



INCIDENCIA DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL PROCESO DE CURTIDO



AUTORES:

- HUGO DANIEL GARCÍA JUÁREZ
- LUIS EDGARDO CRUZ SALINAS
- CARLOS ENRIQUE COACALLA - CASTILLO
- ANNIE CATHERINE NIETO SEGURA

**INCIDENCIA DEL TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES EN EL PROCESO DE CURTIDO**

Autores

HUGO DANIEL GARCÍA JUÁREZ

LUIS EDGARDO CRUZ SALINAS

CARLOS ENRIQUE COACALLA-CASTILLO

ANNIE CATHERINE NIETO SEGURA

Incidencia Del Tratamiento De Aguas Residuales En El Proceso De Curtido



Incidencia Del Tratamiento De Aguas Residuales En El Proceso De Curtido, es una publicación editada por la Universidad Tecnocientífica del Pacífico S.C.

Calle Morelos, 377 Pte. Col. Centro, CP: 63000. Tepic, Nayarit, México.

Tel. (311) 441-3492.

<https://www.editorial-utp.com/>
<https://libros-utp.com/index.php/editorialutp/index>

Registro RENIECYT: 1701267
Derechos Reservados © mayo 2023. Primera Edición digital.

ISBN:

978-607-8759-51-4

DOI:

<https://doi.org/10.58299/UTP.127>

Queda prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización bajo ninguna circunstancia, salvo autorización expresa y por escrito de la Universidad Tecnocientífica del Pacífico S.C.

Este libro es producto de una investigación titulada “Propuesta de una planta de tratamiento de las aguas residuales, para mejorar la recirculación del agua y los tratamientos en cada una de las etapas del proceso de curtido en una empresa curtiembre, en la ciudad de Trujillo”, realizada en la Universidad Nacional de Piura.

Este trabajo fue sometido a revisión por pares externos en modalidad doble ciego (double-blind peer review).

Tepic, Nayarit, México; a 26 de mayo del 2023.

Hugo Daniel García Juárez
Luis Edgardo Cruz Salinas
Carlos Enrique Coacalla-Castillo
Annie Catherine Nieto Segura

Presente:

A través de la presente, me permito saludarle, y al mismo tiempo comunicar a Ud(s) que la Editorial UTP es una editorial indizada, comprometida con publicaciones de alta calidad por lo que su proyecto de investigación científica titulado **“Incidencia del tratamiento de aguas residuales en el proceso de curtido”** ha sido sometido a un riguroso proceso de arbitraje por pares académicos científicos y tecnológicos externos, integrantes del Comité de Producción e Innovación Científica de la Editorial UTP y ajustado de acuerdo a las recomendaciones emitidas por los mismos, con base en lo anterior mencionado se determinó que cumple con los criterios de evaluación del comité editorial de la Universidad Tecnocientífica del Pacífico S.C. por lo que ha sido:

Aceptado para su publicación como libro

con registro ISBN: 978-607-8759-51-4, DOI: <https://doi.org/10.58299/UTP.127> por lo que está disponible en la plataforma de la editorial UTP en el siguiente enlace: <https://libros-utp.com/index.php/editorialutp/catalog>

Agradecemos su preferencia. Enviamos una felicitación especial por ser parte del equipo de investigadores que está transformando con ciencias a Nayarit, México y el Mundo.



ATENTAMENTE

Transformando con Ciencias



Blanca Elizabeth López Rodríguez
Directora de la Editorial UTP
Universidad Tecnocientífica del Pacífico

SPI
Scholarly Publishers Indicator



Incidencia Del Tratamiento De Aguas Residuales En El Proceso De Curtido

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
Resumen.....	6
Abstract.....	7
Introducción	8
Capítulo I	
Nociones generales sobre el agua	9
1.1. ¿Qué es el agua?.....	9
1.1.1 Valor vital del agua	10
1.1.2. Valor económico del agua	12
1.2. Propiedades del agua.....	13
1.2.1. Propiedades físicas	13
1.2.2. Propiedades químicas	14
1.3 Funciones del agua.....	15
1.3.1. Función termorreguladora	15
1.3.2. Función disolvente	16
1.3.3 Función amortiguadora	16
1.3.4. Función de transporte.....	16
1.4. Contaminación del agua.....	17
1.4.1. Causas y consecuencias de la contaminación del agua	17
1.4.2. Medidas para prevenir la contaminación del agua	18
Capítulo II	
Tratamiento y recirculación de aguas residuales	21
2.1. Aguas residuales: definición	21
2.2. Tratamiento de aguas residuales	22
2.3. Niveles de tratamiento de aguas residuales	24

2.3.1. <i>Pretratamiento</i>	24
2.3.2. <i>Nivel primario</i>	25
2.3.3. <i>Nivel secundario</i>	26
2.3.4. <i>Nivel terciario</i>	26
2.4. Tratamiento de aguas residuales: métodos	26
2.4.1. <i>Desinfección por cloración</i>	27
2.4.2. <i>Desinfección por ozonización</i>	28
2.4.3. <i>Desinfección por ultravioleta</i>	28
2.5. Recirculación de aguas residuales	29
 Capítulo III	
La industria de la curtiembre y el proceso de curtido	31
3.1. La curtiembre y su industria	32
3.1.1 <i>Situación de la curtiembre en América Latina</i>	33
3.2. El proceso de curtido	35
3.3. Impacto del proceso del curtido en el medioambiente.....	40
 Capítulo IV	
Propuesta de una planta de tratamiento de aguas residuales para mejorar la recirculación del agua y los tratamientos en cada etapa del proceso de curtido en una empresa de curtiembre	44
 Capítulo V	
Aguas residuales: tratamiento y cuidado ambiental.....	68
5.1. La biorremediación como método para la limpieza de aguas contaminadas.....	68
5.2. Marco normativo para garantizar el cuidado ambiental	72
5.3. Beneficios de las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales	78
Referencias bibliográficas.....	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Técnicas e instrumentos de la investigación	48
Tabla 2. Caracterización de los vertimientos	49
Tabla 3. Análisis granulométrico de las aguas residuales del proceso productivo	50
Tabla 4. Parámetros generales	54
Tabla 5. Sistema de tratamiento	54
Tabla 6. Dimensiones del tanque de eliminación de cromo	56
Tabla 7. Dimensiones del tanque de eliminación de sulfuros	56
Tabla 8. Tanque de homogeneización y trampa de grasas	57
Tabla 9. Dimensiones del tanque homogeneizador y potencia de la bomba	59
Tabla 10. Dimensionamiento de comuna de flotación con inyección de aire	59
Tabla 11. Condiciones y potencia necesaria para la columna de flotación por inyección de aire	61
Tabla 12. Cantidad de reactivos químicos a utilizar en el tanque de coagulación y floculación	62
Tabla 13. Costos de inversión del proyecto	63
Tabla 14. Ingresos anuales de la empresa de curtido Alianza Virgen de la Asunción SCRL	64
Tabla 15. Costos de operación anualizados	64
Tabla 16. Flujo de caja proyectado a cinco años	66
Tabla 17. Ventajas y desventajas de alternativas tecnológicas	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. *Curva granulométrica*

50

Resumen

El presente libro es una importante contribución teórica, además de actualizada, en torno a los problemas más relevantes de nuestros tiempos relacionados con el cuidado del medioambiente y, en específico, con el impacto ambiental ocasionado por la industria de la curtiembre, de modo que, una vez expuesta la problemática, se proporcionan las estrategias más eficientes para el tratamiento de las aguas residuales, producto de la actividad del curtido.

Para ello, esta publicación se ha estructurado en cinco capítulos en los que se exponen los rasgos elementales del agua, su tratamiento y recirculación; las características de la industria de la curtiembre y el proceso de curtido; y aspectos complementarios sobre el cuidado ambiental y el tratado de aguas. A lo anterior se agrega un capítulo concreto dedicado a una investigación realizada en Trujillo donde se brinda una propuesta para el tratado de aguas residuales a fin de optimizar no solo el tratamiento del agua, sino cada una de las fases del proceso de curtido. La investigación concluyó que la compañía estudiada vierte descargas de agua sin ningún tratamiento minucioso; asimismo, se notó que la compañía mostraba niveles altos de concentración de cromo, sulfuros, aceites, grasas y sólidos sedimentales; por último, se señala que la propuesta planteada para el tratamiento de aguas residuales es económicamente viable, dado que la inversión se recuperaría sin inconvenientes en los tres años subsiguientes.

Palabras clave: tratamiento de aguas residuales, curtido, industria de la curtiembre, impacto ambiental

Abstract

This book is an important theoretical and updated contribution on the most relevant problems of our times related to environmental care and, specifically, on the environmental impact caused by the tanning industry, so that, once the problem has been exposed, the most efficient strategies for the treatment of wastewater produced by the tanning industry are provided. In this sense, the book is structured in six five chapters where the basic features of water, water treatment and recirculation, the tanning industry and the tanning process, and complementary aspects on environmental care and water treatment are presented. In addition, a specific chapter is dedicated to the research carried out in Trujillo, where a proposal for wastewater treatment is provided in order to optimize not only water treatment, but also each of the phases of the tanning process. The research concluded that the company studied discharges water without any thorough treatment; it was also noted that the company showed high levels of chromium concentration, sulfides, oils and fats, and sediment solids; finally, it is pointed out that the proposal for wastewater treatment is economically viable since the investment would be recovered without inconvenience in the following three years.

Key words: wastewater treatment, tanning, tannery industry, environmental impact

Introducción

Con el paso del tiempo y los avances tecnológicos e industriales, el vínculo entre el agua y el ser humano se ha ido convirtiendo en un vínculo abusivo, nocivo y excesivamente contradictorio. Es un hecho insólito que las acciones del hombre estén devastando el planeta y sus recursos. La violencia contra las especies naturales y el medioambiente ha provocado que, lentamente, los recursos se agoten.

Por mucho tiempo, la sociedad ha vivido en un contexto de consumo excesivo sin tener consciencia seria de la preservación y cuidado del ambiente. Hoy en día, el mundo está atravesando una situación crítica y los debates actuales se centran, fundamentalmente, en las estrategias posibles para revertir todo el perjuicio que el ser humano ha ocasionado. En ese marco, el desabastecimiento mundial del agua es un hecho inaplazable.

Entendido como el indicador óptimo del nivel de progreso socioeconómico de una nación, el agua es la base sobre la que se sustenta la vida en el planeta. Su preservación y calidad se encuentran relacionadas prácticamente con todas las actividades económicas y sociales, en concreto a la salud de la ciudadanía. Se piensa que el 80 % de las enfermedades del mundo tienen raíz en asuntos vinculados con el recurso hídrico.

La deforestación, la polución de los ríos, bosques y suelos, y el manejo de desechos, el empleo desproporcionado del agua, la poca concientización, el exceso de infraestructura y el manejo de aguas residuales se han convertido en problemas esenciales que perjudican la calidad del recurso hídrico, además de los conflictos surgidos por tomar poder de aquello que es, por definición, un derecho universal.

En ese sentido, el presente trabajo tiene por objetivo realizar un estudio detallado acerca de la industria de la curtiembre y sus procesos internos de producción, pero, más concretamente, sobre el impacto ambiental ocasionado por la elaboración de curtido. A la par de tomar conciencia de los efectos nocivos provocados por la mencionada industria, resulta decisivo proponer aportes relativos a las estrategias, métodos y procedimientos utilizados para la remediación y el tratamiento de las aguas residuales producto de la curtiembre.

Capítulo I

Nociones generales sobre el agua

La presencia del agua en la vida del ser humano es asombrosa. Durante el período de gestación y los meses iniciales de la vida, el feto permanece sumergido en agua. Que entre un 65 % y 75 % del cuerpo humano está compuesto por agua es un dato que a cada uno le es inculcado desde los primeros años. El agua es el recurso que sirve para satisfacer la sed, para la higiene personal, así como para preparar los alimentos. Se ve, pues, que el agua se encuentra relacionada fundamentalmente no solo con nuestra vida diaria, sino con las condiciones de posibilidad de supervivencia de la vida en la Tierra.

Desde el inicio de su existencia, para el ser humano el agua ha representado un elemento con el cual mantiene una relación de estrecha dependencia. En su sentido más hondo, el agua porta una connotación puramente vital: «El agua es vida» reza un popular *slogan* que resuena como un eco para cualquier individuo del planeta. Asimismo, como recurso natural, el agua constituye un elemento no solo único, sino imprescindible, ya que es el cimiento sobre el que se desarrollan la vida, las sociedades del mundo y las economías.

A partir de lo dicho, en el presente capítulo se aborda a profundidad los aspectos esenciales del agua desde cuatro apartados. En el primero se exploran la definición y los atributos más notables del agua. El segundo apartado se centra en explicar las propiedades físicas y químicas de este elemento. En el tercer apartado se exponen las funciones más significativas del agua en el organismo de los seres vivos. Finalmente, el cuarto apartado atiende una de las cuestiones más controversiales de la actualidad: la contaminación del agua, cuáles son sus causas y consecuencias, a la par de las medidas de prevención centrales para afrontar este imperioso asunto.

1.1. ¿Qué es el agua?

El agua es un objeto primordial de análisis y debate extensible a diversas disciplinas que comprenden tanto las ciencias físicas como las sociales, en un espectro amplísimo. Con el paso del tiempo, el agua va cobrando cada vez más relevancia en el ámbito académico y de políticas públicas. Las perspectivas sociales que estudian el agua desde enfoques culturalistas, ecológicos

y políticos han pretendido fijar conceptos, categorías y marcos explicativos que expliquen la interrelación de la complejidad de los fenómenos sociales vinculados al agua.

En primera instancia, el agua es un componente sofisticado y cautivador que de manera continua nos reitera tanto la dependencia como la fragilidad de la existencia. El ser humano es incapaz de vivir sin agua, ya que es su fuente de vitalidad, bienestar y goce; no obstante, la presencia del agua también puede resultar conflictiva e inquietante. A la par que en los medios de comunicación masiva se difunden imágenes de playas paradisíacas como destinos ideales para los turistas, las noticias pavorosas relativas al cambio climático global aluden a las crisis hidrosociales como inundaciones, sequías, incremento del nivel del mar, deshielo de glaciares y polución de recursos hídricos (Camargo & Camacho, 2018).

En ciertas partes del mundo —por lo general, en países situados en la periferia del progreso de las grandes potencias económicas—, una actividad cotidiana de las personas es la búsqueda de agua potable durante horas para poder abastecer las necesidades del hogar; también se dan los casos de personas que esperan la restitución del servicio de agua tras un largo tiempo (días, semanas) de reiteradas suspensiones. Esa es la cara opuesta, decepcionante y lamentable de las implicancias del agua en la vida, cuya raíz es propiamente estructural. En ocasiones más críticas, se llevan a cabo protestas en pro de una distribución equitativa de agua de calidad apta para el consumo, o demandas en contra de la privatización, la usurpación y el monopolio de los recursos hídricos.

Dicho de otro modo, como explican Camargo y Camacho (2018), es un componente decisivo de la experiencia general del ser humano. En ese marco, gran parte de la historia social del agua podría entenderse como la historia de los distintos acuerdos sociopolíticos, infraestructurales y culturales que se han instalado para poder coexistir con este recurso en el contexto de los retos que suponen su escasez, exceso y calidad.

1.1.1 Valor vital del agua

La constitución del agua a lo largo de la historia fue un factor central que dio pie al desarrollo de la vida. Actualmente, se sabe que los átomos que conforman la molécula de agua (H₂O) aparecieron en diferentes períodos de la historia. El hidrógeno apareció casi al inicio del todo, tras el Big Bang (hace unos 15 000 millones de años), con el helio y el tritio; al oxígeno, sin embargo, le tomó mucho más tiempo para surgir. Pontón (2008) menciona que fue en el centro de las estrellas

donde tres núcleos de uno de los átomos más livianos, el helio (He), se fusionaron para constituir el carbono, a partir de la resonancia nuclear de este.

Posterior al surgimiento del carbono, y gracias a la fusión (de escasas probabilidades) de otro núcleo de helio, apareció el componente oxígeno; luego surgieron otros elementos de mayor peso. Desde el centro de las estrellas, donde todo ocurría, aquellos elementos surgidos fueron despedidos al espacio exterior cuando dichas estrellas se transformaron en supernovas. La Tierra, cuya edad ronda los 4600 millones de años, adoptó aquellos elementos (carbono, oxígeno, hierro, etc.) que se fueron constituyendo en el fogón de tres generaciones de estrellas y, así, el agua, compuesto de oxígeno e hidrógeno, propició el surgimiento y desarrollo de la vida hace aproximadamente unos 4000 millones de años (Pontón, 2008).

El agua es un elemento vital. Debido a sus características físicas y químicas, sus moléculas son excepcionales, tanto que la vida en la Tierra se desarrolla gracias a sus propiedades. El cuerpo humano está en gran parte constituido de agua, la cual, a su vez, interviene en las reacciones químicas propias del organismo que determinan las respuestas biológicas, la reproducción y la subsistencia de la especie.

Desde la perspectiva de la salud, el consumo del agua en cantidad y calidad apropiadas garantiza el justo funcionamiento de los procesos fisiológicos del cuerpo humano. López *et al.* (2021) indican que un individuo que no bebe en suficientes cantidades puede sufrir diversos males, como dolores de cabeza (migraña), deterioro de las articulaciones (artritis) y complicaciones en los riñones (insuficiencia renal). Esta última enfermedad es factor de muchas muertes, ya que, por lo común, no se consigue saber cómo o cuánto consumir (2 o 2.5 de litros diarios para personas adultas). Desde el enfoque de la higiene y el saneamiento, el agua limpia resulta imprescindible para prever múltiples padecimientos, principalmente infecciosos. La higiene del cuerpo, las cosas y los alimentos es tan sustancial como la propia vida.

Sin ir más atrás en el tiempo, debido a la COVID-19, quedó asentado en el imaginario popular una frase tan difundida como «la higiene de manos salva vidas». La Organización Panamericana de la Salud [OPS] (2021) señaló que el aseo de las manos constituye una de las prácticas más eficaces para disminuir la propagación de patógenos y prevenir infracciones. Asimismo, es importante subrayar que la disposición de agua limpia para el consumo es clave, puesto que, actualmente, en

países en vías de desarrollo, aproximadamente mil niños pierden la vida a causa de enfermedades diarreicas vinculadas a la falta de higiene o al consumo de agua contaminada (López *et al.*, 2021).

1.1.2. Valor económico del agua

El agua es un elemento que porta un significativo valor económico a las sociedades. Por un lado, el agua satisface las necesidades esenciales del individuo, a la par que representa un recurso indispensable para la producción de bienes y servicios. De tal suerte, el valor del agua está supeditado a lo que las personas estén prestas a realizar para obtenerla, bien sea recolectarla de un río hasta erigir un dique o un acueducto para transportarla a grandes distancias. A su vez, el agua es vista como un bien limitado, por lo que el ser humano estará inclinado a llevar a cabo todos los sacrificios para obtenerla.

Piénsese, por ejemplo, en el agua dulce, cuyas fuentes se encuentran en lagos, humedales o ríos. Dichos ecosistemas de agua terrestre suministran el agua que consumimos a diario, así como aquella que se necesita para la alimentación, la industria y la obtención de energía. El agua dulce, como todo recurso, posee un valor económico. La escuela decimonónica de la económica ofrecía una teoría del valor «trabajo», esto es, que el valor de cambio de diferentes bienes estaba supeditado a la cantidad de horas de trabajo que había requerido su elaboración. En cambio, para dicha escuela, la «utilidad» no era un factor trascendente que determinase el valor de los bienes. Pontón (2008) ilustra esta disyuntiva con un ejemplo claro: ¿por qué el diamante tiene mucho más valor que el agua, pese a que su utilidad sea menor? El error en este planteamiento clásico consistía en que se comparaba la utilidad total del diamante con la utilidad total del agua. La vía adecuada de análisis tendría que haber sido la comparación de las utilidades marginales de ambos: debido a que existe mucha más agua en relación con la cantidad de diamante, resulta natural que la unidad de agua tenga menos valor que una unidad de diamante. Ahora bien, si el escenario es un árido desierto, allí el valor de unidad de agua sería mayor al de una unidad de diamante.

En la actualidad, el valor económico del agua está sujeto a las dinámicas neoliberales de la economía contemporánea. La política neoliberal está relacionada con el concepto de privatización. La región latinoamericana ha sido escenario de un conjunto de reformas constitucionales y modificaciones en leyes relativas a la propiedad de la tierra y el agua que posibilitan la certeza jurídica en las inversiones privadas. En este contexto, Chile sirvió de guía para establecer al agua

como un bien económico, distinguir la propiedad del agua del dominio de la tierra y propiciar un mercado para pactar los derechos dirigidos a los particulares (Ávila-García, 2015). Las consecuencias de estas políticas fueron dramáticas, principalmente para las zonas campesinas e indígenas, por haber supuesto un perjuicio contra sus derechos ancestrales y el asentamiento del monopolio del agua por parte de los grupos económicos más modernos.

En definitiva, la neoliberalización del agua es producto de una táctica que promueve su privatización y transformación en mercancía, al asumir el estatuto de bien económico que puede negociarse en el mercado de derechos. Estas nuevas dinámicas pueden conducir al monopolio del agua y, por consiguiente, a la exclusión de aquellos grupos o actores sin el capital necesario para adquirirla.

1.2. Propiedades del agua

El agua no solo es la biomolécula más cuantiosa, sino la más fundamental. La vida, tal como se conoce, se despliega en toda su potencia en un entorno acuoso. Aun los organismos no acuáticos se desarrollan en un entorno sustancialmente hídrico. El agua es un elemento tan fundamental para la vida que todos los proyectos relacionados con la búsqueda de vida en el espacio se encuentran estrechamente vinculados con la presencia de agua en otros planetas.

1.2.1. Propiedades físicas

En su estado líquido, el agua pura destaca en tres atributos: es incolora, insípida e inodora. No obstante, en condiciones específicas de iluminación del entorno, el agua asume matices de color azul y, en otras ocasiones, puede incluso adoptar tonalidades verdosas. La disciplina científica fijó la escala termométrica centígrada tomando como base sus propiedades físicas. Esta escala señala que el punto de ebullición del agua ocurre a una temperatura de cien grados Celsius (100 °C) (que es cuando la presión atmosférica es de 1 atm), lo que es lo mismo que 760 mm de mercurio. El calor de vaporización del agua se eleva a 539 calorías por gramo a 100 °C.

Las características físicas del agua son múltiples, por ello, a continuación, se explican a profundidad otras propiedades físicas del agua:

- El agua es un elemento que cuesta comprimir, debido a que sus moléculas poseen un elevado grado de cohesión, lo cual mantiene una resistente unión entre ellas.

- El agua se adhiere a todo tipo de superficie.
- Cuando está en estado totalmente puro, el agua posee una disminuida capacidad de conductividad eléctrica.
- Sin embargo, cuando no se encuentra en un estado totalmente puro, el agua puede llevar sales diluidas y demás elementos que la convierten en un sistema de conducción eléctrica bastante óptimo.
- El agua puede transformarse en termorregulador (regulador de temperatura), a causa de su capacidad de absorción calorífica, por ejemplo, en el caso de la temperatura corporal, si el cuerpo humano se calienta en demasía, este pierde agua mediante la transpiración y, en consecuencia, la evaporación de esos sudores en la superficie epidérmica disipa el calor corporal. Entonces, al absorber las temperaturas, el agua posee la capacidad de enfriarse con lentitud, lo que es vital para la alimentación de los seres vivos: animales, humanos y vegetales (Tirado, 2020).

1.2.2. Propiedades químicas

La famosa fórmula química del agua es H₂O, que significa la unión de un átomo de oxígeno con dos de hidrógeno. De un lado, la molécula de agua porta carga eléctrica positiva, mientras que de la otra porta carga negativa. Dado que la ley de cargas explica que las cargas de valores opuestos se atraen entre sí, las moléculas de agua propenden a ligarse con otras. Las características químicas del agua son variadas, de modo que, a continuación, se enlista con detalle las más importantes (Tirado, 2020):

- El agua es químicamente neutra, con un pH de 7, si bien en oportunidades concretas puede volverse levemente ácido con un nivel de pH entre 6.7 y 6.5.
- Está constituida por un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno.
- En circunstancias comunes de presión y temperatura, el agua se encuentra en su estado líquido.
- Por un lado, el punto de fusión del agua es de 0 °C cuando está congelada. Por otro lado, el punto de ebullición es de 100 °C cuando está hirviendo.

- El peso atómico del agua es de 18: el peso atómico del oxígeno es de 16, mientras que entre los dos átomos de hidrógeno el peso es de 2 (cada hidrógeno tiene un peso atómico de 1).
- La densidad del agua es 1. La densidad consiste en la relación entre la masa y el volumen de una determinada sustancia, o bien se trata de la relación entre la masa de una sustancia y la masa de un volumen idéntico de otra sustancia tomada como modelo. Por lo general, el modelo es la propia agua. Así, el que la densidad sea 1, quiere decir que la masa es 1 gramo y su volumen es 1 ml o cm^3 .
- El agua es conocida sobre todo como «disolvente universal», puesto que posee el atributo por el cual es capaz de disolver una gran cantidad de sustancias.

1.3 Funciones del agua

1.3.1. Función termorreguladora

La función termorreguladora obedece a su alto calor específico y a su alto calor de vaporización que provoca que el agua sea un material ideal para preservar una temperatura constante, absorbiendo el excedente de calor o transfiriendo energía en caso de que sea necesario.

Un número considerable de los eventos fisiológicos están condicionados directamente por la temperatura. De acuerdo con Lifshitz (2007), la actividad enzimática, productora de varias de las funciones del organismo, se realiza de manera más apropiada a una determinada temperatura (idónea), por encima y por debajo de la cual se perturba negativamente la eficiencia de las reacciones bioquímicas. Por debajo de la temperatura idónea, la cinética molecular es insuficiente para provocar un número crítico de interacciones entre enzima y sustrato; por encima de ella, en cambio, las enzimas —en última instancia, proteínas— inician su desnaturalización a causa del calor.

Por este motivo, los organismos destinan una considerable cantidad de energía en conservar la temperatura dentro de márgenes bastante estrechos. Los organismos ectotérmicos (poiquilotérmicos), por ejemplo, debido a que no gozan de un sistema interno de termorregulación, adoptan conductas que los conducen a buscar temperaturas que vayan en consonancia con sus necesidades metabólicas. La migración de las mariposas monarca desde Canadá hasta el santuario ubicado en las fronteras de México, en Michoacán, no solo por motivos de alimentación, tiene que

ver también, desde luego, con la búsqueda de una más adecuada temperatura del ambiente, ya que, si no partiesen de Canadá, perderían la vida. Esta actitud es conocida como termorregulación conductual, y permite entender por qué los animales asumen posturas específicas con relación al sol (Lifshitz, 2007).

1.3.2. Función disolvente

No existe líquido más capaz para disolver sustancias que el agua. El agua es el disolvente universal. Esta propiedad disolvente obedece a su capacidad para extender puentes de hidrógeno con otras sustancias, puesto que estas son disueltas cuando interactúan con las moléculas polares del agua.

Como indica Castillo-Arteaga (2022), a causa de los puentes de hidrógeno presentes en el agua, esta puede envolver las moléculas de una enorme cantidad de sustancias iónicas covalente polar y, en menor medida, sustancias covalentes no polar, motivo por el cual, y no literalmente, el agua ha adoptado el estatuto de disolvente universal. Tiene la capacidad de formar combinaciones homogéneas, donde aquello que fue disuelto en el agua adopta una magnitud atómica o molecular imposible de ser percibida por el ojo humano; en otras palabras, se forman soluciones.

1.3.3 Función amortiguadora

A causa de su alta cohesión molecular, el agua funciona como lubricante entre estructuras susceptibles a la fricción e impide el roce. En efecto, en el caso de los animales vertebrados, existen en las articulaciones pequeñas bolsas rellenas de líquido sinovial, lo que previene del rozamiento de los huesos.

El líquido sinovial opera como un amortiguador del roce celular al esparcirse en los espacios intercelulares, y como elemento lubricante impide el rozamiento entre las superficies articulares. El fluido sinovial puede actuar de dos maneras ante el requerimiento funcional: en caso de tensiones de disminuida frecuencia, se comporta como un fluido espeso; en caso de elevadas cargas, actúa como un sólido elástico, preservando así la integridad estructural (Gálvez, 2005).

1.3.4. Función de transporte

El papel del agua como transporte brinda la posibilidad de que se incorporen nutrientes procedentes de la digestión que se reparten por la sangre, la linfa y la savia. Asimismo, favorece

la eliminación de desechos o toxinas mediante la orina. Así, pues, el agua propicia la nutrición y la purificación de los organismos de modo que puedan seguir funcionando de manera apropiada. De acuerdo con Vidaurreta (2016), el agua forma parte central del cuerpo y, en tanto agente de transporte, moviliza los nutrientes, la digestión y el metabolismo.

1.4. Contaminación del agua

Bien sea por arrastre, o bien porque se derraman sustancias, el agua es fácilmente contaminable y, por consiguiente, su calidad se ve perjudicada y las aplicaciones o usos se transforman.

1.4.1. Causas y consecuencias de la contaminación del agua

1.4.1.1. Actividades domésticas.

Una de las causas de la polución del agua tiene que ver con las actividades domésticas, por ejemplo, el uso de productos no biodegradables, sustancias dañinas vertidas en desagües, residuos sólidos (como los plásticos, por ejemplo) que acaban desembocando en ríos u océanos.

Más a detalle, las aguas residuales domésticas aluden a aquellas empleadas con objetivos higiénicos. Son, fundamentalmente, residuos humanos que acaban en las redes de drenaje mediante descargas de plantas hidráulicas del inmueble, así como en residuos generados en centros comerciales, públicos y semejantes. En adición, es sabido que las prácticas y consecuencias en que el individuo introduce sustancias contaminantes, formas de energía o desencadena condiciones en el agua directa o indirectamente suponen modificaciones nocivas en su calidad vinculada a los empleos posteriores o a su función ecológica (Osorio-Rivera *et al.*, 2021). El agua residual doméstica se encuentra constituida de elementos físicos, químicos y biológicos: se trata de una combinación de sustancias orgánicas e inorgánicas, suspendidas o disueltas.

1.4.1.2. Actividades agropecuarias.

Por el empleo de insecticidas, plaguicidas, fertilizantes, entre otros, se origina una delicada contaminación de enormes cantidades de agua dulce. La contaminación del agua por plaguicidas ocurre concretamente en el momento que son arrastrados por el agua desde los terrenos de cultivo hasta los ríos y océanos, donde se incorporan a las cadenas trópicas marinas, ocasionando la muerte de diversos seres vivos fundamentales en el balance de determinados ecosistemas. Los compuestos

químicos de que están hechos los plaguicidas o insecticidas han ocasionado la muerte de especies marinas, lo cual, a su vez, pone en riesgo la vida de los consumidores.

La contaminación del agua por plaguicida, y las múltiples maneras de contaminación que ocurren en zonas de cultivo, se demuestra en distintos factores: el vertimiento de residuos líquidos de los recipientes de productos químicos, empleos orientados al terreno para desinfección, aplicaciones para remover la maleza, aplicaciones de insecticidas y fungicidas directo a la semilla en su etapa inicial para prevenir futuros ataques de plagas y enfermedades, donde los canales de regadío son la primera fuente y, como segunda fuente, debido a la filtración (Castillo *et al.*, 2020).

1.4.1.3. Actividades industriales.

El progreso industrial de una nación apunta a la búsqueda de la consecución de metas sociales, como la generación de puestos de trabajo, la erradicación de la pobreza, la aplicación de estándares laborales, amplio acceso a la educación y la salud, etc. No obstante, simultáneamente, este progreso puede impactar negativamente en el medioambiente, en la medida en que ocasiona el cambio climático, el menoscabo de los recursos naturales y, por supuesto, la polución del aire y el agua (Sotomayor & Power, 2019). Actualmente, la industria es una seria fuente de contaminación de los recursos hídricos, puesto que genera sustancias contaminantes que son excesivamente nocivas para el ser humano y para el medioambiente, además de un gran número de instalaciones de carácter industrial de agua dulce para verter los residuos de la planta en ríos, lagos o mares.

A diferencia de otros sectores, la industria emplea hasta cierto punto no mucha proporción de agua a escala mundial, aproximadamente, el 20 % de la extracción íntegra de agua dulce. Con todo, la cantidad de agua empleada cada año por la industria experimenta un incremento, de modo que el sector pasará a competir con mucha más fiereza por recursos hídricos escasos a la par de los reclamos relativos al progreso urbano y la agricultura.

1.4.2. Medidas para prevenir la contaminación del agua

En primer lugar, entendiendo que la deforestación es una actividad nociva para la correcta preservación del agua, resulta central acabar con ella. Es sabido que los bosques son uno de los más importantes sumideros de agua, no solo a nivel atmosférico, sino también del subsuelo. En ese sentido, a mayor masa boscosa, más cantidades de agua dulce existirán alrededor. En adición,

los árboles funcionan como purificadores de distintos contaminantes que son vertidos en un ecosistema e intervienen para que no terminen en el agua.

En segundo lugar, las actividades industriales han provocado que el medioambiente se encuentre sumido en un gran estrés. De este modo, los conflictos relativos a espacios contaminados adoptan una preponderancia cada vez mayor en diversos países. En este marco, el desarrollo sostenible se ha establecido como un asunto preeminente para los líderes políticos del planeta. La necesidad de solucionar estos conflictos ambientales ha conducido al despliegue de nuevas tecnologías enfocadas en la desintoxicación y el acabamiento de las sustancias contaminantes.

En medio de ese vasto abanico de tecnologías con el potencial de alcanzar el objetivo de la sostenibilidad, la biodegradación, por ejemplo, definida como la implementación de microorganismos, hongos, plantas o las enzimas procedentes de ellos para la recuperación del medioambiente, se muestra como una alternativa valiosa. Garzón *et al.* (2017) indican que la biodegradación opera mediante las intervenciones de la diversidad biológica para los objetivos de aplacamiento (y en tanto sea viable, la erradicación) de los impactos perjudiciales provocados por las sustancias ambientales en un espacio determinado.

Por último, el apropiado tratamiento de las aguas residuales es una tarea esencial al afrontar la contaminación hídrica. Las aguas residuales generan una elevada contaminación hídrica cuando son derramadas en ríos y océanos sin haber recibido un tratamiento adecuado. Un consumo positivo del agua, el uso disminuido de productos químicos y unas apropiadas infraestructuras de purificación del agua son los modos más idóneos de reducir y optimizar el tratamiento de las aguas residuales.

Hoy en día, existen múltiples tecnologías notablemente mecanizadas para el tratamiento de aguas residuales procedentes de las industrias, por ejemplo, a partir del pretratamiento del agua residual se busca disminuir los sólidos en suspensión, sedimentables, flotantes y coloidales; de igual manera con respecto al pretratamiento industrial, ya sea con el uso de rejillas, desarenadores, microfiltros, tamices, o tratamientos alternos como lecho bacteriano, lodos activados, filtros verdes, etc. (Arias-Lafargue *et al.*, 2021). Entre los tratamientos más innovadores se encuentran la ósmosis inversa, destilación, coagulación, adsorción, entre otros. Estos últimos ejemplos de tratado

implican costos altos, ya que exigen un elevado consumo energético, así como suponen elevados costos de construcción, ejecución y mantenimiento.

Capítulo II

Tratamiento y recirculación de aguas residuales

El agua residual del planeta es un preciado recurso del cual es posible rescatar diversos elementos, tales como agua limpia, energía y nutrientes. Considerando esta posibilidad, en la actualidad, se impulsan serios proyectos que apuntan a una gestión inteligente de las aguas residuales, por medio de, por ejemplo, el reúso y el restablecimiento de recursos. Por ello, son estudiados constantemente aquellos proyectos de aguas residuales de todas partes del planeta que han tenido un impacto positivo para la población, el medioambiente y las economías, tanto a corto como a largo plazo.

La pandemia por la COVID-19 ha puesto en discusión, una vez más, la importancia de las políticas de prevención y cuidado de la salud humana. En esa línea, dedicar todos los esfuerzos posibles a las aguas residuales, así como a otras infraestructuras de saneamiento, resulta decisivo para conseguir beneficios de salud pública, optimizar el medioambiente y la calidad de vida de las personas. Todo ello subraya, desde luego, el enorme desafío que supone la correcta administración de los servicios de agua, saneamiento e higiene.

El presente capítulo está centrado en explicar a detalle el asunto del tratamiento de las aguas residuales desde cinco apartados. En el primer apartado se expone a detalle las nociones clave en torno al concepto de aguas residuales, prestando especial énfasis en sus características fundamentales. En el segundo se da pie al tema central de este capítulo: el tratamiento de las aguas residuales. En el tercer apartado se abordan los niveles de tratamiento de las aguas residuales: el pretratamiento, el primario, el secundario y el terciario, ahondando en las particularidades de cada uno. En cuarto lugar, son explicados tres métodos esenciales empleados en el tratamiento de aguas residuales: la desinfección por cloración, la desinfección por ozonización y la desinfección por UV. Finalmente, en la última sección, se brinda un panorama general acerca de los aspectos relativos a la recirculación de las aguas residuales y su importancia.

2.1. Aguas residuales: definición

Las aguas residuales son aguas cargadas de impurezas derivadas de vertidos de diversos orígenes antropogénicos, - domésticos e industriales, esencialmente (Organización de las Naciones Unidas

para la Educación, la Ciencia y la Cultura [Unesco], 2017). De este modo, muchas aguas residuales pueden tener en su contenido sustancias contaminantes generadas en desechos urbanos o industriales. Por lo regular, las aguas residuales urbanas se encauzan por las redes de drenaje y son tratadas en plantas especiales donde se trabaja en su purificación antes de su vertido, pese a que esto no ocurre en todas partes.

Ciertamente, la composición de las aguas residuales es bastante heterogénea, y varía en virtud de los múltiples factores que la afectan. Entre estos factores están, por mencionar algunos, el consumo promedio de agua por ciudadano y el consumo diario, que tiene impacto en su concentración, así como las prácticas alimenticias de la ciudadanía, que tiene efecto en su composición química.

A grandes rasgos, las aguas residuales están compuestas, poco más o menos, de un 99.9 % de agua y el remanente lo constituyen sustancias sólidas. Los residuos sólidos se encuentran constituidos por materia mineral y materia orgánica. Por un lado, la materia mineral deriva de los subproductos excluidos en el curso del día y de la calidad de las aguas de aprovisionamiento. Por otro lado, la materia orgánica deriva estrictamente de las prácticas antropogénicas y está conformada por materia carbonácea, proteínas y grasas (Rojas, 2002).

Siguiendo con Rojas (2002), las proteínas componen del 40 al 45 % de la materia orgánica, son representadas por los aminoácidos y suministran buena parte de los nutrientes bacterianos. Alrededor de un 60 % de las proteínas están diluidas en las aguas residuales y un 30 % en la parte sedimentable. La materia carbonácea se encuentra representada por los hidratos de carbono, los cuales, al mismo tiempo, están conformados por los almidones, azúcares y la celulosa, de dicha materia carbonácea. Los porcentajes de hidratos de carbono que están diluidos y sedimentables son similares a los de proteínas. Las grasas presentes en los ácidos grasos no tienden a ser solubles, de manera que su degradación es mucho más lenta.

2.2. Tratamiento de aguas residuales

El recurso hídrico se emplea en gran parte de las actividades humanas, sean estas domésticas o industriales. En gran medida, se utiliza agua potable, la cual, una vez acabado su uso, se transforma en agua residual. En otras palabras, el nuevo contenido de estas aguas son sustancias contaminantes o compuestos con la capacidad de dañar a las especies de un determinado entorno natural.

Ahora bien, para las aguas residuales se necesita de un proceso de tratamiento o de purificación para limpiarlas antes de ser vertidas en el entorno natural de ríos, mares, lagos, entre otros. Este proceso de depuración es producto de un sistema de tratamiento de aguas sofisticado, profundo y eficiente, en virtud de la contaminación encontrada y de las cualidades del entorno natural. Este tratamiento tiene que obedecer a esas exigencias de calidad, y el Estado supervisa dicho proceso mediante las legislaciones.

La polución del agua ocurre a partir de residuos, fertilizantes y distintos químicos que, derramados en las aguas dulces, acaban por dañar las aguas saladas. Entre los múltiples impactos ocasionados al medioambiente a causa de la ausencia de un tratamiento de aguas residuales, se tienen los siguientes (Ceja, 2019):

- Toxicidad: perjudica de manera directa a la flora y fauna de los organismos que albergan el agua corrompida, así como a quienes la beben.
- Infecciones: distintos organismos patógenos son transferidos por medio del agua, que perjudican a los cuerpos terrestres y marinos con quienes entablan contacto.
- Contaminación térmica de las reservas que contienen el agua: los líquidos industriales pueden incrementar la temperatura de las zonas donde son desechados.
- Malos olores: las bacterias y componentes presentes en aguas residuales originan gases, producto de la degeneración.

El debate en el marco internacional indica que los impactos ambientales son severos y complicadamente reversibles en un plazo corto. En China, el 80 % de sus ríos tienen un nivel de contaminación tan elevado que han dejado de ser idóneos para la utilización del hombre. En Estados Unidos, los líderes han avisado a los ciudadanos y turistas que la pesca y el baño recreativo en dos de cada cinco ríos no pueden realizarse. De este modo, la ciudadanía que entabla contacto directo o indirecto con los efluentes se ve perjudicada por la polución hídrica.

Globalmente, China es el país que emplea más «aguas crudas» (sin tratamiento) en actividades de irrigación. Estas aguas transportan un gran número de organismos patógenos, metales pesados y residuos de artículos de higiene individual que ocasionan dificultades de salud, así como de antibióticos, que colaboran en el incremento de la resistencia de las bacterias. A grandes rasgos,

las aguas no tratadas pueden ocasionar enfermedades humanas tales como el cólera, disentería, fiebre tifoidea, entre otros (Ceja, 2019).

2.3. Niveles de tratamiento de aguas residuales

El agua que ingresa en las plantas de tratamiento es sometida a procesos de carácter físico, químico y biológico con miras a expulsar las sustancias contaminantes contenidas en los efluentes. Por lo general, se dividen en cuatro niveles de tratamiento, a saber: preliminar, primario, secundario y terciario.

En adición, en las plantas de tratamiento ocurren otros procesos relacionados con los subproductos adquiridos en los distintos tratamientos. Algunos procesos, como el vinculado al tratamiento y la gestión del fango, tienen una gran relevancia, debido a que su gestión tiene cierto grado de sofisticación y es de enorme interés.

2.3.1. Pretratamiento

La fase inicial de pretratamiento tiene una enorme relevancia de cara al apropiado funcionamiento de las plantas de tratamiento o de depuración. En dicha etapa se llevan a cabo diversas operaciones que buscan eliminar residuos como (Mateo *et al.*, 2021):

- Los sólidos de desbaste (toallitas, residuos sanitarios, hisopos, entre otros) originan problemas no solo en las depuradoras, sino también en los propios colectores, pudiendo ocasionar serios atascos.
- Las arenas: comprendidas dentro de esta categoría de «arenas» se encuentran diversos componentes inorgánicos (arena, grava, cenizas, asfalto, hormigón, etc.) y orgánicos. La práctica general señala que los sistemas desarenadores recobran el 95 % de las arenas por encima de las 200 micra y, por ende, excluyen una gran cantidad de los potenciales problemas operativos de las plantas. No obstante, en épocas lluviosas con mayor caudal de entrada e incremento de la cuantía de arenas, se aumenta su paso a los niveles posteriores de tratamiento y se originan impases como abrasión en los equipamientos de la línea de fangos o que perjudican al rendimiento de los procesos biológicos.

- Las grasas son el producto de las actividades de elaboración de alimentos, a la vez en procesos industriales y domésticos, y es una consternación que tiene cada vez más importancia para los municipios y los operadores de las plantas de tratamiento, a causa de su orientación a acarrear severas obstrucciones en las tuberías y alcantarillado. Ya en las depuradoras, las grasas y aceites que no sean expulsados en el proceso de desengrasado del pretratamiento es posible que provoquen atascamientos y demás problemas en sus infraestructuras.

2.3.2. Nivel primario

La etapa primaria del tratamiento es aquella donde se expulsan los sólidos en suspensión contenidos en el agua residual. Los primordiales procesos fisicoquímicos susceptibles de ser englobados en la etapa primaria del tratamiento son los que siguen: sedimentación, flotación y coagulación (Acuatécnica, 2018).

- **Sedimentación:** es un proceso físico de exclusión por gravedad que permite que una partícula más compacta que el agua adopte un recorrido descendente, posándose en la base del sedimentador. Está en relación con la densidad del líquido, de la dimensión, del peso concreto y de la morfología de las partículas.
- **Flotación:** es un proceso físico sustentado en la disimilitud de densidades. La flotación brinda la posibilidad de discriminar la materia sólida o líquida con menos densidad respecto de la del fluido, por ascenso de aquella hacia la superficie del fluido. Se originan algunas burbujas de gas, que habrán de vincularse con las partículas contenidas en el efluente y serán subidas hacia la parte superior para poder ser retiradas del sistema.
- **Coagulación:** Muchas veces, una sección de la materia en suspensión está constituida por partículas bastante diminutas, lo que compone una suspensión coloidal, las cuales tienden a ser muy estables en diversas situaciones a causa de interacciones eléctricas entre las partículas. Por ende, manifiestan una rapidez de sedimentación excesivamente pausada.

2.3.3. Nivel secundario

La disminución de los compuestos orgánicos contenidos en el agua residual, preparada con antelación por medio del tratamiento de nivel primario, se lleva a cabo estrictamente por procesos biológicos. Este proceso disminuye o transforma la materia orgánica finalmente separada o diluida, en sólidos sedimentables floculentos susceptibles de ser divididos por sedimentación en tanques de decantación. Rojas (2002) explica que los procesos biológicos más empleados son los lodos activados y filtros percoladores. Son múltiples las modificaciones de estos procedimientos que se emplean para afrontar los requisitos concretos de cada tratamiento. También, dentro de esta categoría, están englobadas las lagunas de estabilización y aeradas, a la vez que el tratado biológico utilizando oxígeno puro y el tratado anaeróbico.

2.3.4. Nivel terciario

En esta etapa la meta consiste en complementar los procedimientos previamente señalados para conseguir las aguas más depuradas, con menor carga contaminante y capaces de ser empleadas para recarga de acuíferos, recreación, efluentes industriales, entre otros. Las sustancias o compuestos generalmente removidos son los siguientes (Rojas, 2002):

- Fosfatos y nitratos
- Huevos y quistes de parásitos
- Sustancias tensoactivas
- Algas
- Bacterias y virus (desinfección)
- Radionuclidos
- Sólido totales y disueltos
- Temperatura

2.4. Tratamiento de aguas residuales: métodos

La desinfección de las aguas residuales tiene por finalidad expulsar a la totalidad de organismos patógenos presentes en ella. Ciertos microorganismos nocivos en los sistemas de acumulación y repartición de agua pueden ser virus, bacterias y protozoarios. Las disminuciones de dichos microorganismos se pueden conseguir a través de la filtración o por inactivación. La filtración se

realiza con una barrera física que impide el acceso de microorganismos al efluente. Por su parte, la inactivación consiste en la transformación de los microorganismos (alterando su mecanismo de reproducción), de modo que se vuelven incapaces de provocar enfermedades. A fin de fortalecer la integridad microbiológica del efluente en la red de distribución, resulta indispensable la incorporación de un residual del agente depurador.

2.4.1. Desinfección por cloración

Tal como indican Ocampo-Rodríguez *et al.* (2022), el cloro y sus resultantes se emplean como desinfectantes en más del 65 % del mundo y se posicionan en el primer lugar en cuanto al tratamiento de las aguas. Este conjunto engloba al cloro gas (Cl_2) y compuestos líquidos o sólidos de color. Acostumbran a ser escogidos debido a su bajo costo, sencilla puesta en funcionamiento, reducido financiamiento inicial y costo de operaciones. Más allá de su enorme rango de inactivación de agentes infecciosos, suministran cuidado a los ecosistemas y la salud humana, así como impacto residual. Entre sus múltiples usos puede señalarse que el NaClO se utiliza en el lavado, higienización y tratado de textiles, acondicionamiento de efluentes industriales, comestibles, artículos de madera, piletas, redes de distribución, herramientas médicas, etc. Por otro lado, el dióxido de cloro (ClO_2), al tratarse de un oxidante potente, ha sido utilizado en la industria alimentaria.

En el agua, el cloro se diluye y se hidroliza a ácido hipocloroso (HOCl). Luego, este se ioniza para generar un ion hipoclorito (OCl). Uno y otro son antimicrobianos potentes y el cloro libre constituye la adición de los dos. La proporción de estos modos está supeditada al pH de la solución: el HOCl es el modo preponderante en el rango de pH 4-6, en tanto que la especie OCl prevalece en rango de pH 8.5-10. La consistencia del Cl_2 como antiséptico permanece por dos años a 4 °C y su concentración se reduce en un 50 % a la temperatura de 24 °C.

Ahora bien, la demanda de cloro constituye la parte del cloro que al contacto con el recurso hídrico reacciona con sustancias inorgánicas, naturales y ciertos metales, lo cual reduce su capacidad para purificar; lo restante, entendido bajo el nombre de cloro total, es la adición del cloro mezclado (purificador débil) y el cloro libre (neutraliza microbios infecciosos).

El cloro libre tiene impacto en las células por medio del perjuicio a las membranas, ya que obstruye sus funciones en detrimento del DNA. El ácido hipocloroso deteriora las proteínas y arrasa con las

enzimas que tienen parte en el metabolismo de los carbohidratos a través de la oxidación de grupos sulfhídricos (Ocampo-Rodríguez *et al.*, 2022). El dióxido de cloro, por su parte, opera a través de la oxidación selectiva; al extenderse mediante las membranas celulares, menoscaba el sistema enzimático u obstruye la síntesis de proteínas, incrementa la permeabilidad celular y desencadena la liberación de elementos vitales, lo cual culmina con la muerte celular.

2.4.2. Desinfección por ozonización

El ozono (O₃) constituye una modalidad alotrópica del oxígeno, cuya molécula está constituida por tres átomos en vez de los dos del oxígeno diatómico. Se genera en la estratósfera por obra de la radiación solar y la acción industrial por generadores de descarga en corona o a través de radiación UV mediante el aire, aire enriquecido u oxígeno. La molécula de ozono es bastante reactiva, con una capacidad de oxidación de 2,07 V, mayor en comparación con otros oxidantes habituales y únicamente sobrepasada por el fluoruro (3,06 V) o radicales como el radical hidroxilo (2,80 V) (García-Chamizo *et al.*, 2020).

El ozono tiene tres características importantes: es gas incoloro, tiene un olor potente y su poder oxidante es elevado. En su fase acuosa, el ozono se desmonta velozmente a oxígeno y especies radicales. López *et al.* (2021) explican que el ozono ha sido objeto de estudio muchos años atrás, esencialmente en el ámbito del tratado de agua para aprovisionamiento. No obstante, a causa de su comprobada capacidad para oxidar sustancias de complicada tratabilidad, su empleo en distintas aguas industriales es, aún hoy, materia de estudio.

La utilización de ozono beneficia la remoción de color con niveles de eficiencia en la remoción de entre un 95 % y 97 %, en el trato de efluentes de la industria de la pulpa y el papel. En contraste, en lo relativo a la disminución de demanda química de oxígeno (DQO) o carbono orgánico total (COT), los niveles de eficiencia no sobrepasan, por lo general, un 50 % a 40 %.

2.4.3. Desinfección por ultravioleta

Con respecto al método anteriormente explicado, la cloración, es importante subrayar que uno de los mayores inconvenientes tiene que ver con la generación de subproductos nocivos. Entre estos elementos tóxicos se han encontrado trihalometanos, ácidos haloacéticos y halógenos orgánicos

diluidos, en los cuales se ha observado una alta probabilidad de ser cancerígenos en concentraciones menores de 0,1 mg/L (Rossel *et al.*, 2020).

Actualmente, la descontaminación con luz ultravioleta se trata de un método que está siendo más abrazado en relación con la cloración, a causa de la severa regulación de los organoclorados que la cloración ha provocado. En comparación con la cloración, la luz ultravioleta descontamina el agua potable sin requerir de almacenaje o uso de reactivos químicos nocivos y, debido a su breve tiempo de contacto, disminuye las dimensiones de los tanques de tratado y, por ende, el costo. Hoy por hoy, las lámparas de vapor de mercurio de presión media que ocasionan radiación ultravioleta se emplean considerablemente en potencias de entre 20 W hasta 20 KW, y la longitud de onda que usan es cerca de 260 nm.

La acción microbicida de la radiación ultravioleta se relaciona a la energía relativa a la frecuencia de la luz ultravioleta que puede ocasionar perjuicios fotoquímicos en los ácidos nucleicos de los microbios. Como indican Rossel *et al.* (2020), diversos estudios han analizado la aplicabilidad de la radiación ultravioleta en la erradicación de agentes infecciosos para la purificación del agua; otras investigaciones muestran que una longitud de onda de aproximadamente 265 nm tiene un impacto de inactivación cercanamente mayor de organismos en comparación con otras.

2.5. Recirculación de aguas residuales

La recirculación es la utilización de aguas residuales en operaciones y procesos unitarios en el interior de una misma actividad económica que las produce y del lado del mismo usuario que también las produce. En la recirculación de aguas residuales no tiene que haber contacto con el suelo en el instante de su utilización, excepto cuando se trata del suelo de soporte de la infraestructura, esto es, el suelo donde se encuentra instalada la infraestructura de la actividad económica.

La recirculación del agua es una estrategia usada en diversos, países entre los que se encuentran México, Estados Unidos, Alemania, Sudáfrica, entre otros. En esta difusión de la técnica de recirculación han influido mucho los métodos modernos de tratamiento de las aguas residuales que, durante el siglo pasado, han experimentado un progreso impresionante (Ríos *et al.*, 2011). Dichos procesos brindan la posibilidad, hoy en día, de excluir materiales biodegradables, agentes

infecciosos, nutrientes y todo tipo de sólidos, lo que genera que el agua tratada pueda finalmente portar un vasto abanico de aplicaciones.

Las tendencias en la reutilización de los efluentes residuales se orientan a tres segmentos de aplicación, a saber: clases de uso, seguridad y las tecnologías aplicadas; vinculadas todas entre sí. La tecnología a emplear está supeditada a la clase de utilización del agua regenerada y de las pautas de calidad fisicoquímica y sanitaria que demande cada práctica. Con respecto a la seguridad en la utilización de las aguas residuales, una vez recuperadas, se vale de una multiplicidad de guías para los distintos usos ya establecidos, no obstante, no existe homogeneidad en las pautas y cada nación plantea una norma para un uso específico que, en diversas situaciones, se diferencian de las propuestas que otros países buscan para el mismo objetivo (Ríos *et al.*, 2011). Las tendencias en este ámbito están orientadas al establecimiento de un manual homogéneo sustentado en pautas de análisis de riesgo real, en las utilidades de esta clase de recurso hídrico.

En lo tocante a las tecnologías para la recuperación de efluentes industriales, los métodos avanzados posibilitan calidades de agua necesarias para múltiples ejecuciones, como la recirculación. Los efluentes conseguidos de los métodos convencionales de tratado no tienden a lograr la calidad apropiada para gran parte de las aplicaciones, motivo por el cual requieren de un tratamiento terciario o de una tecnología más moderna, cuya eficiencia sea mayor en conjunto para conseguir la calidad justa.

Capítulo III

La industria de la curtiembre y el proceso de curtido

La elaboración de un prototipo de gestión ambiental en los métodos y productos del sector de los curtidos supone el conocimiento de los atributos técnicos, operativos, normativos y financieros relativos a la actividad, y más especialmente, del efecto perjudicial que provoca la industria de los curtidos en el medioambiente. A nivel mundial, la industria de los curtidos se presenta como una de las más contaminantes, por lo que cada año resulta urgente dedicar enormes cantidades de inversión a fin de reparar, y, en mayor medida, prevenir daños en el medioambiente.

En esta industria, un aspecto elemental es el proceso mediante el cual se produce el curtido. El proceso desde que se adquiere un pliego de piel de origen animal hasta que pueda convertirse en cuero y llegar a manos de un productor constituye una actividad bastante extensa y difícil. Múltiples procesos se realizan en el tratamiento de la piel a fin de proporcionarle el acabado conocido por todos y, en última instancia, poder empezar a confeccionar productos con el material que ya se puede denominar cuero.

En el presente capítulo se exploran los detalles fundamentales correspondientes a la industria de curtiembre desde tres apartados. En el primer apartado se explica la relación del curtido y su presencia en las actividades humanas; se menciona la transición desde el uso de los cueros en tiempos pasados hasta su constitución en una industria como ocurre en nuestros días, y se pone especial énfasis en la situación actual de la curtiembre en el Cono Sur. En el segundo apartado se realiza un comentario pormenorizado de los procesos internos en la producción de curtido: (i) recepción de la materia prima, (ii) pretratamiento, (iii) curado y desinfectado, (iv) pelambre, (v) desencalado, (vi) descarnado, (vii) desengrasado, (viii) piquelado, (ix) curtido, (x) secado, (xi) engrasado, (xii) planchado y clasificación, y (xiii) almacenamiento. Finalmente, en el último apartado se estudian los más preponderantes impactos ambientales ocasionados por la industria de la curtiembre.

3.1. La curtiembre y su industria

Las pieles de los animales se encuentran relacionadas con la rutina diaria del hombre desde la época prehistórica. Han representado un recurso esencial, con diversas aplicaciones en el hogar y en la industria, y siguen presentes, pese a los importantes progresos en los procesos tecnológicos que implican innovaciones en la fabricación y en las cualidades de los productos, englobados los de consumo masivo tales como el calzado.

No obstante, las personas se han visto en la necesidad de acudir a múltiples procedimientos y recursos para preservar en óptimo estado los cueros, por ejemplo, los hebreros y egipcios desplegaron distintas técnicas y formas de tratado para conservarlos en una calidad adecuada (Martínez & Romero, 2016). Actualmente, el cuero permanece como un producto de consumo masivo en distintos sectores de la industria.

Se entiende curtido al proceso mediante el que las pieles de los animales son convertidas en un producto (cuero), el cual se preserva con el paso del tiempo con cualidades de flexibilidad, resistencia y fuerza. Desde la histología, se entiende que la piel está compuesta de tres niveles: la epidermis, el cutis y el subcutis.

En la industria de curtiembre se emplean las pieles de los animales en bruto conseguidas como subproducto de las industrias de las carnes, y que, sin la intervención de la curtiembre, habrían sido depositadas en vertederos, rellenos sanitarios o destinadas a la incineración. Entre las pieles que más frecuentemente se usa están las de bovino, porcino y ovino, que representan la materia prima fundamental del sector industrial de la curtiembre.

La crianza del ganado, la alimentación y los cercos de crianza, guardan vínculo estrecho con la calidad de la piel, al tiempo que son características esenciales para el tratado de dicho material. En otras palabras, el modo de vida de los animales que forman parte de esta industria es importante, puesto que, a partir de esto, el tratamiento de la piel será más o menos fuerte, dependiendo de la ocasión. En ese sentido, en caso de que la piel sea bastante maltratada, esto implica un empleo mayor de químicos y manipulaciones por parte de los operarios.

De acuerdo con Silva & Morales (2021), la curtiembre es un negocio de elevada exigencia a nivel global, con mayor presencia en Europa y Estados Unidos desde el siglo XX, a causa de la intensa

industrialización del material, puesto que es demandada por múltiples sectores comerciales, en gran parte, relacionados con la moda. Lo anterior ha incitado la utilización de instrumentos tecnológicos y químicos para explotar el mercado. De ahí que América Latina ha tenido un aumento por solucionar estos problemas, en tanto que en diversas zonas no se tienen esta clase de equipos y herramientas capaces de explotar esta producción de curtido. Pese a eso, en Latinoamérica este mercado se ha conservado, sin sacrificar tampoco los requisitos de los consumidores, la industria, gremios y sindicatos que imponen criterios para su libre comercio.

Por otra parte, desde la obtención del producto hasta su comercialización, se requiere de un proceso con etapas específicas. En primera instancia, se debe comprar la piel en bruto, la que, por lo general, ha sido extraída recientemente de los animales; en ocasiones, al conseguir este producto residual se tiene que respetar ciertas limitaciones por tratarse de un subproducto de la carne, por lo que resulta imperioso acatar las directrices de salubridad, de modo que se compruebe que el producto no es un recurso con posibilidad de ser perjudicial para la salud de las personas. Posterior a esto, está el proceso de curtido, que ocurre a través de múltiples procedimientos químicos y lavados para trabajar los acabados de este material que están vinculados con la textura, color y calidad del cuero seguro para la elaboración de productos tales como el calzado, etc. (Silva & Morales, 2021).

3.1.1 Situación de la curtiembre en América Latina

A escala global, la industria de las curtiembres es de las que más contaminación genera, y cada año se tienen que dedicar ingentes sumas de dinero para restauración, y, en menor medida, para la prevención. Las sumas dedicadas a ello tienen la finalidad de seguir con los lineamientos ambientales y eludir penalidades que implican pagos económicos (Martínez & Romero, 2016).

En Argentina, la tradición de la industria de la curtiembre se remonta al siglo XVII, con la exportación de cuero salado, pasado por el período denominado «civilización del cuero», entre el siglo XVIII y mitad del siglo XIX. Esta industria es tradicional desde finales del XIX, a la par del progreso del sector ganadero y de las compañías frigoríficas. Con la continuación de la producción de Europa durante el siglo XX, las exportaciones argentinas experimentaron un decrecimiento. En la década de los 70, Argentina inhabilitó la exportación de cueros no industrializados a fin de que

el sector distribuya mercancías con mayor valor agregado. La inhabilitación fue rectificada alrededor de los años 90, permitiendo la posibilidad de exportación de cueros.

Martínez y Romero (2016) explican que en la región de la cuenca Matanza-Riachuelo en la provincia de Buenos Aires se encuentran instalados más de 24 000 centros industriales y comerciales, entre los que sobresalen como mayores agentes contaminantes las curtidoras, a la par de los frigoríficos y las industrias petroquímicas. El ámbito de los curtidos, que congrega 170 empresas, es responsable del 50 % del daño ambiental. Asimismo, dicho sector se encuentra liderado por un conjunto de grandes compañías con proyección internacional, y, en determinados ejemplos, con sucursales en el extranjero, que reúnen gran parte de la producción y consiguen un 80 % de las exportaciones de cueros semiterminados y terminados. El 20 % restante concierne a compañías medianas y pequeñas que abastecen al mercado interno.

Ahora bien, en Latinoamérica, la industria de las curtiembres, pese a que es generadora de puestos de trabajo y riqueza, genera delicados problemas ambientales. Los curtidos ocasionan contaminación, concretamente en el recurso hídrico, lo que desencadena una serie de impactos ambientales, contaminando así la biodiversidad, debido a la descarga de elevadas concentraciones de materia orgánica, sulfuros, cromo, etc.

En Colombia se observó uno de los mejores índices, en los primeros meses de 2021, con respecto a la producción, exportación e importación de pieles y cueros. En cuanto a números concretos, la producción de cuero incrementó en un 17 %, a la vez que las exportaciones aumentaron enormemente con 632 % con respecto al volumen, lo que es un 211 % más, en términos de su valor. Con relación a las importaciones, aumentaron en 517 % en términos de volumen y 740 % en valor neto (La Horma de Tu Negocio, s.f). No obstante, como indican Ruiz *et al.* (2016), se llevó a cabo el cierre de veintiséis curtiembres, puesto que no cumplían con la normativa ambiental requerida, al verter desechos químicos en ríos ubicados en zonas próximas.

En el Perú, la industria de la curtiembre afronta significativos retos a causa del serio impacto ambiental y social provocado en el empleo de químicos como el cromo y los sulfuros, que se conservan en los residuos provocados y en los efluentes de elevada carga de contaminación que sobrepasan de manera exponencial los valores máximos admisibles (Instituto Tecnológico de la Producción, 2021). A nivel más específico, los procedimientos tradicionales de producción de

cuero utilizados en Perú consumen alrededor del 60 % al 80 % del cromo empleado para el proceso de curtiembre, ocasionando aguas residuales con elevadas concentraciones de cromo total que, urgentemente, merecen atravesar un tratamiento a fin poder satisfacer los valores máximos admitidos (VMA) (Ruiz *et al.*, 2016).

3.2. El proceso de curtido

El proceso de curtido se trata de la transformación de la piel de los animales en cuero. Las pieles, tras ser limpiadas de las grasas, carnazas y pelos, son supeditadas a la acción de múltiples agentes químicos que entran en contacto con las fibras de colágenos para conseguir un cuero equilibrado y duradero. Para el proceso de curtido de cuero se utilizan, esencialmente, dos métodos: uno a base de sales de cromo y otro a base de agentes vegetales. El 80 % de las industrias orientadas a la actividad de curtido de pieles emplea el proceso sustentado en las sales de cromo. A nivel macro, el proceso en las curtiembres comprende el proceso de ribera, el proceso de curtido y el proceso de terminado. A continuación, se expone detalladamente cada uno de los procesos internos correspondientes a las etapas macro del proceso de curtido.

3.2.1. Recepción de la materia prima

Este es el primer paso con que inicia el proceso de ribera, también denominado proceso de limpieza, donde se lleva a cabo la recepción de materia prima y se retira la grasa, carne y pelo, hasta el dividido de pieles. Corredor (2006) explica que, en la planta de sacrificio y faenado, el ganado es descarnado, de modo que las pieles caen al piso donde se entreveran con otros remanentes relativos a la elaboración de la carne en canal para su repartición a los centros de consumo. Es por eso que, al arribar la piel al centro de tratado, se introduce en un espacio cargado de residuos de tierra, sangre, estiércol, grasas, pelo y demás sustancias, sin contar la enorme cantidad de sal aplicada.

Las pieles crudas son muy húmedas y susceptibles de portar serios defectos, de manera que se lleva a cabo una supervisión visual para cerciorarse de que se cumpla con los criterios de calidad esperados, y en ese sentido, impedir el deterioro y productos terminados deficientes. Durante la etapa de llegada de las materias primas se produce agua residual procedente del escurrido de la humedad incluidas en las pieles conservadas y desechadas.

3.2.2. Pretratamiento

Las pieles son pesadas y categorizadas de acuerdo con el tamaño y según las especies. Más adelante, se cortan las zonas del cuello, la cola y las extremidades del animal. Los pellejos son limpiados con agua para lograr la rehidratación y purificación de los remanentes de sangre, estiércoles y demás residuos presentes en ellas.

3.2.3. Curado y desinfectado

Las pieles crudas son curadas salándolas o por medio del secado. Desde luego, el procedimiento más habitual es el empleo de la sal en dos modos concretos: la salazón húmeda o el curado con salmuera; otro tratamiento es el uso de solución clorhídrica y su subsiguiente congelación. La salazón húmeda consiste en almacenar las pieles con grandes cantidades de granos de sal y enjuague de manera constante, expulsando las impurezas; todo esto durante un lapso de 30 días a fin de que la sal absorba las sustancias líquidas de la piel (Pacheco-Blanco *et al.*, 2015). Durante esta operación, los enormes volúmenes de agua se encargan de acarrear tierra y materia orgánica, remanentes de sangre y excremento. Asimismo, el curado con salmuera se trata de disponer las pieles por cerca de dieciséis horas en enormes barriles cargados de antisépticos, microbicidas, agregados de una solución de sal.

3.2.4. Pelambre

En la etapa de pelambre, las pieles son sometidas a un proceso de tratado con una solución de sulfuros en medio alcalino, con la finalidad de apartar el pelo de la piel. A lo largo de este proceso se emplean reactivos como sulfuro de sodio (Na_2S), sulfuro ácido de sodio (NaHS), y bases como cal o hidróxido de sodio y aminas, para sostener un $\text{pH} > 11$ y demás reactivos (enzimas, por ejemplo) que favorecen el proceso (Guzmán & Luján, 2010).

Ciertamente, en esta etapa se produce la mayor emisión de contaminantes con sulfuros y materia orgánica. En las aguas residuales originadas en el pelambre, el sulfuro desempeña el papel de favorecer el desprendimiento del pelo y la epidermis. Por otra parte, el álcali se encarga de múltiples funciones como fortalecer la acción de los sulfuros en la remoción del pelo, diluye proteínas, saponifica de manera parcial las grasas, ablanda la estructura fibrosa de la epidermis, ocasiona degradación hidrolítica del colágeno y, finalmente, favorece al hinchamiento de la piel.

El hinchamiento uniforme de la piel es importante para que el proceso de curtido se realice en condiciones inmejorables (Guzmán & Luján, 2010).

3.2.4. Desencalado

En esta etapa, la piel es lavada para retirar la cal y el sulfuro, utilizando enormes volúmenes de agua para impedir potenciales interferencias en las fases siguientes del proceso de curtido. Resulta fundamental emplear sustancias químicas como ácidos orgánicos (sulfúrico, clorhídrico, fórmico, bórico), sales de amonio, bisulfito de sodio, peróxido de hidrógeno.

Para que la cal sea bien eliminada, una parte se lleva a cabo con lavados previos al desencalado de la piel en tripa. Para expulsar la cal mezclada con los grupos carboxílicos del colágeno es importante el uso de agentes desencalantes. Es clave utilizar un agente desencalante que, al mezclarse con los productos alcalinos, genere sustancias solubles en el agua, que sean susceptibles de ser eliminados por el lavado, y que no ocasionen consecuencias de hinchamiento. Ahora, para desencalar, se usan agentes habituales como ácidos o sales amónicas. No obstante, actualmente, se conocen procedimientos de mejores técnicas disponibles en la industria curtiembre: el desencalado con CO₂ y el empleo de ácidos orgánicos.

Zapata (2008) anota que, en el desencalado, las pieles son sumergidas en agua limpia por un tiempo de 72 horas hasta que los residuos de cal hayan sido retirados. En caso de que la piel no sea correctamente desencalada, el cuero se quemará y, por ende, quedará estropeado. En el remojo, tiene que removerse el cuero, refregarlo y frotarlo cada doce horas valiéndose de la espalda de la cuchilla. Al momento de llevarse a cabo el desencalado, para cada lavado del cuero tiene que cambiarse el agua del noque.

3.2.5. Descarnado

En esta fase del curtido se retiran las grasas y carnazas que aún se mantienen adheridas a la parte interior de la piel. Con máquinas especiales, se descarnan las pieles, consiguiendo así quitar los tejidos subcutáneos y adiposos pegados a la piel, con el objetivo de lograr la apropiada penetración de los productos químicos en las posteriores fases de curtido. Tras ser lavadas con grandes cantidades de agua para expulsar los residuos que se encuentren pegados, por fin se procede con el desengrasado.

3.2.6. Desengrasado

En este punto se emplean desinfectantes. Se elaboran soluciones, donde la piel es sumergida, dejándola reposar por un tiempo concreto según el origen de la piel (para la piel de ovejas, por ejemplo, se puede utilizar percloroetileno). Las descargas líquidas que presentan materia orgánica, solvente y detergentes son tratadas más adelante. Para la limpieza de los poros de la piel y para la expulsión de las proteínas, se emplea cloruro de amonio, consiguiendo uniformidad, tersura y mayor elasticidad en la superficie de la piel.

3.2.7. Piquelado

El piquelado constituye un tratamiento en el que se agrega a las pieles en tripa una sustancial cantidad de ácido, a la vez que se evita su hinchamiento sumando al baño una sal neutra. Este proceso es significativo en la operación siguiente de curtido; dado que, si la piel no se encontrase piquelada, el pH sería elevado y las sales del agente curtiente mineral adoptarían una alta basicidad, reaccionando velozmente con las fibras de colágeno, lo que provocaría un exceso de proceso de curtido en las capas más externas, complicando la expansión del curtiente en las capas interiores.

De acuerdo con Mojo *et al.* (2022), la cantidad de ácido agregado a la piel está supeditado al pH del baño, hasta alcanzar el nivel de saturación de los grupos básicos, lo que ocurre cuando ha reaccionado un miliequivalente de ácido por gramo de proteína. La distribución del ácido en el corte transversal de la piel se transforma con el tiempo. Al iniciar el piquelado las capas exteriores son más ácidas, pero luego la acidez se extiende por todo el corte, en relación con la penetración del ácido, de su naturaleza y concentración.

La finalidad de la sal neutra en el baño de piquelado consiste en evitar el hinchamiento ácido del colágeno. Resulta fundamental no ocasionar hinchamientos excesivos ni modificaciones abruptas en el valor del pH, ya que dichas modificaciones son capaces de provocar hinchamientos diferenciales que perjudican la estructura fibrosa de la piel.

3.2.8. Curtido

Como se indicó anteriormente, el proceso de curtido se lleva a cabo mediante dos métodos: con base en sales de cromo y con base en agentes vegetales (Freire, 2015):

- a. Proceso de curtido con base en sales de cromo: este constituye el método más usado, pero, al mismo tiempo, es el más contaminante por consecuencia tóxica del cromo. Este procedimiento posibilita la estabilidad del colágeno en la piel por medio de agentes curtientes minerales modificando la piel en cuero. En los curtidos minerales se utilizan múltiples clases de sales de cromo en muy diferentes proporciones. Para realizar este proceso, la piel es metida en una máquina divisora. La acción del cromo trivalente en un medio ácido (ácido clorhídrico) brinda la posibilidad de transformar la piel en cuero, evitando así su deterioro. El curtido ocupa una duración de 8 a 24 horas. En la fase de curtido se prepara el cuero a través de dos procesos: por un lado, está el proceso mecánico de poscurtición, que le proporciona un espesor concreto y uniforme al cuero; por otro lado, está el proceso húmedo de poscurtición, en el cual el cuero es neutralizado, recurtido, teñido y engrasado. Además, en el proceso de curtido se emplea energía eléctrica para la actividad de la maquinaria, agua para la elaboración de las sales de cromo y sustancias químicas. Como producto del curtido, se originan aguas residuales y recipientes vacíos de los productos químicos.
- b. Proceso de curtido del cuero con agentes vegetales: el curtido con agentes vegetales posibilita la preservación de la fibra del cuero y le brinda ciertas cualidades de morbidez al tacto y flexibilidad que son efecto de los materiales curtientes y de los procedimientos de trabajo que se utilizan. En este proceso de curtido se usan extractos vegetales, en gran parte plantas tropicales o subtropicales. Los cueros son sumergidos en un licor curtiente vegetal conformado por agua, tanino, alumbre y sal, en un tiempo específico tal que se impregne absolutamente el agente curtiente. Dado que el proceso de curtido se realiza en un contexto ácido, es esencial controlar el pH de la solución, que tiene que preservarse en un valor cercano de pH 5.

3.2.9. Secado

La fase de secado se encuentra supeditada al proceso previo de curtido y de las propiedades que se espera aplicar a los cueros procesados. La velocidad del secado constituye un factor bastante importante: si se lleva a cabo con un ritmo de velocidad muy acelerado, la superficie externa puede secarse al tiempo que las zonas internas permanecen húmedas. El secado de los cueros se lleva a cabo, fundamentalmente, en los cueros de categoría superior, de acuerdo con el método conocido

como desecación adhesiva, donde se pega el cuero húmedo sobre platos de vidrio y son secados tensando y estirándolos.

3.2.10. Engrasado

El engrase se lleva a cabo con la finalidad de evitar el cuarteamiento del cuero, para transformarlo en material terso, resistente y elástico. Este proceso se enfoca en la impregnación del cuero con aceites emulsionados, que son sedimentados en las fibras del cuero, adhiriéndose y consiguiendo el acabado esperado. En el engrasado se tiene que diferenciar entre el engrase sencillo, engrase a mano o en tinas. A lo largo de todo el proceso de engrase, se va incrementando la cantidad de aceite emulsionado y, como consecuencia, la impermeabilidad y la calidad del cuero.

3.2.11. Planchado y clasificación

Se emplean diferentes máquinas de acuerdo al tipo de terminación. Pueden utilizarse máquinas rotativas, de mesa o de prensado, que proporcionan brillo o satinan el cuero. Culminado el proceso de planchado, los cueros son discriminados por secciones según su tamaño y calidad, para dar paso, así, a la etapa de almacenamiento.

3.2.12. Almacenamiento

Los cueros se almacenan en función del tamaño, calidad y color, sobre pallets de superficies plana, en un espacio aireado, exento de humedad. Asimismo, los cueros son cubiertos para impedir el contacto con la luz solar.

3.3. Impacto del proceso del curtido en el medioambiente

El proceso de producción de curtido ocasiona considerables impactos negativos al medioambiente en dos ámbitos: por un lado, tiene efectos en el aire por medio de la generación de olores, material particulado, gases y humo; por otro lado, en el componente agua se manifiestan impactos por demanda (extracción) de agua de las fuentes naturales, y también por la polución de ríos y quebradas como efecto de la disposición de aguas residuales procedentes del proceso de producción.

Tras el proceso de producción de cuero persisten subproductos o productos residuales, tales como productos sólidos del pelo, remantes de la carnaza, cal, sulfuros, remanentes del cuero, polvo de

curtido, etc. Aparte de los residuos sólidos, están los residuos líquidos y químicos (los minerales), sustancias con capacidad de ocasionar un elevado riesgo para la salud, no solo para las personas ajenas a los procesos de producción, sino para aquellos quienes dentro de dichos procesos trabajan con esta clase de productos. Entre las sustancias que quedan del curtido están el cloruro de sodio, demanda biológica de oxígeno, demanda química de oxígeno, sulfuro, etc. Con relación a elementos nocivos están las arilaminas, pentaclorofenol (PCP), formaldehído, tributilestano de los afluentes y está estrechamente vinculado con el cáncer, enfermedades de la piel e inficionamientos (Silva & Morales, 2021).

García *et al.* (2022) hacen hincapié en los impactos del cromo, elemento muy utilizado en la curtiembre. En efecto, en el proceso de curtido del cuero se utiliza el hidroxisulfato de cromo, elemento que, durante el proceso, se transforma en un remanente. El cromo es un metal de alto riesgo que se traslada a través del agua, de modo que es susceptible de ser absorbido por plantas y animales que lo consumen y de los alimentos perjudicados por dicho elemento. Al penetrar el cromo en el organismo, bien sea por ingestión, contacto o inhalación, acarrea efectos dañinos de naturaleza genética, mutagénica y carcinógena. En ese sentido, los elevados niveles de cromo en las aguas residuales, producto del curtido de pieles que utilizan el cromo en sus procedimientos, constituyen un serio peligro para los organismos vivos.

El cromo es un metal pesado que se almacena en el suelo y que se constituye como uno de los principales elementos contaminantes. Los seres humanos y los animales se encuentran comprometidos al cromo por inhalación (en las emanaciones del tabaco, por ejemplo), mediante la piel (exposición en la actividad del trabajador) o mediante ingestión (en los productos agrícolas, por ejemplo). La toxicidad sistemática del cromo tiene su causa, en especial, en sus resultantes hexavalentes que, a diferencia de los trivalentes, son capaces de ingresar en el cuerpo por cualquier medio con mucha más sencillez. El cromo trivalente contenido en los residuos de piel curtida puede experimentar transformaciones en sus atributos químicos de acuerdo con el ambiente en que esté presente. En realidad, cuando el cromo está presente en un entorno básico o se combustiona a la vista de cal u otra sustancia alcalina propende a modificarse a cromo hexavalente, y la convierte en una modalidad mucho más nociva del metal.

En los ecosistemas acuáticos, el cromo hexavalente (Cr^{6+}) está presente, fundamentalmente, en su modalidad soluble, que puede ser lo más estable como para ser trasladados por los efluentes.

Este, por último, se transforma en cromo trivalente (Cr^{3+}) por medio de la disminución de especies como las sustancias orgánicas, el ácido sulfhídrico, el sulfuro de hierro, el amonio, entre otros. Por lo común, esa modalidad trivalente no migra sustancialmente, sino que se precipita velozmente y es absorbido en partículas en suspensión y residuos del fondo. El cromo se almacena en diversos organismos acuáticos, concretamente en peces que se alimentan del fondo de las aguas (Chávez, 2010).

En los suelos, el cromo trivalente es en cierta medida inmóvil, dada su capacidad de absorción en los suelos, pero, en cambio, el cromo hexavalente es bastante inestable. Chávez (2010) explica que las reacciones redox impactan en la biodisponibilidad y la toxicidad del mismo. La oxidación puede darse con óxidos de hierro (Fe) y magnesio (Mg), en suelos frescos y acuosos, así como en contextos ligeramente ácidos. La disminución puede darse con sulfuros y hierro (II) (condiciones anaeróbicas), y se precipita a la vista de materia orgánica. A causa de este motivo, aunque el cromo trivalente (en dosis mínimas) es un microelemento central en los animales, el cromo hexavalente no constituye un elemento esencial y tóxico en concentraciones mínimas; en consecuencia, tienen que evitar cualquier actividad antrópica (como la curtiembre) que expulsen cromo trivalente. Incluso cuando se expulsa al ambiente, no existe seguridad alguna de que se conserve en estado químico. Por citar un caso, el acto de depositar residuos en vertederos con contenido de cromo trivalente procedentes del curtido, a la par de otros desperdicios industriales ácidos o con desperdicios cloacales, que generan contextos ácidos en su descomposición, son susceptibles de convertirse el cromo trivalente en cromo hexavalente.

Por su parte, el sulfuro de hidrógeno, capaz de perjudicar a animales y humanos, se distribuye mediante la sangre hasta los pulmones, cerebro, corazón, hígado y riñones, con el impacto grave de generar casos de intoxicación. De hecho, el problema esencial en torno a los sulfuros en el agua tiene que ver con su rápida reacción para derivar en un sulfuro de hidrógeno, que es un compuesto el cual, a exposiciones menores de 30 minutos a concentraciones entre 1 y 11,6 ppmv, ocasiona sensibilidad bronquial en operarios saludables, perjuicios en el sistema respiratorio e impactos negativos en el sistema nervioso central de los animales (Umbarila-Ortega *et al.*, 2019). De igual modo, el ion sulfuro, dada su naturaleza reductora, reduce el oxígeno contenido en el agua y, por consiguiente, perjudica radicalmente al ecosistema acuático.

El enorme problema que supone la contaminación por sulfuros en el agua ha dado pie al desarrollo de tecnología capaces de remover estas sustancias nocivas. A este punto se han investigado múltiples opciones para el tratado de aguas residuales contaminantes con sulfuro, donde las más destacadas son la oxidación catalítica con manganeso y aire, la coagulación/floculación, la oxidación electroquímica, la electrocoagulación, la oxidación con permanganato de potasio, las mezclas entre las luces ultravioleta y oxígeno disuelto, y el tratamiento anaerobio con ozono (Umbarila-Ortega *et al.*, 2019).

La industria del curtido se constituye como una de las fuentes aseguradas con emisiones atmosféricas. Oquendo *et al.* (2022) apuntan que, en Colombia, hacia el 2017, el valle de Aburrá contaba con ocho compañías de curtido, todas las cuales ejecutan procesos que involucran un elevado nivel de polución y fuertes pestilencias, ocasionando un fuerte perjuicio en el ambiente. Su impacto atmosférico obedece, precisamente, a la emisión de materiales particulados y sulfuro de hidrógeno que constituyen las dos descargas gaseosas potenciales importantes. Asimismo, la degradación de la materia orgánica provoca la peculiar pestilencia de las curtiembres. Las industrias de curtido también despiden contaminantes del aire como CO, CO₂, NO y SO por medio del empleo de calderas y generadores, ocasionando enormes impactos en la salud y perjuicios en los diversos sistemas de las personas.

Capítulo IV

Propuesta de una planta de tratamiento de aguas residuales para mejorar la recirculación del agua y los tratamientos en cada etapa del proceso de curtido en una empresa de curtiembre

Hoy en día, las compañías del área de curtidos necesitan de una mayor eficiencia, dado que, con mayor frecuencia, se presentan nuevos competidores locales y extranjeros que presentan costos más reducidos y una tecnología más avanzada. En ese sentido, el planteamiento de instalación de una planta de tratamiento de aguas residuales constituye un hecho que está cobrando mucha relevancia entre las múltiples compañías dedicadas a este sector, debido a que, en sus procesos productivos, generan enormes cuantías de residuos nocivos.

4.1. Objetivos

4.1.1. Objetivo general

Optimizar la recirculación y los mecanismos de tratado del agua empleada en cada una de las fases del proceso de curtido mediante la instalación de una planta de tratamiento de aguas residuales en una compañía de curtido en la Alianza Virgen de la Asunción SCRL de Trujillo en 2021.

4.1.2. Objetivos específicos

- Establecer que los sólidos totales, sulfuro y cromo tienen un impacto considerable en la polución de los efluentes procedentes de las etapas de remojo, pelambre y curtido.
- Precisar los indicadores económicos, tecnológicos y financieros del proyecto, examinando la conducta de las conclusiones recogidas.
- Proponer el sistema de la planta de tratamiento de aguas residuales que se instalará en la compañía de curtido en la Alianza Virgen de la Asunción SCRL de Trujillo en 2021.

4.2. Variables de la investigación

- Variable independiente: Planta de tratamiento de las aguas residuales
- Variable dependiente: Tratamiento del agua en las frases del proceso de producción del curtido

4.3. Tipo de investigación

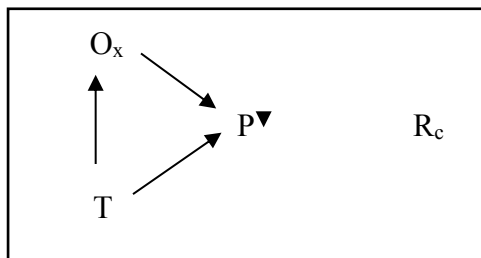
La investigación fue, según el enfoque, cuantitativa y, según la finalidad, aplicada.

4.4. Nivel de investigación

El nivel fue descriptivo.

4.5. Diseño de investigación

El diseño de la investigación fue de carácter propositivo, ya que se sustenta en una necesidad o vacío dentro de la curtiembre. En cuanto se identificaron los problemas, estos se investigaron y se profundizó en ellos, asimismo, se llevó a cabo un proyecto de instalación de una planta de tratamiento a fin de dar solución los problemas presentes y los desperfectos identificados. El esquema utilizado fue el siguiente:



Donde:

O_x = Diagnóstico de la realidad

T = Estudios teóricos

P = Propuesta

R_c = Realidad del cambio

4.6. Sujetos de investigación

Los sujetos de la investigación fueron las aguas residuales procedentes del proceso de producción del curtido. Para la investigación se debía tener una línea base de polución, para lo cual se tomó una muestra porcentual de cada proceso productivo que ocasione aguas residuales. Se uniformizaron las muestras y se analizó la concentración de los parámetros de actividades potencialmente contaminantes.

Con la información de la línea base de contaminación se tomó la decisión de proporcionar un tratamiento individual a los parámetros contaminantes con mayor nivel de concentración y toxicidad. En cuanto al parámetro individual, se tomaron muestras de los procesos donde se encontrasen los parámetros con más potencial de polución, a fin de examinar a nivel piloto su tratamiento, condiciones y eficiencia. Finalmente, se analizaron los tratamientos individuales a los efluentes derivados de los procesos contaminantes.

Las muestras fueron homogeneizadas con el resto de las muestras de aguas residuales para un procedimiento de tratado de aguas final. Posteriormente, se examinó el efluente homogeneizado ya tratado, con el fin de obtener los resultados del tratamiento y parangonarlos con la línea base de polución para obtener así un indicador de la eficiencia del método de tratado de aguas residuales propuesto.

La totalidad de procesos y ensayos de la investigación están alineados con las normas del Ministerio de Salud, mediante la Dirección General de Salud Ambiental (Digesa), a saber, el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Sanitaria de los Recursos Hídricos Superficiales, estatuido por uno de los órganos de la Digesa, la Dirección de Ecología y Protección del Ambiente (DEPA).

4.7. Métodos y procedimientos

4.7.1. Métodos

Los métodos empleados en la investigación fueron el inductivo y los métodos estadísticos-matemáticos.

4.7.2. Procedimiento

Se elaboró un flujograma del proceso de producción de la compañía. Posteriormente, se identificaron y describieron los instrumentos, maquinarias, equipos y químicos empleados en las diversas secciones de producción. También se llevó a cabo el examen de los residuos contaminantes generados tras cada fase. Se realizó un estudio sobre la capacidad de la planta con respecto a las cantidades de agua usadas diariamente. Se procedió a la recopilación de información acerca de las caracterizaciones conseguidas del agua en las fases de producción sin tratamiento alguno.

Una vez implementada la planta de tratamiento, se recopilaron las muestras en la fase de ribera, en todos sus procesos internos, para su subsiguiente tratamiento a nivel piloto; seguidamente, se llevó a cabo la recopilación de muestras en la fase de curtido en todos sus procesos internos, para su siguiente tratamiento a nivel piloto. Se llevó a cabo el análisis de la homogeneización de muestras tratadas a nivel piloto a fin de desarrollar una supervisión constante para constatar la funcionalidad del proyecto. Tras esto, se hicieron caracterizaciones con una reiteración de cada año.

Asimismo, se llevaron a cabo los cálculos por medio de fórmulas para definir la mezcla idónea entre coagulante y floculante en el sedimentador final. De igual modo, los cálculos sirvieron para definir el diseño del tanque de oxidación de sulfuros para las aguas de ribera, el diseño de tanque de precipitación de cromo para las aguas de curtido, el diseño del tanque homogeneizador y el diseño del tanque de sedimentación final.

4.8. Técnicas e instrumentos

A fin de precisar los resultados técnicos y financieros, se utilizaron de referencias bibliográficas, documentación y análisis de laboratorio, tal como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. *Técnicas e instrumentos de la investigación*

Etapa	Fuentes	Técnicas	Herramientas	Tratamiento	Resultado esperado
Estudio técnico	Bibliografía Análisis de laboratorio	Revisión documental virtual	Ficha bibliográfica virtual	Análisis físicos, químicos y bacteriológicos	Determinación del tamaño y del diseño de la plata Determinación de la tecnología a utilizar
Análisis económico y financiero	Bibliografía Internet	Revisión documental virtual	Ficha bibliográfica virtual	Análisis bibliográfico	Determinación de los indicadores económicos y financieros del proyecto

Nota. Tomado de García (2021)

4.9. Diagnóstico del estado actual del agua vertida por la compañía de curtido Alianza Virgen de la Asunción-SCRL

De acuerdo con Huaytalla & Cruz (2016), en el Perú se genera cerca de 2 217 946 m³ diarios de aguas residuales descargadas a la red de alcantarillas. El 32 % de estas descargas pasa por un proceso de remediación, si se considera, además, que cada ciudadano en el Perú genera 142 litros de aguas residuales diariamente.

La ciudad de Lima genera cerca de 1 202 286 m³ diarios de aguas residuales descargadas a las redes de saneamiento de las Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento (EPS) que operan en el centro urbano. De estas aguas, el 20,5 % pasa por un tratamiento de remediación.

Se proyecta que para el 2024, el Perú duplicará la cantidad de aguas residuales que, a día de hoy, manejan las EPS.

A continuación, en la Tabla 2 se lleva a cabo un análisis en laboratorio privado de la muestra final conseguida de los tratamientos a nivel piloto. Concretamente, se expone la caracterización de los vertimientos provocados por la compañía de curtidos estudiada:

Tabla 2. Caracterización de los vertimientos

Parámetro	Resultado	Unidades	Valor permitido cumpliendo la norma D.S. 021-2009
En campo			
pH	7,8	pH	6-9
En laboratorio			
I. Físicos			
Sólidos sedimentales (SSED)	1,5	mgSSED/L	8,5
Sólidos suspendidos totales (SST)	10	mgSST/L	500
II. Iones			
Sulfuros	<0.00045	mgS ²⁻ /L	
III. Metales			
Cromo hexavalente	<0.001	mgCr ⁶⁺ /L	0,5
Parámetros orgánicos			
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	25,2	mgO ₂ /L	500
Demanda química de oxígeno (DQO)	94,2	gO ₂ /L	1000
Grasas y aceites	<0.5	Mg/L	100

Nota. Tomado de García (2021)

4.10. Desarrollo experimental

Con la caracterización de las aguas vertidas se produce una variedad de tratamientos que pueden ser aplicados en los procesos de producción en la compañía de curtido Alianza Virgen de la Asunción-SCRL

El proceso en la compañía se lleva a cabo en un área de 5000 m² de extensión, donde el proceso ocupa el 500 m² y la planta de tratamiento tiene ocupa una superficie de 300 m².

4.10.1. Determinación de las condiciones de pretratamiento

Consiste en la expulsión de sólidos gruesos presentes en los vertidos y aquellos que aparecen, más adelante, en el proceso de curtido. Seguidamente, se expulsan los sulfuros en la fase de sulfurado.

- i) Tamizado: el objetivo consistió en quitar las partículas presentes en los residuos líquidos, aplicando tamices o filtros de arena con la finalidad de impedir atascamientos en las etapas posteriores. Desde una perspectiva ambiental, utilizar filtros de malla en vez de filtros de arena contribuye a impedir la producción extra de

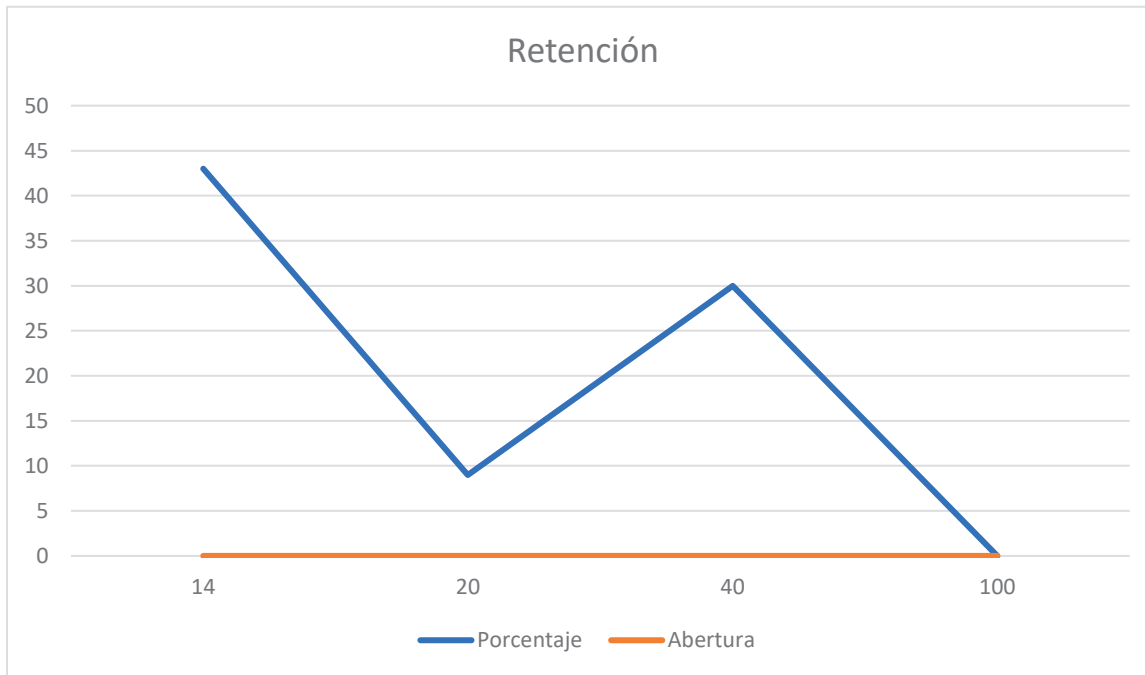
residuos sólidos, dado que la arena tiene que cambiarse cada cierto período de tiempo. Desde una perspectiva operativa, resulta más sencillo dar mantenimiento al filtro de malla, siempre que se use una sola malla, puesto que, si se emplean más capas, se conformaría una capa fibrosa que obstruiría el filtro.

Tabla 3. Análisis granulométrico de las aguas residuales del proceso productivo

Tamiz	Diámetro de apertura (mm)	Partículas retenidas (g)	Porcentaje retenido
14	1,41	9,5	43
20	0,841	2,1	9
40	0,0420	6,7	30
100	0,149	3,9	17,5

Nota. Tomado de García (2021)

Figura 1. Curva granulométrica



Nota. Tomado de García (2021)

En la Figura 1 se ve que en los tamices 14 y 40 es donde se retiene la mayor cantidad de partículas, de modo que las rejillas se vuelven óptimas para una disposición apropiada.

ii) Desengrasado

Dada la elevada necesidad de la compañía de quitar las partículas, se contempló el uso de una trampa de grasas; esta trampa consiste en una canal de 4,2 m de largo y 2,8 m de ancho, de tres secciones con capacidad de retener las partículas trasladadas por las aguas residuales. El último tramo contó con una conexión a la tubería situada cerca de 40 cm de la base de la trampa de grasas, con la finalidad de impedir el ingreso de partículas que no fueron retiradas en las secciones precedentes. Las grasas y aceites contenidos en la trampa de grasas son removidos mediante rasquetas superficiales y trasladados a un almacén para ser incinerados

iii) Eliminación de sulfuros

La primera fase del método de eliminación de sulfuros consiste en la acidificación de las aguas residuales con ácido clorhídrico (HC) con una concentración de 37 000 Mg/L, consiguiendo así la vaporización o desorción del ácido sulfhídrico (H₂S).

En la fase de recuperación, el H₂S(g) generado reacciona con hidróxido de sodio (NaOH), conformándose así una solución con concentraciones de sales de sulfuro de sodio (Na₂S).

Fórmula para fijar la disminución del sulfuro de sodio:

$$\% \text{ reducción} = (c_i^M - c_f^M / c_i^M) * 100$$

Donde:

c_i^M = cantidad de muestra inicial (mg/L)

c_f^M = cantidad de muestra final (mg/L)

iv) Eliminación del cromo: en la fase de curtido y recurtido, las pieles procedentes de las fases previas son expuestas a enormes cantidades de cromo con la finalidad de transformar la piel en cuero, lo cual les concede atributos como resistencia a la humedad y al calor, impidiendo la degradación de estas. Por tal razón, resultó

necesario instalar la planta de tratamiento a fin de configurar un procedimiento que posibilite la concentración de este en el agua residual de dicho proceso.

- v) Homogeneización: se intentó homogeneizar las corrientes con elevados contenidos de material orgánico, sólidos suspendidos y sólidos sedimentales a fin de poder llevar a cabo los tratamientos posteriores en una única corriente, disminuyendo así el número de equipos y tanques que se emplearían.

4.10.2. Tratamiento primario

A fin de expulsar los sólidos totales se implementó un sistema de flotación capaz de posibilitar el retiro de las partículas de menor densidad que el agua. Por medio de este procedimiento se conseguiría agua depurada y limpia para separar su disposición en la red de saneamiento.

Con el objetivo de establecer la rapidez de flotación, se optó por colocar un compuesto de corriente homogeneizada en una probeta, lo que posibilitaría establecer el fenómeno presente y la rapidez de flotación a lo largo de un par de horas, con una supervisión realizada cada diez minutos.

4.10.3. Coagulación y floculación

Para conseguir un resultado idóneo de coagulante y fluctuante, el agua tiene que estar entre 7 y 7,5; por tal motivo, previamente se lleva a cabo una neutralización. Para tal fin, se tuvo que emplear hidróxido de sodio con una concentración de 199.985 Mg/L y volumen de la muestra de 500 mL, añadiéndole 14 mL de hidróxido de sodio a cada prueba.

4.11. Planteamiento de la instalación de la planta de tratamiento

El proyecto de implementar la planta de tratamiento en la empresa de curtido Alianza Virgen de la Asunción SCRL consistió en que una cantidad de las aguas descargadas a la red de saneamiento fueran procedentes de las Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) para ser tratadas, utilizando para ello múltiples tecnologías como lagunas facultativas, lagunas aireadas, lodos activados, etc. Luego, estas aguas tratadas son utilizadas para la irrigación de sembríos y áreas verdes, o son vertidas a organismos de agua natural.

Ejecutando las pruebas de laboratorio optimizadas con los aditivos convenientes, la propuesta reduciría notablemente los índices de DBO y DQO, ocasionando un incremento del oxígeno en

el agua; generando también que la disposición final de la misma sea óptima para las aguas donde serán vertidas. De igual modo, se produjo una reducción de los componentes tóxicos como el cromo y el sulfuro. Con respecto a los sólidos suspendidos y sedimentales, estuvo entre los planes reducir su concentración, esto a causa de la activación de aire en la columna de flotación.

4.11.1. Diseño del sistema de tratamiento

Procediendo de la particularización de los efluentes residuales de la compañía de curtido Alianza Virgen de la Asunción SCRL, se planteó el diseño de un sistema de tratado de aguas, puesto que esta resultaba imprescindible para un adecuado funcionamiento de la compañía, respetando las normas de bioseguridad, así como para reducir los índices de polución de aire, suelo y agua.

Se establecieron los siguientes parámetros de modo general, tal como se aprecia en la Tabla 4:

Tabla 4. *Parámetros generales*

Espacio físico disponible	300 m ²
Caudal real	1,95 m ³ / h
pH	9
DQO	2,085 mgO ₂ / L
DBO	1,763 mgO ₂ / L

Nota. Tomado de García (2021)

4.11.2. Selección del sistema de tratamiento

A causa de las enormes cargas contaminantes que se producen a lo largo del proceso de transformación de las pieles y las cualidades químicas y biológicas del agua residual vertida a la red de alcantarillas, resultó oportuno considerar valores referenciales y factores de seguridad a fin de conseguir un sistema idóneo de los primordiales parámetros de diseño. Lo expuesto se aprecia en la Tabla 5.

Tabla 5. Sistema de tratamiento

Pretratamiento	Tamizado	
	Desengrasado	2,6715 m ³ / h
	Eliminación de sulfuros	0,05566 m ³ / h
	Eliminación de cromo	0,2080 m ³ / h
	Homogeneización	6,5441 m ³ / h
Tratamiento primario	Flotación	1,0907 m ³ / h
Tratamiento secundario	Coagulación - floculación	1,1568 m ³ / h

Nota. Tomado de García (2021)

Nota. Tomado de García (2021)

4.11.3. Diseño del tamiz

La finalidad del tamiz consiste en almacenar el mayor número de sólidos que estén presentes en las aguas residuales. Se intentó aplicar una serie de mallas indicadas previamente que corresponden a la malla 14 y 40. Fueron colocadas de manera curvada, de modo que el filtro no se taponee, ya que el agua empuja los sólidos, depositándolos en este equipo para su subsiguiente disposición. Asimismo, el tamiz contó con estrías (rocas) para poder vincularlo a la tubería y para que, una vez terminado el proceso, se pueda disponer de una vía de acceso y un veloz control de los residuos, sin contar, en adición, de un adecuado saneamiento y mantenimiento.

4.11.4. Diseño del tanque de eliminación de cromo y sulfuro

Para la instalación del tanque se tiene que contemplar el volumen y longitud con base en parámetros de diseño, como caudal y tiempo de retención hidráulica.

- i) Cálculo del volumen del tanque de eliminación de cromo

Ecuación N.º 1. Volumen del tanque de eliminación de cromo

$$\text{Volumen del tanque de eliminación de cromo (m}^3\text{)} = Q_D \text{ (m}^3\text{/h)} * \text{THR (h)}$$

Donde:

THR: Tiempo en que se encuentra la sustancia a tratar dentro del sistema

Solución:

$$\begin{aligned}\text{Volumen del tanque de eliminación de cromo (m}^3\text{)} &= Q_D \text{ (m}^3\text{/h)} * \text{THR (h)} \\ &= 0,2080 \text{ (m}^3\text{/h)} * 24 \text{ (h)} \\ &= 4,9871\end{aligned}$$

Ahora, al incrementar el 25 % del volumen conseguido anticipando que se generen derrames por exceso de sustancias vertidas:

$$\text{Entonces: } 4,9871 * 25\% = 6,2339$$

ii) Cálculo de la longitud del tanque de eliminación de cromo

Ecuación N.º 2. Longitud del tanque de eliminación de cromo

$$\begin{aligned}l_1(\text{m}) &= \frac{\text{Volumen del tanque de eliminación de cromo}}{h(\text{m}) * a(\text{m})} \\ &= \frac{6,2339 \text{ m}^3}{2(\text{m}) * 1(\text{m})} \\ &= 3,1169\end{aligned}$$

Tabla 6. Dimensiones del tanque de eliminación de cromo

Estructura	Acero inoxidable
Largo	3,1169
Ancho	1m
Altura	2m

Nota. Tomado de García (2021)

Tomado de García (2021)

iii) Cálculo de volumen del tanque de eliminación de sulfuro

Ecuación N.º 3. Volumen del tanque de eliminación de sulfuro

$$\begin{aligned}\text{Volumen del tanque de eliminación de sulfuro (m}^3\text{)} &= Q_D \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right) * \text{THR(h)} \\ &= 0,05566 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right) * 12(\text{h})\end{aligned}$$

Ahora, al incrementar el 25 % del volumen conseguido anticipando que se generen derrames por exceso de sustancias vertidas.

Entonces: $0,6679 * 25 \% = 0,8349$

Tabla 7. Dimensiones del tanque de eliminación de sulfuros

Estructura	Hormigón
Largo	0,8349 m
Ancho	1m
Altura	1m

Nota. Tomado de García (2021)

El tiempo de resistencia de alrededor de dos horas permitió la neutralización de los cambios de horario en el caudal, la temperatura de los efluentes, de las concentraciones de las cargas contaminantes y la alcalinidad, de modo que al hacer su ingreso a la fase de flotación aérea se conserven los parámetros y las cualidades constantemente en el agua residual que habría de ingresar a los procesos de tratado posteriores. Esto se relaciona con lo expuesto en la Tabla 8.

Tabla 8. Tanque de homogeneización y trampa de grasas

Geometría compartimiento	Rectangular
Caudal de diseño Q_D	$6,5441 \text{ m}^3 / \text{h}$
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	120
Altura útil de compartimiento (h)	2m
Altura de compartimiento (a)	1m

Nota. Tomado de García (2021)

Nota. Tomado de García (2021)

Se debió tener en consideración los reboses en la zona superficial para impedir desbordes ante posibles incrementos violentos del caudal.

i) Cálculo del volumen requerido

Ecuación N.º 4. Volumen del tanque

$$\begin{aligned}\text{Volumen del tanque homogeneizador (m}^3\text{)} &= Q_D \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right) * \text{THR(h)} \\ &= 6,5441 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right) * 2(\text{h}) \\ &= 13,0882\end{aligned}$$

Ahora, al aumentarle el 25 % del volumen conseguido anticipando que se generen derrames por exceso de sustancias vertidas.

$$\text{Entonces: } 13,0882 * 25 \% = 16,3603 \text{ m}^3$$

ii)

Ecuación N.º 5. Longitud del tanque

$$l_1(\text{m}) = \frac{\text{Volumen del tanque}}{h(\text{m}) * a(\text{m})}$$

$$l_1(\text{m}) = \frac{16,3603 \text{ m}^3}{4(\text{m}) * 1(\text{m})}$$

$$l_1(\text{m}) = 4.0900$$

iii) Cálculo de la potencia de la bomba de succión del tanque homogeneizador

La cantidad de agua residual acopiada en la trampa de grasas fue bombeado al proceso posterior, teniendo en cuenta que el tanque de homogeneización capta en conjunto el íntegro de las aguas residuales del proceso que no contienen componentes retirados en la fase de pretratamiento. Así, se genera un dimensionamiento en el equipo mayor, de modo que se adopta como punto de referencia este volumen de dicho tanque para adquirir un funcionamiento idóneo de la bomba. A fin de establecer las condiciones de diseño para la aplicación de la bomba hidráulica, fue fundamental identificar los valores de potencia de la bomba, su altura dinámica y la potencia recomendada.

Ecuación N.º 6. Potencia de la bomba

$$\text{Potencia (Hp)} = Q \left(\frac{m^3}{seg} \right) * H \text{ dinámica (m)} * \rho * g / 746 * \left(\frac{\text{eficiencia}\%}{100} \right)$$

Se asume una eficiencia de motor del 70 %

$$H_D = H \text{ succión} + H \text{ impulsión} + H \text{ pérdidas}$$

$$= 0 + 4m + 1,95 m$$

$$= 5,95 m$$

Se obtiene:

$$\text{Potencia (Hp)} = 1,8178 * 10^{-3} \left(\frac{m^3}{s} \right) * 5,95 \text{ dinámica (m)} * 946, 2691 \left(\frac{Kg}{m^3} \right) * 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$746 \left(\frac{m^2 kg}{s^3} \right) * 0,7$$

$$= 0, 1923$$

Potencia recomendada de la bomba contemplando un margen de 60 % de eficiencia del trabajo del motor de la bomba.

$$\text{Potencia (Hp)} = 0,1923 + (0,1923 * 0,60)$$

$$= 0,3076$$

Tabla 9. Dimensiones del tanque homogéneo y potencia de la bomba

Estructura	Hormigón
Largo	4,090 m
Ancho	1 m
Altura	4 m
Potencia de la bomba	0,3076 hp

Nota. Tomado de García (2021)

Nota. Tomado de García (2021)

En relación con la Tabla 9, en la altura se pudo modificar hasta unos 40 o 50 cm con el objetivo de que exista un colchón de aire para que cuando se lleve a cabo la implementación

de las bombas sumergibles en el tanque de flotación y de expulsión de sulfuro, estas gocen de un funcionamiento adecuado, así como para evitar desbordes en el tanque. Se utilizó una bomba sumergible de 0,5 HP.

4.11.6. Diseño del tanque de flotación por aire directo DAF

El proceso de flotación está supeditado fundamentalmente a los niveles de eficiencia de la disolución del aire en las aguas. El sistema utilizó un tanque de saturación, en el que se inyectó aire desde la zona profunda a un volumen de agua. En este proceso, las partículas componen un manto estable en la zona superficial de la cámara. El dimensionamiento se observa en la Tabla 10.

Tabla 10. Dimensionamiento de comuna de flotación con inyección de aire

Geometría del compartimiento	Rectangular
Caudal de diseño (Q_D)	6,5441 m ³ /h
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	12 horas
Altura útil de compartimiento (h)	4 m
Ancho de compartimiento (a)	1 m
Longitud de compartimiento	3,2721 m

Nota. Tomado de García (2021)

- i) Cálculo del volumen requerido para la columna de flotación por inyección de aire

Ecuación N.º 7. Volumen del tanque

$$\text{Volumen del tanque de flotación (m}^3\text{)} = Q_D \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right) * \text{THR(h)}$$

$$= 1,0907 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right) * 12(\text{h})$$

$$= 13,0882 \text{ m}^3$$

- ii) Cálculo de la longitud del tanque de aireación

Ecuación N.º 8. Longitud del tanque

$$l_1(\text{m}) = \frac{\text{Volumen del tanque}}{h(\text{m}) * a(\text{m})}$$

$$l_1(m) = \frac{13,0882 \text{ m}^3}{4(m) * 1(m)}$$

$$l_1(m) = 3,2721 \text{ m}$$

iii) Cálculo de la potencia de los aireadores superficiales

Caudal de agua residual : 26,18 m³ / día

Volumen del tanque reactor aeróbico (m³): 2,00

Concentración DBO₅ Entrada (mg/L): 1763

A fin de establecer la potencia adecuada de los aireadores que expulsan la concentración total DBO₅, resultó oportuno conocer la concentración de DBO₅ neto y DBO₅ total que debió remover en dicha fase, así como el oxígeno empleado para el removimiento señalado.

iv) Cálculo de la concentración DBO₅ a remover en la columna de flotación en unidades de kg/día:

Ecuación N.º 9. Remoción de DBO₅ en la columna de flotación

$$\text{DBO}_5 \text{ Neto} = \text{DBO}_5 \text{ in} - \text{DBO}_5 \text{ out} \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right)$$

$$\text{DBO}_5 \text{ Neto} = 1,763 - 585 \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right)$$

$$\text{DBO}_5 \text{ Neto} = 1,178 \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right)$$

Ecuación N.º 10. Concentración a remover DBO₅

$$\text{Concentración a remover DBO}_5 \left(\frac{\text{mg}}{\text{día}} \right) = \text{DBO}_5 \text{ Neto} \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) * Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right) / 1000 \text{ L}$$

$$\text{Concentración a remover DBO}_5 \left(\frac{\text{mg}}{\text{día}} \right) = 1,178 \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) * 26,18 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right) / 1000 \text{ L}$$

$$= 30,84$$

El requerimiento de oxígeno (O₂) para el removimiento de DBO₅, por lo general se asume entre 1 y 2 kg para remover 1kg DBO₅.

Ahora, tomando en consideración un requerimiento de 1,8 kg de O₂ para remover 1 kg DBO₅, se tuvo lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{O}_2 \text{ necesario } \left(\frac{\text{kg O}_2}{\text{día}}\right) &= \text{concentr DBO}_5 \left(\frac{\text{kg}}{\text{día}}\right) * \text{requer O}_2 \left(\frac{\text{kg O}_2}{\text{día}}\right) \\ &= 30,84 \left(\frac{\text{kg}}{\text{día}}\right) * 1,8 \left(\frac{\text{kg O}_2}{\text{día}}\right) \end{aligned}$$

con respecto a la potencia de aire, fue una opción también usar una potencia de 2 hp, tal como se aprecia en la Tabla 11.

Tabla 11. Condiciones y potencia necesaria para la columna de flotación por inyección de aire

DBO₅ Neto	1,178
Contaminación a remover (kg/día)	30,84
O₂ necesario ($\frac{\text{Kg O}_2}{\text{día}}$)	46,26
Potencia necesaria (hp)	2

Nota. Tomado de García (2021)

Nota. Tomado de García (2021)

4.11.7. Diseño del tanque de coagulación y floculación

Cálculo de la cantidad de reactivos químicos a utilizar

$$14 \text{ ml Na OH} = \frac{5 \text{ moles de NaOH}}{100 \text{ ml solución}} * \frac{13088 \text{ l}}{0,5 \text{ l}} * \frac{40 \text{ g}}{0,1 \text{ mol}} = 732.928 \text{ g}$$

$$4 \text{ ml sulfato de aluminio} = \frac{10 \text{ g sulfato de aluminio}}{100 \text{ ml}} * \frac{13088 \text{ l}}{0,5 \text{ l}} = 10470.4 \text{ g}$$

$$3 \text{ ml poliacrilamida} = \frac{1 \text{ g poliacrilamida}}{100 \text{ ml}} * \frac{13088 \text{ l}}{0,5 \text{ l}} = 785.28 \text{ g}$$

Este tanque tuvo una forma cilíndrica a fin de favorecer el mezclado. El volumen que ocupó es de 13,0882 m³, y tuvo una palea de tipo rasqueta capaz de llevar a cabo uniformemente la agitación y, por consecuencia, el mezclado.

i) Cálculo de la cantidad de reactivos químicos a utilizar

La cantidad de reactivos químicos para su uso en el tanque de coagulación y floculación se observa en la Tabla 12.

Tabla 12. *Cantidad de reactivos químicos a utilizar en el tanque de coagulación y floculación*

Reactivos químicos	Cantidad (kg)
Hidróxido de sodio	0,7329
Sulfato de aluminio	10,4794
Poliacrilamida	0,7853

Nota. Tomado de García (2021)

Nota. Tomado de García (2021)

La adición del neutralizante y del coagulante tuvieron que llevarse a cabo a la par, con una agitación de 80 RPM durante 5 minutos. Seguidamente, la sedimentación fue beneficiada gracias al añadido del producto coagulante con una agitación lenta de 20 RPM durante 10 minutos.

4.12. Análisis financiero del diseño de la planta de tratamiento de las aguas residuales a implementarse en la empresa de curtido Alianza Virgen de la Asunción SCRL

Se elaboró un análisis financiero para precisar la viabilidad del proyecto de implementación de la planta de tratamiento en la empresa de curtido. Este análisis contó con un indicador financiero, a fin de ratificar los datos conseguidos y examinar la eficacia del plan. Se estudiaron los resultados para precisar la conveniencia en relación con las multas y penalidades aplicadas por ley en caso de que no se sigan las normas dictadas de los vertimientos:

4.12.1. Determinación de los costos de inversión

Fueron precisados por el valor promedio de los equipos con los cuales se va a instalar la planta de tratamiento. Esto se expone en la Tabla 13.

Tabla 13. Costos de inversión del proyecto

Equipo	Costo (\$)	Depreciación (10 %) (\$)
Trampa de grasas	300.00	0
Bomba de agua	635.00	63.50
Tanque sulfurado	9,465.00	946.50
Tanque de precipitación de cromo	4,300.00	430.00
Homogeneizador	5,430.00	543.00
Tanque de flotación con aire	5,200.00	520.00
Tanque de coagulación y floculación	5,200.00	520.00
Tamices	150.00	0
Adaptador de tamices	60.00	0
Biorreactor de membrana	4,000.00	400.00
Mano de obra	6,000.00	0
Valor total	40,740.00	3,423.00

Nota. Tomado de García (2021)

Nota. Tomado de García (2021)

La inversión inicial para el proyecto rondó cerca los \$ 40 740.00, tal como se muestra en la Tabla 13. Dentro de dicho monto se encuentran englobados la fabricación de trampa de grasas, la bomba de agua y los tanques necesarios para llevar a cabo los procesos de tratamiento de aguas.

4.12.2. Determinación de los ingresos anuales

A fin de elaborar los ingresos anuales de la compañía se tomaron en consideración condiciones permanentes y un año comercial de 310 días.

La compañía, más allá de efectuar las actividades propias del curtido, alquila las instalaciones para que demás compañías lleven a cabo la misma actividad.

El alquiler de la planta se efectúa tres veces por mes y tiene un costo de \$ 1500.00 por cada período alquilado.

Al mismo tiempo, la fabricación de cueros se lleva a cabo una vez al mes, promediando 120 pieles curtidas, las cuales cuentan con cerca de 430 dm (decímetros), con un costo por decímetro de \$ 3.20. En promedio, cada piel costó 137.00.

El total de los ingresos anuales se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. *Ingresos anuales de la empresa de curtido Alianza Virgen de la Asunción SCRL*

Tipos de ingresos	Ingresos anuales (\$)	Total (\$)
Fabricación de pieles	1440 pieles * (430/10 * 3.20)	198 144.00
Alquiler	4500.00 * 12	54 000.00
Ingresos totales		252 144.00

Determinación de los costos de operación

Tabla 15. *Costos de operación anualizados*

Tipo de costo	Costo operacional (\$)
Productos químicos para el curtido	24 000.00
Pielés	30 000.00
HCL 37 %	76 800.00
NaOH al 98 %	54 240.00
Poliacrilamida 1 % (coagulante)	4800.00
Costos energéticos	14 400.00
Costos de operación totales	228 240.00

Nota. Tomado de García (2021)

Nota. Tomado de García (2021)

En la Tabla 15 se evidenció los costos de operación analizados. Mediante la recuperación del sulfuro de sodio en el proceso, se redujeron los costos de operaciones relativos a los productos químicos para el curtido en un 7,3 % anualmente.

4.12.3. Elaboración del flujo de caja proyectado

Se diseñó un flujo de caja proyecto a cinco años. Este diseño cuenta con un impuesto sobre la utilidad gravable del 29.5 %, el cual se precisó para mirar la viabilidad del proyecto a mediano plazo. El proyecto no contó con la ayuda de préstamos bancarios, dado que la inversión inicial estuvo a cargo del empresario. El porcentaje de inflación anual se calculó en 3 %. Los resultados se

Tabla 16. Flujo de caja proyectado a cinco años

Años	0	1	2	3	4	5
Ingresos		252 144.00	259 708.00	274 836.96	283 082.07	291 574.53
Costos de operación		228 240.00	235 087.20	248 781.60	256 245.05	263 932.40
Depreciación de equipos		3423.00	3423.00	3423.00	3423.00	3423.00
Utilidad gravable		20 481.00	21 198.12	22 632.36	23 414.02	24 219.13
Impuesto 29.5 %		6041.90	6253.45	6676.55	6907.14	7144.64
Utilidad neta		14 439.10	14 944.67	15955.81	16 506.88	17 074.49
Inversión	40 740.00					
Recuperación de sulfuro		1753.00	1753.00	1753.00	1753.00	1753.00
Flujo de caja neto	-40 740.00	16 192.00	16 697.67	17 708.81	18 259.88	18 827.49

Nota. Tomado de García (2021)

4.12.4. Determinación del valor presente

Para precisar de modo matemático la factibilidad de la propuesta se presenta el indicador económico valor presente neto (VPN), a fin de saber si una financiación cumple con el objetivo básico financiero de maximizar la financiación inicial. La tasa de interés de oportunidad se determinó en 3 %.

Cálculo de la fórmula de VPN:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+k)} + \frac{F_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+k)^n}$$

Las variables que presenta la fórmula del Valor Presente Neto o VAN son las siguientes: inversión inicial previa (I_0), flujos netos de efectivo (F_t), tasa de descuento (k) y número de periodos que dure el proyecto (n).

Los criterios de decisión sobre el Valor Presente Neto se fundamentan en lo siguiente:

$VAN > 0$: la tasa de descuento elegida generará beneficios.

VAN = 0: el proyecto de inversión no generará beneficios ni pérdidas, de manera que su realización será indiferente.

VAN < 0: el proyecto de inversión generará pérdidas, lo que implica su rechazo.

$$\begin{aligned}
 VAN &= -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+k)} + \frac{F_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+k)^n} \\
 &= -40,740.00 + \frac{16912.10}{(1+0.03)} + \frac{16697.67}{(1+0.03)^2} + \frac{17708.81}{(1+0.03)^3} + \frac{18259.88}{(1+0.03)^4} + \frac{18827.49}{(1+0.03)^5} \\
 &= -40,740.00 + 15,720.49 + 15,739.16 + 16,206.47 + 16,223.79 + 16,240.40 \\
 &= -40,740.00 + (80,130.31) \\
 &= 39,390.31
 \end{aligned}$$

Se tuvo que el resultado fue mayor a cero, de modo que el VPN es de \$ 39 390.31, lo que indica que la propuesta contó con factibilidad, y constituye una ganancia neta durante los cinco años.

4.13. Conclusiones

- La caracterización del agua residual de la compañía de curtido modelo Alianza Virgen de la Asunción SCRL realizada en el laboratorio Tyspa Peru brindó los resultados de los parámetros y su conformación, donde se evidenció una concentración de cromo de <0.001 mg Cr(VI)/L, de sulfuros de <0.00045 mg S₂/L, DBO 25.2 mg O₂/L y DQO de 94.2 mg O₂/L, respectivamente; pH de 7.80, aceites y grasas <0.5 mg/L, sólidos sedimentales (SS) 1.5 mL SS/L, Sólidos Totales en Suspensión (TSS) 10 mg TSS/L.
- En el muestreo de los efluentes residuales que se hizo en la compañía de curtido se notó que las descargas de las aguas vertidas carecen de cualquier tipo de tratamiento. Asimismo, contienen sólidos totales, sulfuro y cromo, ocasionando así la polución de las aguas de la zona industrial de Trujillo.
- La propuesta planteada es económicamente factible, debido a que la financiación se

recuperaría en torno a los tres años siguientes y el VPN representa una utilidad neta de \$ 39 390.31, lo cual se entiende como una rentabilidad para la compañía, pues se evitarían penalidades ante las autoridades ambientales, dado que se disminuiría los niveles de contaminación.

- En el diseño de la planta de tratamiento para la compañía de curtido se tuvo en consideración el siguiente proceso: en primera instancia, se realiza el crinado a través de los tamices 14 y 40 en acero inoxidable ubicados dentro de una tubería de 3 pulgadas, seguido de una trampa de grasas (4,2 m. x 2,8 m.) que comunica a una serie de tanques donde se llevaría a cabo la remoción de cromo y sulfuro; en segundo lugar, el efluente es trasladado a un tanque de homogenización donde será estabilizado, para luego ser colocado en el tanque de flotación por aire directo, en donde se espera la remoción de un 85 % de sólidos suspendidos; en última instancia, el tanque de coagulación y floculación, donde realizó la dosificación de sulfato de aluminio (800 mg/L) y de poliacrilamida (60 mg/L) en el orden dando, y en el cual, además, se expulsó la materia en suspensión.

4.14. Recomendaciones

- Se recomienda realizar los tratados de agua apropiados a los sólidos generados en las distintas fases del sistema de tratado, puesto que constituyen una enorme carga de contaminantes procedentes del proceso productivo del curtido.
- Se sugiere optimizar la eficiencia de la expulsión de las grasas en todas las fases de modo que se impida el taponamiento y perjuicios en las tuberías y equipos.
- Se sugiere a la empresa el seguimiento del estado de los efluentes residuales tras el tratamiento para comprobar el correcto funcionamiento y el cumplimiento de los parámetros, caracterizando las aguas cada año.
- Instalar biorreactores de membrana con la capacidad de generar un recurso hídrico de calidad apta para su directa reutilización.

Capítulo V

Aguas residuales: tratamiento y cuidado ambiental

Un tema subyace a todos los temas abordados a lo largo de este libro (los peligros de la industria de la curtiembre y el tratamiento de aguas residuales), a saber: el cuidado ambiental. Hablar de cuidado del medioambiente supone hacer referencia a las estrategias de protección del planeta mediante la adquisición de hábitos o costumbres que contribuyan a la disminución de la polución, el ahorro de energía y preservar los diversos recursos naturales.

En este ámbito, las industrias desempeñan un papel preponderante por ser actores potencialmente contaminantes. Las aguas industriales son aquellas usadas en las compañías y que, por su elaboración, transformación y producción, transforma toda su conformación: su constitución es química, física y biológica. Existen industrias clandestinas que no vienen regidas por un estricto control de sanidad, de modo que contaminan en enormes cantidades los ríos y, por consiguiente, también los mares. Los residuos generados en estas industrias son trasladados a través de una red de alcantarillado que muchas veces tampoco se encuentra bajo controles minuciosos.

Este último capítulo está orientado a brindar unas perspectivas complementarias acerca del tratamiento de aguas residuales y el cuidado ambiental en general. En la primera sección se exponen los atributos del método de biorremediación (alternativa con una notoriedad en crecimiento actualmente) utilizado en la depuración de aguas residuales. La segunda sección tiene por finalidad brindar un panorama general sobre la evolución de las discusiones internacionales en torno al cuidado ambiental. De igual manera, se comenta a detalle el proceso que ha experimentado el marco normativo ambiental en el Perú, desde el pasado hasta la actualidad. En última instancia, se realiza un breve listado de diferentes alternativas tecnológicas para el tratado de aguas residuales, subrayando las ventajas y desventajas de cada una.

5.1. La biorremediación como método para la limpieza de aguas contaminadas

La biorremediación constituye un proceso natural que emplea organismos vivos (bacterias) para expulsar determinados contaminantes concretos presentes en el suelo, el agua o el aire. Las bacterias se alimentan de las sustancias contaminantes, lo que hace de este proceso uno

autosostenible y completamente natural. Este método es sumamente valorado y empleado en el ámbito de las aguas residuales; no obstante, esta alternativa ha proporcionado evidencias de ser uno de los procesos óptimos, selectivos y rentables para el tratamiento del agua.

Dentro de la extensa escala de tecnologías con la capacidad de alcanzar el objetivo de la sostenibilidad, la biorremediación, entendida como la implementación de microorganismos, hongos o plantas procedentes de ellos para la recuperación del medioambiente, podría adoptar un papel preponderante. Esta tecnología opera mediante las intervenciones de la variedad biológica para los objetivos de mitigación (y cada vez que se pueda, la expulsión total) de las consecuencias perjudiciales producidas por las sustancias contaminantes en un lugar específico.

El concepto de «biorremediación», introducido a inicios los 80, tiene origen en el término de remediación que alude a la puesta en práctica de estrategias fisicoquímicas para impedir el menoscabo y la polución de los suelos. En el caso concreto de la biorremediación, esta se enfoca en la remediación biológica, sustentada fundamentalmente en la facultad de los organismos vivos a fin de descomponer de manera natural determinadas sustancias contaminantes. Los sistemas biológicos usados con regularidad son microorganismos o vegetales.

La biorremediación brinda la posibilidad de disminuir o expulsar los residuos potencialmente nocivos contenidos en el medioambiente, de manera que se pueden emplear para purificar terrenos o aguas contaminadas, puesto que su rango de aplicación es bastante extenso, pudiendo incluso entenderse como objeto de reparación cada uno de los estados de la materia: sólidos (suelos), o bien concretamente en lodos, remanentes, entre otros; líquidos, en aguas superficiales, subterráneas y residuales; o gases, procedentes de las emisiones industriales.

Garzón *et al.* (2017) explican los beneficios de la biorremediación, donde se destaca, por ejemplo, que tiende a tener costos más reducidos, genera una menor intromisión en el lugar contaminado y, por consiguiente, un perjuicio ecológico menos sustancial en el proceso de deterioro de los productos contaminantes. La biorremediación puede realizarse en el sitio específico, quitando así los gastos por transporte y pasivos, lo que posibilita que el empleo y fabricación industrial del sitio pueda seguir en tanto el proceso de biorremediación se está llevando a cabo.

En adición, la biorremediación es susceptible de ser incorporada con otras tecnologías en cadena, beneficiando el tratado de residuos combinados y complejos, y es capaz de disminuir o

degradar de manera infalible las sustancias contaminantes producto del proceso de remediación. Por otro lado, una ventaja manifiesta en el empleo de materiales renovables que ha incentivado la biorremediación de múltiples ambientes corrompidos está vinculada con cáscaras de semillas de girasol, maní y arroz; tallos y derivados del algodón, hierbas variadas, pulpa de café, madera, aserrín, etc. (Garzón *et al.*, 2017).

La biorremediación se encuentra también en el eje de la discusión acerca de las posibilidades que proporciona como tecnología en relación con las naciones en vías de desarrollo. Quienes apoyan la biotecnología ambiental sostienen que las tecnologías de lo vivo son más adecuadas para solucionar asuntos críticos que tienen impacto en el mundo en vías de desarrollo, puesto que, prospectivamente, la actualización en la aplicación de estas biotecnologías puede traer consigo la remediación de la pobreza, mejor sanidad, el logro de mayores cotas de bienestar material y, a mayor escala, una optimización de la calidad de vida de las personas de las naciones en vías de desarrollo.

La biorremediación puede ser practicada en un sitio propio de la contaminación, procedimiento conocido como biorremediación *in situ*, o, de no ser el caso, se realiza en un sitio aislado, entendido como biorremediación *ex situ*. En cuanto a la modalidad *ex situ*, la matriz contaminada es transferida a otro sitio.

5.1.1. Biorremediación in situ

Concretamente existen cuatro modalidades de biorremediación *in situ*: atenuación natural, bioventeo, bioestimulación y bioaumentación. La modalidad de atenuación natural tiene que ver con el proceso propio de biorremediación, el cual está supeditado a múltiples factores físicos, químicos y biológicos que, en contextos adecuados, operan sin la participación humana para disminuir la masa, volumen, toxicidad o concentración de las sustancias contaminantes. El bioventeo se trata de aprovisionar aire e incluso nutrientes al sector contaminado por medio de la adaptación de una red de tuberías; se destaca por proporcionar tasas «prudentes» de aire para incentivar el metabolismo aerobio de los microorganismos y fomentar la oxidación de las sustancias contaminantes, a la vez que se reduce la vaporización de las sustancias contaminantes a la atmósfera. La bioestimulación es una técnica bastante semejante al bioventeo, que consiste en incrementar la actividad de los microbios endógenos de los terrenos contaminados mediante el

suministro de nutrientes, oxígeno, o agua, o al transformar otras variables ambientales. No obstante, el método de bioestimulación tiene sus desventajas, puesto que a veces los suelos no presentan los microorganismos apropiados para descomponer las sustancias contaminantes o la conglomeración de estos es alta. Por último, la bioaumentación es el método por medio del cual se agregan microorganismos al ambiente corrompido con la finalidad de precipitar la biorremediación (Cota-Ruíz *et al.*, 2018).

5.1.2. Biorremediación ex situ

Dentro de las modalidades de biorremediación *ex situ* están la tecnología de tratado de suelos frecuentemente conocido como *landfarming*, el composteo, las biopilas y los biorreactores. El *landfarming* trata de retirar el suelo corrompido y depositarlo sobre una cama anticipadamente acondicionada en cuyo fondo se coloca una geomembrana. A grandes rasgos, las superficies de suelo excavadas varían entre los 10 y 35 cm. Con el suelo ya vaciado en la cama, se activan los consorcios microbianos para que comiencen con el deterioro de los contaminantes. Por otra parte, el composteo constituye un proceso de descomposición de desechos orgánicos sustentado en el metabolismo microbiano anaerobio que, por lo regular, se realiza a temperaturas que oscilan entre los 55 y 65 °C.

El método de biopilas consiste en combinar suelos anticipadamente acondicionados, para posteriormente ubicarlos en un área determinada; la biorremediación se realiza empleando aireación. Múltiples criterios como la humedad, nutrientes, calor, oxígeno y alcalinidad se encuentran bajo supervisión. Cabe indicar que la aireación y el propio sistema de control de nutrientes se pueden llevar a cabo bien sea por vacío o por presión positiva. En la práctica, la utilización de biopilas ha terminado por ser una estrategia eficiente para recuperar lugares corrompidos con petróleos. Por último, se puede utilizar la tecnología de los biorreactores para el tratamiento de materiales sólidos o aguas contaminadas. En concreto, las matrices contaminadas son trasladadas a recipientes con inóculos, nutrientes y criterios supervisados para su biorremediación. Los biorreactores de sólidos en suspensión son uno de los más utilizados para biorremediar suelos corrompidos a causa de su facultad para manejar los contextos de operación y para incrementar la actividad microbiana. Los biorreactores sólidos son depósitos dotados para generar condiciones de tres estados de la materia y para aumentar los índices de biorremediación

de los contaminantes al incrementar la biodisponibilidad de las sustancias contaminantes hacia la biomasa (Cota-Ruíz *et al.*, 2018).

La biorremediación ha demostrado ser una opción para incentivar nuevos sistemas de purificación para aguas residuales y mejorar los sistemas convencionales. La bioestimulación, bioaumentación y fitorremediación son alternativas tecnológicas de biorremediación eficientes para la expulsión de contaminantes en una diversidad de entornos. Asimismo, estas alternativas tecnológicas son de bajo costo económico e impacto ambiental, por su reducido consumo energético y baja producción de lodo, a diferencia, por ejemplo, de las técnicas de tratado fisicoquímico.

De acuerdo con Ome & Zafra (2018), la biorremediación de aguas residuales puede categorizarse en tres tecnologías esenciales: (i) depuración natural, donde las sustancias contaminantes disminuyen por la acción de microbios nativos sin ningún tipo de ayuda exterior; (ii) la bioestimulación, donde se agregan nutrientes al sistema para precipitar la biodegradación; y (iii) bioaumentación, donde se agregan microbios especializados al sistema de tratado a fin de optimizar su eficiencia. Por su parte, la fitorremediación se constituye como una alternativa tecnológica potencial de biorremediación, donde plantas especializadas tuvieron la capacidad de absorber, acumular o metabolizar las sustancias contaminantes contenidas en los efluentes residuales. Los factores esenciales de tales técnicas de biorremediación fueron el contenido de materia orgánica, oxígeno diluido, pH, nitrógeno, etc.

5.2. Marco normativo para garantizar el cuidado ambiental

En junio de 1972, se realizó en Estocolmo la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, que significó un parteaguas en la creación de un marco normativo ambiental a escala internacional. En dicha conferencia, 113 naciones suscribieron la Declaración de Estocolmo y el Plan de Acción para el Medio Ambiente Humano, colocando los asuntos medioambientales al frente de las consternaciones en el marco internacional. La conferencia derivó a la realización del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), y dio pie a un diálogo trascendental entre las naciones industrializadas y en vías de desarrollo acerca de las relaciones entre el medioambiente, el progreso económico y el bienestar humano.

Luego de Estocolmo, las Naciones Unidas inicia la transición con la conformación de un conjunto de especialistas en el asunto conocido como la comisión Brundtland, que, constituido en 1983,

consigue realizar en el curso de su actividad de estudio el documento *Nuestro Futuro Común*, publicado en 1987, donde se examina la categoría «desarrollo sostenible» que ha sido precursora en la elaboración de las bases ambientales en materia legislativa. El desarrollo sostenible anota que se tiene que garantizar que la especie humana satisfaga las necesidades actuales sin sacrificar por ello la capacidad de las siguientes generaciones para suplir las suyas.

De acuerdo con el desarrollo sostenible, a fin de conseguir una armonía entre el modelo de desarrollo capitalista y el medioambiente, resulta fundamental que sean captadas alternativas tecnológicas ambientalmente viables para fortalecer la producción (lo que manifiesta el desencuentro en su discurso, dado que en dicho documento se explica en la introducción del problema que el desarrollo conocido de las fuerzas productivas es desde ya inviable a nivel ambiental). De este modo, se hace responsable a la ciencia y la tecnología de la solución del asunto ambiental, atribuyéndoles la capacidad intrínseca de ofrecer soluciones, cuando las construcciones que se autoidentifican como científicas en el marco del mito iluminista tiene *a priori* el propósito de manipular sin conocer. Esta actitud no asegura la solución al problema ambiental, debido a que las metas no están sustentadas en una conciencia de la realidad, sino en los desarrollos de la industria que fomentan las victorias científicas y técnicas funcionales al modo de producción (Huertas & Cardona, 2008).

El informe de 1987 guarda una visión problemática de Latinoamérica en cuanto señala que su desarrollo en el modelo de progreso contemporáneo provoca un mayor nivel de degradación de los ecosistemas, subrayando que los inapropiados usos de los recursos de parte de las comunidades pobres (a causa de su poco conocimiento) generan un impacto pernicioso sobre el medioambiente. Este argumento enmascara la realidad de que los directos responsables del deterioro ambiental son las naciones desarrolladas o de primer mundo, las cuales detentan un gran número de industrias y fomentan la extracción de materias primas y recursos en los países de desarrollo intermedio. La deuda biológica que sigue a esta actividad es, en un gran número de casos, irrecuperable.

La evolución del derecho ambiental se ha sostenido alrededor de los principios que la fundan, desde lo planteado en la Conferencia de Estocolmo de 1972, la Carta Mundial de la Naturaleza de 1982 y, aun, la Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo de 1992. Gorosito (2017) indica que en aquellas declaraciones se concentran los principios inspiradores del derecho ambiental internacional. La Declaración de Río revalida lo planteado en Estocolmo, en especial

con respecto a la idea de que el hombre se encuentra en el eje de todo el asunto ambiental, alineado en esto con la perspectiva judeocristiana de universo en lo que se diferencia notoriamente con el enfoque de la Carta de la Naturaleza, donde la especie humana es comparable a otras especies presentes en el planeta. En concreto se pueden reconocer, en esos documentos, los siguientes principios transversales:

- Responsabilidad por el empleo soberano de los recursos ambientales
- Evaluación del impacto ambiental
- Notificación instantánea de desastres naturales y demás circunstancias de emergencia
- Los deberes de información, notificación previa y consulta pertinente a los demás Estados en caso de prácticas potencialmente perjudiciales
- La responsabilidad compartida pero distinguida que implica patrones ambientales homogéneos y derechos y obligaciones asimétricas
- El principio de precaución
- El principio de que el actor contaminante paga (contaminador pagador)
- El principio de la internacionalización del costo ambiental

5.2.1. Marco normativo ambiental en el Perú

El trayecto hacia la promulgación de la nueva *Ley de Agua* fue arduo. En ese proceso, fueron visibilizados los múltiples actores sociales implicados en la gestión del agua y las medidas de fuerza y presiones entre los diversos sectores para proteger sus intereses. La negociación conseguida entre la Junta Nacional, el Gobierno y las diferentes bancadas políticas en el Congreso dieron pie a la promulgación de la ley.

Con la Ley N.º 29338, *Ley de Recursos Hídricos* (2009), se revalida que el agua no es una propiedad privada, sino patrimonio del país. Se establece la Autoridad Nacional del Agua (ANA) como un organismo público descentralizado y supeditado al Ministerio de Agricultura, que se encarga de la gestión exclusiva y se establece como el ente rector. El consejo directivo está constituido por un portavoz de los ministerios de Agricultura, Ambiente, Vivienda y Construcción, Energía y Minas, y Salud; un portavoz de los sectores públicos productivos, un portavoz de los

Gobiernos regionales, municipalidades rurales, gremios de usuarios agrarios y de usuarios no agrarios, un portavoz de las comunidades campesinas, nativas y de la autoridad marítima nacional.

La ley actual contempla los más diversos puntos que habían sido exigidos por los múltiples sectores; no obstante, se trata de una suma de propuestas y de intereses de diversos actores económicos y políticos. La ley fue elaborada, en primera instancia, por los funcionarios de la Intendencia de Recursos Hídricos, a la que se agregó exigencias de la Junta Nacional de Usuarios, de la Sociedad Nacional de Minería, industrias, etc., pero que fue modificada también por las diversas bancadas del Congreso y por las múltiples fuerzas políticas (Oré & Rap, 2009).

La nueva normatividad del agua constituye un proyecto para recobrar la autoridad estatal en la administración del agua y restituir el sesgo agrícola de la antigua ley y el vacío de autoridad generado por la transferencia. En efecto, la nueva *Ley de Recursos Hídricos* intenta restringir el poder de los usuarios, que aumentó de manera excesiva de acuerdo con los ingenieros-funcionarios.

Siguiendo con Oré & Rap (2009), esta ley actualiza la administración del agua, integra nuevas categorías como «gestión integrada del agua», la cuenca como unidad de administración, la planificación del territorio, e identifica las múltiples clases de actores presentes en la cuenca, así como los derechos consuetudinarios para las comunidades. No obstante, existen artículos que recuperan parte del Decreto Legislativo N.º 1081, identificando la presencia del sector privado bajo la figura de los operarios y de la concesión. Se preserva el modelo de una nación homogénea, donde todos los usuarios del agro son semejantes, y su visión sigue siendo la costa: los enormes proyectos de irrigación.

Ahora bien, es importante indicar que los planes de avance en el empleo y aprovechamiento de efluentes residuales tratadas en el Perú constituyen parte fundamental de los planes de mitigación y adaptación al cambio climático (PMACC) y las aportaciones nacionalmente determinadas (NDC), entendidos como herramientas de gestión integral para el cambio climático. En ese sentido, desde 2016 se dio pie al proceso de los PMACC, para lo cual fue importante llevar a cabo los reajustes normativos en el sector saneamiento. La meta consistía en cerrar las brechas y propiciar un mayor acceso a dicho servicio, dado que la falta de infraestructura física y el déficit en la calidad de los servicios de agua y saneamiento permanecen siendo asuntos centrales para el Estado

peruano. Con todo, fue autorizada la Política Nacional de Saneamiento (PNS), que propone como metas conseguir el aumento de cobertura, calidad y sostenibilidad de los servicios de saneamiento, tomando en consideración la relativa pobreza y desigualdad agudizadas por los impactos del cambio climático (Paucar & Iturregui, 2020).

Más adelante, fue aprobado el Plan Nacional de Saneamiento 2017-2021, entendido como herramienta de aplicación de la PNS y la norma macro del sector. Este dispositivo articula y relaciona las prácticas del sector saneamiento, con la finalidad de conseguir en los siguientes cinco años el acceso y la cobertura universal a los servicios de saneamiento de modo sostenible y con la calidad apropiada. De igual manera, se encuentra emparentado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y las sugerencias de los informes de la OCDE, en compañía con el gobierno corporativo y la Política Nacional Ambiental. Con miras a ratificar la cobertura universal en cantidad necesaria y calidad apropiada para suplir las urgencias de la población, el mencionado plan plantea dentro de sus objetivos de planificación, administración e inversión las prácticas claves para afrontar los efectos del cambio climático y el cuidado del medioambiente, para frenar el peligro de desastres naturales, en combinación con las organizaciones vinculadas con la gestión integradas de recursos hídricos (GIRH).

Acerca de la política nacional del ambiente como fundamento de la gestión ambiental pública en el Perú, se estableció la Política Nacional del Ambiente del 2009, admitida por Decreto Supremo N.º 012-2009-MINAM (2009). La estructura de dichas políticas se encontraba constituida por directrices que, más allá de los contemplados de antemano por la *Ley General del Ambiente*, incorpora las directrices o principios de transectorialidad, análisis costo-beneficio, competitividad, gestión por resultados, seguridad jurídica, mejora continua y cooperación público-privada. En adición, estaban presentes la meta general y las metas específicas; la sección central de esta política nacional constituía los ejes de política y todos los ejes portaban metas y pautas; por último, estas políticas tenían modelos de cumplimiento.

De acuerdo con Zea (2022), como producto de esta estructura se evidenció que no existía solidez en su elaboración en cuanto desde el comienzo no se ejecuta en la realidad, contraviniendo con todas las directrices de esta política. El principio de transectorialidad que propone toda práctica que impacta en el medioambiente merece ser compaginado con la totalidad de los niveles de Gobierno, a fin de mejorar los resultados, debido a que en el Estado no existe un organismo de

control oportuno en términos ambientales que consiga una tarea coordinada estatal. Por otro lado, el principio de mejora continua fue planteado en el marco del desarrollo sostenible, al tratarse de una categoría pasible de ser perfeccionada constantemente. Este principio no se aplica en la realidad, lo cual puede constatarse en condiciones anormales, como el caso de la pandemia que perjudica de modo directa la protección ambiental. No se manifiesta en la realidad una ejecución efectiva de las políticas ambientales para la optimización progresiva del medioambiente en el Perú incidiendo en el desarrollo sostenible. Antes bien, existe la sensación de un empeoramiento constante.

En un análisis comparativo con respecto a otras políticas ambientales en América Latina, se ve que el Perú expresa una intención en promulgar leyes en materia ambiental, de tal modo que se sumó a un número sustancioso de tratados internacionales en temas ambientales. La fortaleza jurídica de este marco normativo debe estar afianzado en las demás características para su éxito como, por ejemplo, una inversión de capital constante. En el planeta, las naciones pueden estimar su salud ambiental a partir del Índice de Desempeño Ambiental, en el que Perú, en el momento en que se llevó a cabo el estudio, se encontraba en el puesto 81. En dicho Índice, las naciones con más éxito en el Cono Sur son Argentina, Ecuador, Brasil y Colombia, dado que la gestión ambiental se encuentra centralizada en un ministerio fortalecido con funciones concretas. Asimismo, las instituciones ambientales en sus correspondientes naciones tienen en promedio una experiencia de 16 años. En cambio, el Perú, pese a tener un Ministerio del Ambiente y una experiencia de 12 años, no proporciona una fortaleza para satisfacer de manera efectiva las políticas ambientales, tal como se explica en el resultado del Índice de Desempeño Ambiental (donde, actualmente, Perú ha superado su posición inicial) (Zea, 2022).

En Perú, alrededor del 2021, se renovó la Política Nacional del Ambiental, que funcionará desde el 2021 hasta el 2030. La estructura de esta política ambiental se compone de 9 objetivos prioritarios, 23 indicadores, 47 lineamientos y 64 servicios. Esta Política se aprobó por Decreto Supremo N.º 023-2021-MINAM. Desde el comienzo se nota que esta renovación goza de una pericia más minuciosa con respecto a su elaboración, sustentándose en una metodología con raíz en la ciencia y proveyendo un documento mejor confeccionado, de tal manera que lleva a cabo un diagnóstico al contexto ambiental del Perú. En el nuevo documento se reconocen los problemas ambientales y sus raíces. De hecho, un avance decisivo en esta política renovada es la

identificación de indicadores que, precisamente, posibiliten la realización de mediciones en torno a las metas proyectadas y, en función de ellos, sea posible configurar matrices con los datos pertinentes para su ejecución. Se percibe una modificación trascendental con respecto a su formato predecesor, que era poco precisa en sus puntos.

5.3. Beneficios de las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales

Los procesos de tratado de aguas residuales expulsan un conjunto de contaminantes del agua a fin de que esta pueda volverse a utilizar. Las ventajas del tratamiento están supeditadas a la naturaleza de las sustancias contaminantes en el agua y a la utilización posterior del agua tratada. Si bien la naturaleza, mediante la evaporación y las lluvias, purifica despaciosamente las aguas residuales con el tiempo, la ventaja elemental del tratamiento de los efluentes residuales consiste en preservar el agua en óptimas condiciones para su reutilización.

En cuanto a los tratamientos biológicos (diferentes a los tratamientos fisicoquímicos, de alta sofisticación y coste), el empleo de microalgas ha cobrado una reconocida atención en los últimos años. Estos microbios fotosintéticos son capaces de emplear nitrógeno y el fósforo de las aguas residuales para su desarrollo, a la par de detentar la capacidad de expulsar enormes cuantías de metales pesados a través de mecanismos de absorción y adsorción (Rosales *et al.*, 2018). Del mismo modo, propician asociaciones con bacterias capaces de favorecer la remoción de materia orgánica y disminución de sólidos suspendidos, a la par de consumir de manera directa compuestos orgánicos diluidos en dichas especies que expresan conductas de mixotrofia.

Actualmente, el mundo se encuentra a puertas de nuevos desafíos energéticos, dado que es sabido que las reservas de combustibles fósiles se acabarán en cincuenta años. Por tal razón, resulta vital explorar las fuentes de energía para el porvenir. En tal sentido, el uso de la biomasa podría suplir cerca del 25 % de las necesidades energéticas, la cual es, asimismo, una fuente de productos biotecnológicos, farmacéuticos y aditivos alimentarios.

La utilización de plantas comestibles para generar biocombustibles ha suscitado una intensa discusión que involucra asuntos de seguridad alimenticia. Los beneficios primordiales de las microalgas como fuente para la producción de biocombustible son los siguientes: índices de crecimiento elevados y breves lapsos de generación; requerimientos mínimos de tierra; elevado contenido de lípidos y ácidos grasos; por supuesto, el empleo de efluentes residuales como matriz

de nutrientes o captura de dióxido de carbono desde matrices contaminantes (Hernández-Pérez & Labbé, 2014).

Otro método de tratamiento de descontaminación de aguas residuales es la nanotecnología. Los asuntos emergentes en torno a la contaminación ambiental en el mundo demandan que constantemente se optimicen nuevas técnicas para la remediación y tratado de los recursos naturales, de los que el agua es el más vulnerable. De acuerdo con Chávez-Lizárraga (2018), la nanotecnología constituye una alternativa potencial para el cuidado del agua en el largo término con estrategias como la filtración, el uso de nanopartículas en catálisis y desalinación. De hecho, con el progreso de la nanotecnología, resulta posible impulsar tecnologías habituales utilizadas en el tratamiento de aguas como la adsorción, floculación y coagulación. En el pasado, la eficiencia de la nanotecnología ha destacado en las actividades de recuperación de aguas subterráneas, en biorremediación, en remoción de tintas y en procesos de filtración. Por consiguiente, las ventajas de la nanotecnología radican en su alta efectividad en cuanto al tratamiento de problemas vinculados con el agua, dado que el empleo de nanomateriales beneficia el desarrollo de tratamientos más eficaces y modernos de agua.

Son diversos los métodos, tanto biológicos como fisicoquímicos, propuestos y utilizados para el tratado de aguas residuales; por lo mismo, cada uno contiene diversos beneficios, pero también desventajas (por el exceso de requerimiento de energía, por el alto coste de operaciones, por el costo logístico, entre otras cosas). Entre todas, la tecnología DAF, por ejemplo, es un proceso de clarificación de las aguas para la discriminación de sólidos, grasas y aceites. También existe el proceso por lodos activados, en el que se emplea una masa de organismos en modalidad anaeróbica a fin de tratar el efluente residual y se utiliza para quitar organismos biodegradables del efluente residual industrial (tal como ocurre en las curtiembres). A continuación, se exponen las ventajas y desventajas de estos y otras alternativas tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales en la actualidad:

Tabla 17. Ventajas y desventajas de alternativas tecnológicas

Alternativa tecnológica	Ventajas	Desventajas
DAF (sistema de flotación por aire disuelto)	<ul style="list-style-type: none"> - Elevado nivel de eficiencia en el retiro de aceites y grasas, de hasta un 95 %. - Según la calidad del agua de ingreso, puede retirar entre el 10 % al 50 % de la DBO5. - La totalidad de grasas, sólidos livianos y sólidos pesados se retiran en una sola unidad, quitando así la necesidad de instalar procesos unitarios para retirarlos individualmente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Operador intensivo. - Energía intensiva. - Financiamiento superior sobre productos químicos y mantenimiento. - Retiran menos DBO (menos del 85 % en parangón con 90 % de los lodos activados)
DAF (sistema de floración por aire disuelto)	<ul style="list-style-type: none"> - Los períodos de retención relativamente cortos brindan la posibilidad de construir tanques pequeños, optimizando el espacio. - Se disminuye la presencia de pestilencias, gracias a los tiempos de retención breves y a la aireación. - Se tienen lodos más espesos que los conseguidos en sedimentadores primarios. 	<ul style="list-style-type: none"> - Presenta algunos problemas con sistemas de decantación. - Requiere un operador calificado e inspección y mantenimiento. - En diversas situaciones, el sistema carece de efectividad en la reducción de sólidos suspendidos como las unidades de

	<p>Al mezclarse con procesos de coagulación, se necesita menor cantidad de coagulante, debido a que la flotación no requiere que el floc sea pesado.</p>	<p>sedimentación por gravedad.</p> <ul style="list-style-type: none"> - La operación del sistema puede ser complicada.
<p>Lodos Activados</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Óptima resistencia a las cargas por impacto. - Puede permitir cargas orgánicas elevadas, en parangón con otros procesos de tratamiento biológico. - Se puede operar en una diversidad de índices de carga orgánica e hidráulica. - Alta disminución de DBO y patógenos (hasta un 99 %). - Se puede modificar para lograr límites de descarga específico. - Se ha originado variaciones al proceso original, lo cual representa alto grado de flexibilidad para tratamiento de diversos tipos de aguas residuales. - El régimen de mezcla completa ofrece ventaja 	<ul style="list-style-type: none"> - Propenso a complicados problemas químicos y microbiológicos. - El efluente puede necesitar tratamiento/ desinfección adicional antes de su descarga. - No todas las piezas y materiales pueden estar disponibles a nivel local. - Requiere diseño y supervisión expertos. - Elevado costo de capital; elevado costo de operación. - Se requiere una fuente constante de electricidad. - El efluente y los lodos requieren tratamiento secundario o una descarga apropiada.

puesto que el tanque de aireación proporciona un amortiguador, donde se suavizan hasta cierto punto las oleadas de las descargas.

RAFA (Reactor anaeróbico de flujo ascendente).

- Los reactores del tipo RAFA, presentan una serie de ventajas sobre los sistemas aerobios convencionales, la inversión principalmente es menor (costos de implantación y manutención).
 - Producción pequeña de lodos excedentes.
 - Consumo pequeño de energía eléctrica y simplicidad del funcionamiento.
 - Ellos son económicos, energética y ecológicamente.
 - Reducidos costos de financiación y operaciones vinculadas a la implementación de esta tecnología.
- Efluente con aspecto desagradable.
 - Remoción insatisfactoria de N y P.
 - Posibilidad de generación de malos olores.
 - Problemas para la granulación de la biomasa.
 - Puesta en marcha del sistema lento.
-

RAFA (Reactor anaeróbico de flujo ascendente).	<ul style="list-style-type: none"> - Alternativa para generación de biogás y de los lodos como fertilizante. - Consumo energético bajo y la operación no es compleja. - Eficiencia satisfactoria en la remoción de DBO. - Bajo rendimiento de área. - Reinicio rápido después de períodos prolongados de paralización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Relativamente sensible a las variaciones de carga. - Restringido al tratamiento de afluentes con bajas concentraciones de sólidos.
--	---	---

Nota. Tomado de Campoverde (2019)

Actualmente, se posee los recursos financieros, tecnológicos y humanos precisos para dar el siguiente gran paso en el avance de la humanidad. No obstante, de continuar las actuales tendencias, la civilización se encontrará bastante lejos de alcanzar los objetivos sostenibles que se ha planteado. Frente a esta crisis hídrica mundial, hace tiempo que se propone una gestión ecosistémica, alineada a las directrices del desarrollo sostenible. Esto significa que los recursos hídricos son limitados y que no se pueden preservar sin la protección de los ecosistemas acuáticos en condiciones adecuadas. La gestión eficiente tiene que sustentarse en el ahorro, la reutilización y la no polución del agua, todo ello como parte de un proyecto sostenible del territorio y una administración integrada de las cuencas hidrográficas. Con todo, se ve que la utilización de técnicas tanto para el suministro de agua potable como para el saneamiento y el tratamiento en todas sus escalas se presenta como una de las alternativas fundamentales.

Referencias bibliográficas

- Acuatécnica. (15 de mayo de 2018). *Tratamiento primario de aguas residuales*. Acuatécnica S.A.S. <https://acuatecnica.com/tratamiento-primario-aguas-residuales/>
- Arias-Lafargue, T., Salazar-Arrastre, P., Bessy-Horruitiner, T., Córdova-Rodríguez, V. & Rodríguez-Heredia, D. (2021). Opción de tratamiento para las aguas residuales del taller 1 de la empresa de fibrocemento. *Tecnología Química*, 41(1), 34-36. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852021000100034&lng=es&tlng=es.
- Ávila-García, P. (2015). Hacia una ecología política del agua en Latinoamérica. *Revista de Estudios Sociales*, 55, 18-31. <https://doi.org/10.7440/res55.2016.01>
- Camargo, A. & Camacho, J. (2018). Convivir con el agua. *Revista Colombiana de Antropología*, 55(1), 7-25. <https://doi.org/10.22380/2539472X.567>
- Campoverde, O. (2019). *Tratamiento de aguas residuales de una empresa industrial de congelados* [tesis de grado, Universidad de Piura]. Repositorio Institucional de la UDEP. <https://hdl.handle.net/11042/4397>
- Castillo, B., Ruiz, J., Manrique, M. & Pozo, C. (2020). Contaminación por plaguicidas agrícolas en los campos de cultivos en Cañete (Perú). *Revista Espacio*, 41(10), 11-22. <https://repositorio.unah.edu.pe/handle/UNAH/27>
- Castillo-Arteaga, M. (2022). Agua, enlaces, propiedades, poder disolvente, contaminación. *Vida Científica Boletín Científico De La Escuela Preparatoria No. 4*, 10(20), 1-5. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa4/article/view/9527>
- Ceja de la Cruz, Z. (2019). Tratamiento de aguas residuales. *Notas INCyTU*, (28), 1-6. https://foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU_19-028.pdf
- Chávez, A. (2010). Descripción de la nocividad del cromo proveniente de la industria curtiembre y de las posibles formas de removerlo. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 9(17), 41-19. <https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/6>
- Chávez-Lizárraga, G. (2018). Nanotecnología una alternativa para el tratamiento de aguas residuales: Avances, Ventajas y Desventajas. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 9(1), 52-61. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2072-92942018000100005&lng=es&tlng=es
- Congreso de la República. (2009, 30 de marzo). Ley N.º 29338, *Ley de Recursos Hídricos*. Diario Oficial El Peruano 4. <https://diariooficial.elperuano.pe/pdf/0113/LEYDERECURSOSHIDRICOSYREGLAMENTO.pdf>
- Corredor, J. (2006). El residuo líquido de las curtiembres estudio de caso: Cuenca alta del río Bogotá. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 16(2), 14-28. <https://doi.org/10.18359/rcin.1230>

- Cota-Ruiz, K., Nuñez-Gastelúm, J. A., Delgado-Rios, M., & Martinez-Martinez, A. (2018). Biorremediación: actualidad de conceptos y aplicaciones. *Biotecnia*, 21(1), 37-44. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v21i1.811>
- Freire, D. (2015). *Optimización de proceso de curtido y tratamiento de sus aguas residuales* [tesis de grado, Universidad Central de Ecuador]. Repositorio Institucional de la UCE. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/6043>
- Gálvez, L. H. (2005). Biología del fibrocartilago articular frente a las demandas funcionales. *Odontología Sanmarquina*, 8(1), 31-34. <https://doi.org/10.15381/os.v8i1.3133>
- García, H. (2021) Propuesta de una planta de tratamiento de las aguas residuales, para mejorar la recirculación del agua y los tratamientos en cada una de las etapas del proceso de curtido en una empresa curtiembre, en la ciudad de Trujillo [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Piura] <https://repositorio.unp.edu.pe/handle/20.500.12676/2880>
- García-Chamizo, J., Alcañiz-Lucas, S., Ferrández-Pastor, F., Pérez Maciá, J., Silveira, D., & García, M. (2020). Revisión de las Aplicaciones del Ozono y su Generación para el Uso en Mascarillas contra Patógenos. *Ars Innovatio*, 1-14. <http://hdl.handle.net/10045/104988>
- García, H., Armas, R., Mendoza, J. & Cruz, L. (2022). Tratamiento de aguas residuales provenientes del proceso de curtido de pieles. *Revista Alfa*, 6(18), 423-435. <https://revistaalfa.org/index.php/revistaalfa/article/view/204/525>
- Garzón, J., Rodríguez-Miranda, J. & Hernández-Gómez, C. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad y Salud*, 19(2), 309-318. <https://doi.org/10.22267/rus.171902.93>
- Garzón, J., Rodríguez-Miranda, J. & Hernández-Gómez, C. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad y Salud*, 19(2), 309-318. <https://doi.org/10.22267/rus.171902.93>
- Gorosito, R. (2017). Los principios del Derecho ambiental. *Revista De Derecho*, (16), 101–136. <https://doi.org/10.22235/rd.v2i16.1471>
- Guzmán, K. & Luján, M. (2010). Reducción de emisiones de la etapa de pelambre en el proceso de curtido de pieles. *Acta Nova*, 4(4), 464-492. <http://www.scielo.org.bo/pdf/ran/v4n4/v4n4a02.pdf>
- Hernández-Pérez, Alexis, & Labbé, José. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49(2), 157-173. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>
- Huaytalla, R. & Cruz, M. (2016). Eficiencia del Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (UASB) a escala piloto en el Tratamiento de las Aguas Residuales Domésticas provenientes de la comunidad de Carapongo-Lurigancho, Chosica. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 2(1), 7-23. https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/ri_ctd/article/view/628/600

- Huertas, M. & Cardona, V. (2008). Aporte crítico al análisis de la normatividad ambiental. *Revista Luna Azul*, (27), 104-112. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8176694&orden=0&info=link>
- Instituto Tecnológico de la Producción (2021, 19 de octubre). *Desarrollan proyecto «Buenas prácticas de producción más limpia» a favor de la industria de la curtiembre* [Nota de prensa]. <https://www.gob.pe/institucion/itp/noticias/546628-desarrollan-proyecto-buenas-practic-de-produccion-mas-limpia-a-favor-de-la-industria-de-la-curtiembre>
- Mojo, A., Callañaupa, J., Huanatico-Suarez, E., Quispe, J., Mamani, R., Arisaca-Parillo, A. & Beltrán-Barriga, P. (2022). Evaluación del proceso de piquelado sobre la resistencia a la tracción de pieles de alpaca (*Vicugna pacos*) bebé. *Revista De Ciencias Agrarias*, 8(1), 1-13. <http://revistas.unap.edu.pe/journal/index.php/RCAGRA/article/view/516/419>
- La Horma de tu Negocio. (s.f.). Números Positivos en la Industria de Piel y Cuero en Latinoamérica. *La Horma de tu Negocio*. <https://lahormadetunegocio.com/es/2021/06/30/numeros-positivos-en-la-industria-de-piel-y-cuero-en-latinoamerica/v>
- Lifshitz, A. (2007). Fiebre y otras formas de elevación térmica. *Revista de investigación clínica*, 59(2), 130-138. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-83762007000200007&lng=es&tlng=es
- López, L. (2022). El valor del agua. *Ecofronteras*, 26(74), 33-36. <https://revistas.ecosur.mx/ecofronteras/index.php/eco/article/view/2042/2138>
- López, M., Castellanos, O., Lango, F., Castañeda, M., Montoya, J., Sosa, C. & Ortiz, B. (2021). Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión. *Enfoque UTE*, 12(4), 76-87. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.769>
- Martínez, S. & Romero, J. (2016). Revisión del estado actual de la industria de las curtiembres en sus procesos y productos: un análisis de su competitividad. *Revista Facultad de Ciencias Económicas*, 26(1), 113-124. <https://doi.org/10.18359/rfce.2357>
- Mateo, V., Mesa, J., Villanueva, J. & Terrados, M. (2021, 9 de julio). *Mejora del pretratamiento de una EDAR mediante la predicción de parámetros del agua de entrada* [ponencia]. 25th International Congress on Project Management and Engineering, Alcoy. <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/2982>
- Ocampo-Rodríguez, D., Vázquez-Rodríguez, G., Martínez-Hernández, S., Iturbe-Acosta, U. & Coronel-Olivares, C. (2022). Desinfección del agua: una revisión a los tratamientos convencionales y avanzados con cloro y ácido peracético. *Ingeniería del Agua*, 26(3), 185-204. <https://doi.org/10.4995/la.2022.17651>
- Ome, O., & Zafra, C. (2018). Factores clave en procesos de biorremediación para la depuración de aguas residuales. Una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 573-585. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1037>

- Oquendo, J., García, L. & Quintero, C. (2022). Diseño de un prototipo que permita minimizar la emisión de gases contaminantes generados en los procesos químicos e industriales del sector curtiembres en el departamento de Antioquia. *Revista Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 9(2), 170-179. <https://doi.org/10.26495/icti.v9i2.2269>
- Organización Panamericana de la Salud - OPS. (17 de noviembre de 2021). *La higiene de manos salva vidas*. Organización Panamericana de la Salud. <https://www.paho.org/es/noticias/17-11-2021-higiene-manos-salva-vidas#:~:text=Razones%20para%20ello%20hay%20m%C3%BAltiples,a%20las%20que%20se%20enfrenta>
- Osorio-Rivera, M., Carrillo-Barahona, W., Loor-Lalvay, X., Negrete-Costales, J. & Riera-Guachichullca, E. (2021). La calidad de las aguas residuales domésticas. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 6(3), 228-245. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7926905.pdf>
- Pacheco-Blanco, B., Collado-Ruiz, D. & Capuz-Rizo, S. (2015). Identificación de etapas y materiales de mayor impacto en el ciclo de vida del calzado. *DYNA*, 82(189), 134-141. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n189.42575>
- Paucar, F. & Iturregui, P. (2020). Los desafíos de la reutilización de las aguas residuales en el Perú. *South Sustainability*, 1(1). <https://doi.org/10.21142/SS-0101-2020-004>
- Presidencia de la República. (2009, 22 de mayo). Decreto Supremo N.º 012-2009, *Aprueba la Política Nacional del Ambiente*. Diario Oficial El Peruano 396354. https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/ds_012-2009-minam.pdf
- Pontón, R. (2008). El valor del agua. *Invenio*, 11(20), 7-14. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4225099.pdf>
- Ríos, J., Posada, J. & Uribe, J. (2011). Revisión e identificación de tratamientos para la determinación del potencial de recirculación de aguas residuales industriales. *Revista Investigaciones Aplicadas*, 5(2), 59-72. <http://revistas.upb.edu.co/index.php/investigacionesaplicadas/article/view/907>
- Rojas, R. (2002). *Curso internacional «Gestión integral de tratamiento de aguas residuales». Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales*. CEPIS/OPS-OMS.
- Rosales, A., Rodríguez, C., & Ballen-Segura, M. (2018). Remoción de contaminantes y crecimiento del alga *Scenedesmus* sp. en aguas residuales de curtiembres, comparación entre células libres e inmovilizadas. *Ingeniería y Ciencia*, 14(28), 11-34. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.14.28.1>
- Rossel, L., Rossel, L., Ferro, F., Ferro, A. & Zapana, R. (2020). Radiación ultravioleta-c para desinfección bacteriana (coliformes totales y termotolerantes) en el tratamiento de agua potable. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 22(1), 68-77. <https://doi.org/10.18271/ria.2020.537>

- Ruiz, M., Mayorga, C., Mantilla, L. & López, P. (2016). Gestión Económica Ambiental del Sector Ambato De Ambato. *Augusto Guzzo Revista Académica*, (17), 133-142.
<https://doi.org/10.22287/ag.v1i17.330>
- Silva, M. & Morales, D. (2021). La contaminación proveniente de la industria curtiembre, una aproximación a la realidad ecuatoriana. *Revista Científica UISRAEL*, 9(1), 69-80.
<https://doi.org/10.35290/rcui.v9n1.2022.427>
- Sotomayor, A. & Power, G. (2019). *Tecnologías limpias y medio ambiente en el sector industrial peruano. Casos prácticos*. Universidad de Lima, Fondo Editorial
<https://hdl.handle.net/20.500.12724/9328>
- Tirado, G. (2020). Ese incomprendido y desconocido líquido al que llamamos agua. *UNAPEC Verde*, 2(2), 45-49. <https://bvearmb.do/handle/123456789/847>
- Umbarila-Ortega, M., Prada-Rodríguez, J. & Agudelo-Valencia, R. (2019). Remoción de sulfuro empleando ozono como agente oxidante en aguas residuales de curtiembres. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28(51), 25-38.
<https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n51.2019.9081>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura - Unesco. (2017). *Aguas residuales: el recurso no explotado. Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos, 2017*. Unesco.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247647>
- Vidaurreta, I. (2016). *Calidad y disponibilidad de agua para los bovinos en producción*. Manual Vetifarma, SA Argentina.
- Zapata, L. (2008). *Manual Práctico de Curtido Natural de Pieles y Producción de Artesanías (Incluye Marco Legal)*. Faunagua. <https://editorial-inia.com/wp-content/uploads/2021/06/manualartesanias.pdf>
- Zea, J. (2022). La importancia de los Principios del Derecho Ambiental en la Política Ambiental Municipal. *Revista de Derecho*, 7(1), 153-164.
<https://doi.org/10.47712/rd.2022.v7i1.158>

*Incidencia del tratamiento de aguas residuales en el
proceso de curtido*
*Es un libro editado y publicado por la editorial UTP en
presentación electrónica de descarga libre, publicado el
26 de mayo del 2023.*

