APLICACIÓN**

- 1.1. El método 7196 se utiliza para determinar la concentración de cromo hexavalente disuelto [Cr (VI)] en extractos característicos EP / TCLP y aguas subterráneas. Este método también puede aplicarse a ciertos desechos domésticos e industriales, siempre que no haya sustancias interferentes presentes (ver el Párrafo 3.1 a continuación).
- 1.2. El método 7196 se puede usar para analizar muestras que contienen de 0.5 a 50 mg de Cr (VI) por litro.

#### **2. RESUMEN DEL MÉTODO**

- 2.2. El cromo hexavalente disuelto, en ausencia de cantidades interferentes de sustancias tales como molibdeno, vanadio y mercurio, puede determinarse colorimétricamente por reacción con difenilcarbazida en solución ácida. Se produce un color rojo violeta de composición desconocida. La reacción es muy sensible, el índice de absorbancia por átomo gramo de cromo es de aproximadamente 40,000 a 540 nm. La adición de un exceso de difenilcarbazida produce el producto rojo-violeta, y su absorbancia se mide fotométricamente a 540 nm.

#### **3. INTERFERENCIAS**

- 3.1. La reacción de cromo con difenilcarbazida generalmente está libre de interferencias. Sin embargo, ciertas sustancias pueden interferir si la concentración de cromo es relativamente baja. El molibdeno hexavalente y las sales de mercurio también reaccionan para formar color con el reactivo; sin embargo, las intensidades rojo-violeta producidas son mucho más bajas que las del cromo al pH especificado. Se pueden tolerar concentraciones de hasta 200 mg/L de molibdeno y mercurio. El vanadio interfiere fuertemente, pero las concentraciones hasta 10 veces mayores que las del cromo no causarán problemas.
- 3.2. El hierro en concentraciones superiores a 1 mg/L puede producir un color amarillo, pero el color del hierro férrico no es fuerte y normalmente no se encuentra dificultad si la absorbancia se mide fotométricamente a la longitud de onda apropiada.

#### **4. APARATOS Y MATERIALES**

4.1. Equipo colorimétrico: se requiere uno de los siguientes: Ya sea un espectrofotómetro, para uso a 540 nm, que proporciona una trayectoria de luz de 1 cm o más, o un filtro de fotómetro, proporcionando una trayectoria de luz de 1 cm o más y equipado con un color verdoso - filtro amarillo que tiene una transmitancia máxima cerca de 540 nm.

#### **5. REACTIVOS**

5.1. Agua de reactivo: El agua de reactivo debe monitorearse para detectar impurezas.

5.2. Solución madre de dicromato de potasio: disolver 141.4 mg de dicromato de potasio seco,  $K_2Cr_2O_7$  (grado de reactivo analítico), en agua de reactivo y diluir a 1 litro (1 ml = 50 ug de Cr).

5.3. Solución estándar de dicromato de potasio: Diluir 10.00 ml de solución madre de dicromato de potasio a 100 ml (1 ml = 5 ug Cr).

5.4. Ácido sulfúrico, 10% (v / v): Diluir 10 ml de reactivo destilado grado o calidad espectral de ácido sulfúrico,  $H_2SO_4$ , a 100 ml con agua de reactivo.

5.5. Solución de difenilcarbazida: disuelva 250 mg de 1,5-difenilcarbazida en 50 ml de acetona. Almacenar en una botella marrón. Descartar cuando la solución se decolora.

5.6. Acetona (grado de reactivo analítico): Evite o vuelva a tapar el material que viene en recipientes con tapas metálicas o revestidas de metal.

#### **6. TOMA, CONSERVACIÓN Y MANEJO DE MUESTRAS**

6.1. Todas las muestras deben haberse recopilado utilizando un plan de muestreo que aborde las consideraciones discutidas en el Capítulo Nueve de este manual.

6.2. Dado que la estabilidad del Cr (VI) en los extractos no se comprende completamente en este momento, el análisis debe llevarse a cabo lo antes posible.

6.3. Para retardar la actividad química del cromo hexavalente, las muestras y extractos deben almacenarse a 4 °C hasta su análisis. El tiempo máximo de retención o antes del análisis de las muestras o extractos es de 24 horas. El tiempo de espera de 24 horas comienza después de la extracción.

## 7. PROCEDIMIENTO

7.1. Desarrollo y medición del color: transfiera 95 mL del extracto a analizar a un matraz volumétrico de 100 ml. Agregue 2.0 mL de solución de difenilcarbazida y mezcle. Agregue la solución de  $H_2SO_4$  para dar un pH de 2 +/- 0.5, diluya a 100 ml con agua de reactivo, y deje reposar de 5 a 10 minutos para el desarrollo del color completo. Transfiera una porción apropiada de la solución a una celda de absorción de 1 cm y mida su absorbancia a 540 nm. Use agua reactiva como referencia. Corrija la lectura de absorbancia de la muestra restando la absorbancia de un blanco llevado a través del método (vea la NOTA a continuación). Se debe preparar una alícuota de la muestra que contiene todos los reactivos excepto la difenilcarbazida y se debe usar para corregir la turbidez de la muestra (es decir, una pieza en blanco de turbidez). A partir de la absorbancia corregida, determine el mg/L de cromo presente por referencia a la curva de calibración.

**NOTA:** Si la solución es turbia después de la dilución a 100 ml en el paso 7.1 anterior, tome una lectura de absorbancia antes de agregar el reactivo carbazida y corrija la lectura de absorbancia de la solución coloreada final restando la absorbancia medida previamente.

7.2. Preparación de la curva de calibración:

7.2.1. Para compensar posibles pérdidas leves de cromo durante la digestión u otras operaciones del análisis, trate los estándares de cromo por el mismo procedimiento que la muestra. En consecuencia, pipetear una solución patrón de cromo en volúmenes medidos en vasos de precipitados de 250 ml o matraces cónicos para generar concentraciones estándar que varían de 0.5 a 5 mg /L de Cr (VI) cuando se diluye al volumen apropiado.

7.2.2. Desarrollar el color de los estándares en cuanto a las muestras. Transfiera una porción adecuada de cada solución coloreada a una celda de absorción de 1 cm y mida la absorbancia a 540 nm. Como referencia, use agua reactiva. Corrija las lecturas de absorbancia de los estándares restando la absorbancia de un blanco de reactivo llevado a través del método. Construya una curva de calibración trazando los valores de absorbancia corregidos contra mg/L de Cr (VI).

7.3. Verificación:

7.3.1. Para cada matriz de muestra analizada, se requiere verificación para asegurar que ni una condición de reducción ni una interferencia química

estén afectando el desarrollo del color. Esto se debe lograr mediante el análisis de una segunda alícuota de 10 ml del filtrado ajustado al pH que se ha enriquecido con Cr (VI). La cantidad de espiga añadida debe duplicar la concentración encontrada en la alícuota original. En ningún caso el aumento debe ser inferior a 30 µg de Cr (VI) / litro. Para verificar la ausencia de una interferencia, la recuperación del pico debe estar entre 85% y 115%.

- 7.3.2. Si la adición del pico amplía la concentración más allá de la curva de calibración, la solución de análisis debe diluirse con una solución en blanco y los resultados calculados deben ajustarse en consecuencia.
- 7.3.3. Si el resultado de la verificación indica una interferencia supresiva, la muestra se debe diluir y volver a analizar.
- 7.3.4. Si la interferencia persiste después de la dilución de la muestra, se debe usar un método alternativo (Método 7195, Coprecipitación o Método 7197, Quelación / Extracción).
- 7.4. Los extractos ácidos que producen recuperaciones de menos del 85% deben volverse a analizar para determinar si la baja recuperación de la espiga se debe a la presencia de un agente reductor residual. Esta determinación se llevará a cabo haciendo primero una alícuota del extracto alcalino (pH 8.0-8.5) usando hidróxido de sodio 1 N y luego realizando una respiración y analizando. Si se obtiene una recuperación de pico del 85-115% en la alícuota alcalina de un extracto ácido que inicialmente se encontró que contiene menos de 5 mg / l de Cr (VI), se puede concluir que el método analítico ha sido verificado.
- 7.5. Analice todos los extractos, todas las muestras analizadas como parte de una petición de exclusión, y todas las muestras que sufren interferencias de la matriz por el método de adiciones estándar (consulte el Método 7000, Sección 8.7).

## **8. CONTROL DE CALIDAD**

- 8.1. Todos los datos de control de calidad deben mantenerse y estar disponibles para una fácil referencia o inspección. Consulte el Capítulo uno para más información.
- 8.2. Diluya las muestras si están más concentradas que el estándar más alto o si caen en la meseta de una curva de calibración.
- 8.3. Emplee un mínimo de un blanco por lote de muestra para determinar si hay contaminación o algún efecto de memoria.

8.4. Verifique la calibración con un estándar de verificación preparado independientemente cada 15 muestras.

8.5. Ejecute una réplica de punto de matriz o una muestra duplicada por cada diez muestras. Una muestra duplicada es una muestra traída a través de toda la preparación de la muestra y el proceso analítico. Consulte el Capítulo Uno para obtener más información sobre picos de matrices y duplicados de puntas matriciales.

8.6. El método de adiciones estándar (ver Método 7000, Sección 8.7) se utilizará para el análisis de todos los extractos, en todos los análisis presentados como parte de una petición de exclusión, y siempre que se analice una nueva matriz de muestra.

## 9. MÉTODO DE RENDIMIENTO

9.1. Los datos que se muestran en la Tabla C.1 se obtuvieron de los registros de los laboratorios estatales y contratistas. Los datos están destinados a mostrar la precisión de la preparación combinada de muestras y el método de análisis.

**Tabla C.1** Método de datos de rendimiento

Matriz de muestra	Método de preparación	Réplicas de laboratorio
Lodos de tratamiento de aguas residuales	Desconocido	0.096, 0.107 µg/g
Sedimento del área de almacenamiento de productos químicos	3060	115, 117 µg/g