

**TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL DE CURTIEMBRE POR  
MEDIO DE LA ELECTROCOAGULACIÓN.**

**MONOGRAFIA PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTOR**

**DIEGO ALEJANDRO CORDOBA ADAME**

**1'127.142.118**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

**INGENIERIA AMBIENTAL**

**PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER**

**2019**

**TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL DE CURTIEMBRE POR  
MEDIO DE LA ELECTROCOAGULACIÓN.**

**MONOGRAFIA PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTOR**

**DIEGO ALEJANDRO CORDOBA ADAME**

**1'127.142.118**

**DIRECTOR**

**Msc. JAVIER AUGUSTO VERA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

**INGENIERIA AMBIENTAL**

**PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER**

**2019**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Este trabajo está dedicado a mis padres que con mucho esfuerzo y sacrificio me han educado enseñándome lo importante de perseguir mis sueños sin importar las adversidades.*

*A mi alma mater, la universidad de pamplona por brindarme la formación profesional dándome la oportunidad de culminar mis estudios; a los profesores que me han acompañado durante estos años de formación para así poder cumplir una de mis metas a base de principios, valores, carácter y autonomía, así mismo le agradezco a mis compañeros y amigos quienes en circunstancias de dificultad estuvieron brindándome su apoyo y ayuda en las dificultades en el ámbito académico los cuales se presentaron en mi formación como profesional.*

*Agradezco a mi tutor Javier Augusto Vera por guiarme a partir de sus conocimientos y consejos para la culminación de este trabajo.*

*A los profesores los cuales impartieron los módulos del diplomado los cuales sirvieron como base del tema de la monografía.*

*A mi novia la Ingeniera Sthefany Daniela González Mariño por ser mi apoyo emocional, por sus sabios consejos y la guía que me impartió en este proceso.*

## Tabla de Contenido

Introducción .....	7
Generalidades .....	9
Capítulo I EL AGUA .....	12
1. Que es el agua .....	12
1.1. Características físicas.....	13
1.2. Características químicas.....	17
2. Agua residual.....	18
2.1. Concepto. ....	18
2.2. Fuentes del agua residual. ....	19
2.3. Características – propiedades. ....	24
2.4. Contaminantes emergentes en agua. ....	29
Capitulo II CURTIEMBRES .....	42
1. Efluente de curtiembre .....	42
2. Secuencia del proceso.....	44
3. Impactos ambientales del proceso de producción de curtido de cueros.....	47
4. Legislación .....	48
Capitulo III TIPOS DE TRATAMIENTOS.....	51
1. Pretratamiento .....	51
1.1. Cribado o desbaste .....	51
1.2. Tamizado.....	53
1.3. Remoción de grasas.....	54
1.4. Desarenado.....	54
2. Tratamiento primario.....	55
2.1. Sedimentador.....	55
2.2. Flotación.....	56
2.3. Coagulación-sedimentación.....	56
2.4. Filtración.....	56
2.5. Tanque séptico.....	56
2.6. Tanque Imhoff.....	56
2.7. Reactor anaerobio de flujo a pistón – RAP.....	57
2.8. Reactor anaerobio de flujo ascendente- UASB.....	57

2.9.    Lagunas de estabilización (Oxidación).....	57
3.    Tratamiento secundario.....	58
3.1.    Laguna aerobia.....	58
3.2.    Laguna facultativa .....	58
3.3.    Lodos activados .....	58
3.4.    Zanjas de oxidación.....	59
3.5.    Filtros percoladores .....	59
3.6.    Biodiscos.....	59
4.    Tratamiento terciario o complementario.....	60
4.1.    Lagunas de maduración .....	60
4.2.    Electrocoagulación .....	60
4.3.    Desinfección .....	60
<b>Capitulo IV ELECTROCOAGULACION.....</b>	<b>61</b>
1.    Origen.....	61
2.    Fundamento.....	63
3.    Ventajas y desventajas.....	65
3.1.    Ventajas.....	65
3.2.    Desventajas .....	66
4.    Diseño .....	66
4.1.    Los electrodos en la electrocoagulación .....	67
4.2.    Factores que afectan el proceso.....	69
5.    Costos .....	70
6.    Investigaciones sobre electrocoagulación en tratamiento de agua residual de curtiembre. 72	
6.1.    Otras investigaciones sobre electrocoagulación.....	76
7.    Consideraciones finales.....	78
8.    Conclusiones .....	80
<b>Bibliografía .....</b>	<b>81</b>

## Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1 Aguas residuales domésticas.....	20
Ilustración 2 Agua residual doméstica, Agua negra. ....	20
Ilustración 3 Reutilización aguas grises en regadío ecológico. ....	21
Ilustración 4 Punto de vertimiento al mar de agua residual industrial.....	22
Ilustración 5 Agua lluvia, contaminada por escorrentía. ....	23
Ilustración 6 Agua residual agrícola, por escorrentía superficial.....	24
Ilustración 7 Diagrama de flujo del proceso productivo. ....	47
Ilustración 8 Avance de la normativa de vertimiento en colombiana. ....	48
Ilustración 9 Pre-Tratamiento, Rejillas. ....	51
Ilustración 10 Reactores para electrocoagulación tipo Batch. ....	67

## Tabla de Tablas

Tabla 1 Olores características del agua y su origen.....	15
Tabla 2 Límites de percepción de algunas sales y compuestos del agua (mg/L).....	16
Tabla 3 Criterios de calidad para el agua potable.....	17
Tabla 4 Características físicas del agua residual. ....	24
Tabla 5 Características químicas del agua residual. ....	25
Tabla 6 Características biológicas del agua residual. ....	26
Tabla 7 Características de las aguas residuales típicas domésticas. ....	26
Tabla 8 Características de aguas residuales municipales.....	27
Tabla 9 Rangos de concentración para desechos industriales. ....	29
Tabla 10 Clasificación de los plaguicidas según su toxicidad.....	31
Tabla 11 Clasificación de los plaguicidas según su vida media de efectividad.....	32
Tabla 12 Clasificación de los plaguicidas, según la familia química. ....	32
Tabla 13 Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domesticas (ARND) a cuerpos de aguas superficiales. ....	49
Tabla 14 Tamaño de apertura de rejillas y rejillas. ....	52
Tabla 15 Investigaciones sobre electrocoagulación en tratamiento de agua residual de curtiembre. ....	72
Tabla 16 Otras investigaciones sobre electrocoagulación. ....	76

## Tabla de ecuaciones

Ecuación 1 Reacciones para la formación de hidróxido férrico. ....	67
Ecuación 2 Reacción en el cátodo.....	68
Ecuación 3 Reacción global para la formación de hidróxido férrico. ....	68
Ecuación 4 Reacciones en el ánodo.....	68
Ecuación 5 Reacción en el cátodo.....	68
Ecuación 6 Reacción global.....	68
Ecuación 7 Reacciones en el ánodo.....	68
Ecuación 8 Reacción en el cátodo.....	69
Ecuación 9 Efecto de la reacción del Hidrogeno en el cátodo.....	70

## Tabla de graficas

Grafica 1 Costos de operación para la electrocoagulación a diferentes porcentajes de remoción de DQO..	70
--	----

## Introducción

Desde la antigüedad los procesos de tratamiento y teñido de pieles animales para transformarlas en cuero, conocidos como el arte de la piel, genera como subproductos unos compuestos altamente contaminantes para el ambiente de forma líquida y gaseosa, de esta última tenemos la emisión de sulfuro de hidrogeno ( $H_2S$ ) el cual es liberado a la atmosfera y produce un olor característico a huevo podrido, en este caso son de interés los compuestos vertidos a los cuerpos de agua natural, que son compuestos inorgánicos, en su mayoría metales pesados, los cuales varían en cada curtiembre dependiendo de los químicos y tintes que utilicen en sus procesos, metales tales como el cadmio, arsénico, plomo y cromo VI son de mayor importancia, dichos metales tienen la capacidad de acumularse en la cadena trófica siendo de mucho riesgo para la salud humana, la exposición a estos contaminantes presenta efectos muta génicos, carcinogénicos y teratógenos, inmunosupresión, mala condición corporal y alteraciones en la reproducción a exposición crónica a dosis bajas.

A partir de la problemática planteada anteriormente, surgen métodos de tratamiento específicos para este tipo de efluentes como electrocoagulación, por membrana, fitorremediación, entre otros.

De los anteriores métodos mencionados, la electrocoagulación es un método económico que en condiciones óptimas alcanza eficiencias de hasta el 98% a escala laboratorio, este elimina contaminantes tales como aceites, grasas, metales pesados, a especies no toxicas, además degrada coloides, moléculas orgánicas medidos en términos de DQO y DBO de forma sustancial; uno de los resultados es un desecho en forma acuosa compuesto por especies químicas de hierro, este subproducto debe ser tratado de otras formas convencionales para separar la mayor parte del agua y obtener un residuo con el menor volumen posible y fácil de manejar.

Con base a lo anterior, han surgido las incógnitas ¿se encontrarán evidencias bibliográficas que demuestren que este método alcanza eficiencias mayores o iguales al 90%? ¿Este método se podrá utilizar en otro tipo de tratamiento que sea benéfico para el medio ambiente?; en busca de

la solución de estas incógnitas se plantea como metodología iniciar con una revisión sistemática, de forma que se introduzca de lo general a lo específico en esta monografía, analizando las características de las aguas residuales, los diferentes tipo de tratamiento que existen en la actualidad de una forma general, para finalizar con el estudio a fondo sobre el tratamiento terciario de electrocoagulación, en donde se espera comprobar su eficiencia y versatilidad en el campo de plantas de tratamiento, gracias a la eficiencia del método se puede convertir en una posibilidad de tratamiento de efluentes para diferentes industrias y PTAR que manejen contaminantes específicos para tratar.

## Generalidades

Una de las consecuencias del desarrollo y crecimiento poblacional es la generación de residuos sólidos y líquidos los cuales afectan al medio ambiente y a la sociedad, agotando los recursos no renovables como por ejemplo el agua, vital para la vida en el planeta, tal es el caso que 4% de las reservas de agua subterránea están contaminadas (Aqua, 2017), hecho que prioriza su conservación, mantenimiento y aprovechamiento, para mitigar lo que estudios demuestran en cuanto a la cifra de mortalidad por beber agua contaminada, en la actualidad se alcanzan cifras de 5 millones de personas, esta situación es más grave en lugares donde abunda la exclusión social, pobreza y marginamiento (Suman, 2016).

Todas las actividades de la vida cotidiana afectan directa e indirectamente en la contaminación de nuestros cuerpos hídricos (acuíferos, ríos, lagos, lagunas, etc.) principales fuentes de abastecimiento, causando como consecuencia la incapacidad del aprovechamiento de los recursos hídricos directamente de las fuentes, uno de los objetivos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para este milenio es reducir el porcentaje de personas en el mundo sin acceso al agua potable, se estima que en 2015 5200 millones de personas (71% de la población mundial) utilizan servicios de suministro de agua potable gestionados de forma segura y 2100 millones de personas sin servicios de suministro de agua gestionados de forma segura para ese mismo año, al mismo tiempo se estima que 842000 personas mueren de diarrea cada año debido a las condiciones insalubre del agua (UNICEF, 2018), por lo tanto se hace necesario la creación de sistemas de abastecimiento para suplir las necesidades de las personas, así mismo efectuar tratamientos específicos según las características físicas, químicas y tipo de contaminación en el agua, por ejemplo, encontramos aguas residuales domésticas las cuales contienen altos contenidos de materia orgánica, detergentes y grasa, además podemos encontrar aguas urbanas e industriales; siendo esta última una de las más difíciles en tratar por su alto contenido de metales pesados, materia orgánica, y patógenos según su fuente, en el caso específico de las curtiembres vierten químicos que tiñen de color oscuro y opaco las fuentes hídricas cambiando su naturaleza, afectando de forma inmediata su pureza y biota, teniendo en cuenta que el color, sabor y olor son características fisicoquímicas que tenemos principalmente en cuenta para el consumo del recurso, además de la cantidad de compuestos contaminantes perjudiciales para la

salud humana y animal en general que esta industria aporta, las aguas provenientes de las actividades industriales son la principal fuente de contaminación posterior a la segunda guerra mundial hasta nuestros días, según el informe mundial de las naciones unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos los países de recursos altos como por ejemplo Estados Unidos, Reino Unido o Alemania tratan el 70% de las aguas municipales e industriales que generan, mientras que en países con ingresos medios-altos y medio-bajos esta cifra caen en un 38% y 28% respectivamente, estos valores contrastan con el 8% de las aguas que reciben algún tipo de tratamiento en los países de ingresos bajos, no obstante del total de las aguas residuales producidas en el planeta se estima que más del 80% son vertidas a los ecosistemas sin recibir ningún tratamiento (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, 2017) (ONU, 2017).

Un sector que contamina y afecta a la salud, es la industria de curtiembres que aporta en su efluente compuestos altamente cancerígenos como el cadmio, arsénico, cromo VI y plomo los cuales provienen de los procesos que se utilizan para el acondicionamiento del cuero, acción que da la necesidad de encontrar una solución a esta problemática siendo la respuesta la implementación de diferentes tipos de tratamiento como lo son osmosis inversa, fitorremediación, coagulación y electrocoagulación por nombrar algunos.

La electrocoagulación es un método el cual utiliza electricidad en placas de metales como de hierro o de aluminio, esta corriente inducida provoca reacciones que desestabiliza a los contaminantes, tiene sus primeras apariciones en el siglo XX hacia el año 1906, dos años más tarde se realizó el proceso webster utilizado en la ciudad de Santa Mónica para la reducción de materia orgánica hasta en un 40%, este método ha venido evolucionando desde su utilización en la primera década del siglo XX hasta la actualidad, frente a métodos convencionales de uso de polímeros la electrocoagulación resulta mucho más económico en su valor de operación, sin embargo los costos de energía estarán sujetos al valor de la electricidad de la zona, asimismo el procedimiento también arroja porcentajes altos de remoción de contaminantes tal como materia orgánica, aceites y sulfuro. Algunas de las ventajas de este método son: mayor eficiencia de coagulación, equipos más compactos y fáciles de operar, posible automatización y menor generación de sales y residuos, genera agua reciclable y potable, no requiere almacenamiento ni

productos químicos, genera lodos residuales más compactos y en menor cantidad, los flocúlos formados son similares a los producidos químicamente, pero más grandes, contienen menos agua ligada, son antiácidos y más estables y pueden ser separados por filtración, ausencia de magnesio en los lodos, alta remoción de un amplio rango de contaminantes, reduce la contaminación, produce efluentes con menor cantidad de SDT comparado con los tratamientos químicos, si esta agua se reusa, los bajos niveles de SDT contribuye a bajos costos de tratamiento de aguas, además remueve las partículas coloidales más pequeñas, las burbujas de gas producidas, pueden llevar el contaminante a la superficie de la solución, para ser recuperado y removido. Sin embargo debemos tener en cuenta algunas de las desventajas, que son: reposición de los electrodos de sacrificio, los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo utilizado, no es efectivo en la remoción de DBO soluble, proveniente de solventes y anticongelantes, una película de óxido impermeable puede formarse en el cátodo que lleva a la pérdida de eficiencia del proceso. (C.V., 2013)

# Capítulo I EL AGUA

## 1. Que es el agua

Según el capítulo 4 del libro El Medio Ambiente en Colombia, en su página 115 “el agua es un compuesto con características únicas, de gran significado para la vida, el más abundante en la naturaleza y determinante en los procesos físicos, químicos y biológicos que gobiernan el medio natural. El griego Tales de Mileto creía que el agua era el principio de todas las cosas existentes, mientras tanto Empédocles seguido por Platón y Aristóteles la consideraron como uno de los cuatro elementos básicos del universo.

En 1775 el químico francés Macquer obtuvo algunas gotas de agua por combustión del hidrógeno, 3 años después escribió que el agua es una sustancia inalterable e indestructible, años más tarde, el químico inglés Henry Cavendish demostró que el agua es un resultado de la combinación del llamado ‘aire inflamable’ con el oxígeno presente en la atmósfera ‘aire vital’, muchos científicos han aportado al descubrimiento de la composición de este compuesto pero fue gracias al químico francés Lavoisier quien dio sus nombres actuales al oxígeno y al hidrógeno, este último quiere decir ‘productor de agua’. Este compuesto tiene algo muy característico como lo son su punto de ebullición y congelación, si bien compuestos químicos semejantes a ella ( $H_2S$ ,  $H_2Se$  y  $H_2Te$ ), llama la atención que al evaluarlos se concluye que su punto de ebullición debería estar en  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  y congelación a los  $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en su lugar de hacerlo encontramos su punto de ebullición a los  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  dependiendo del nivel del mar, mientras que su punto de congelación a los  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  su congelación respectivamente. Por otra parte, es posible encontrar a altitudes entre 2.000 y 3.000 metros gotas de agua súper frías con temperaturas entre  $0$  y  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Desde el punto de vista químico es excepcional su importancia puesto que casi todos los procesos químicos que ocurren en la naturaleza son disueltos en agua, es un medio de transporte de nutrientes, esta es una cualidad muy importante para la vida en el planeta de forma que para algunos ecosistemas el agua es de utilidad como recipiente de sustancias vitales para su existencia, cabe resaltar otra

propiedad como lo es su facilidad para disolver una gran cantidad de sustancias (de ahí que rara vez es pura), este líquido a su vez absorbe la mayor parte de la energía solar en la hidrosfera donde se transforma en calor el cual es transportado o transferido a la atmosfera, como por ejemplo la evaporación de agua de la superficie del océano es transferido cada minuto a la atmosfera jugando un papel importante como regulador del clima en el planeta, impidiendo las grandes masas oceánicas por su capacidad calorífica las variaciones abruptas de temperatura entre el día y la noche o entre el verano y el invierno.

La percepción directa del ser humano mediante el gusto de las sustancias disueltas en el agua ha llevado a calificarlas entre agua dulce y agua salada, esta última es considerada así cuando contiene una concentración de sales mayor a 3.000 mg/L, este término está asociado al agua de mar que por lo general sus valores oscilan en el rango de 34.000 y 35.000 mg/L llegando alcanzar valores de 45.000 mg/L en lugares como el mediterráneo o el mar rojo, por otra parte cuando el agua contiene una concentración de sales menor a 1.000 mg/L se le llama agua dulce.” (IDEAM, 2001)

### **1.1. Características físicas**

Se les denomina características físicas porque pueden ser captadas por los sentidos (olfato, gusto, vista, etcétera), estas características afectan la estética del agua y su aceptabilidad.

- Turbiedad
- Sólidos solubles e insolubles
- Color, olor y sabor
- Temperatura
- pH

**1.1.1. Turbiedad:** es ocasionada por partículas presentes en el agua de forma suspendida (arcillas, limo, tierra fina, etcétera) reduciendo su claridad. Esta característica se mide mediante un nefelómetro el cual trabaja con unidades nefelométricas (UNT), según la Agencia de Protección Ambiental de Estados

Unidos (EPA), “ninguna agua de consumo humano puede tener más de 5 unidades nefelométricas”. Colombia tiene un valor máximo para el agua de consumo humano en 2 unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT) (Sostenible, 2007)

**1.1.2. Sólidos y residuos:** son los que se obtienen como remanente luego del proceso de evaporar y secar una muestra de agua a una cierta temperatura, los sólidos pueden encontrarse en el agua de forma suspendida o disuelta.

**1.1.3. Sólidos totales:** es equivalente al residuo que permanece después de secar una muestra de agua, esto es la suma de residuos sólidos disueltos y suspendidos, este dato se obtiene a temperaturas entre 103-105 °C.

Equivalencias:

Sólidos totales= sólidos suspendidos + sólidos disueltos

Sólidos totales= sólidos fijos + sólidos volátiles

**1.1.4. Sólidos disueltos o residuos disueltos:** también llamados sólidos filtrantes, dichos sólidos se obtienen después de evaporar una muestra que antes ha sido filtrada

**1.1.5. Sólidos en suspensión:** son partículas en suspensión mayores a un micrómetro y que son retenidos mediante una filtración.

**1.1.6. Sólidos volátiles y fijos:** los sólidos volátiles son los cuales se pierden mediante la calcinación a 550°C, a su vez el material que queda después del proceso se denomina sólidos fijos

**1.1.7. Color:** No sé ha establecido las estructuras químicas fundamentales responsables del color, es atribuido comúnmente el color en el agua a la presencia de taninos, lignina, ácidos húmicos, ácidos grasos, etcétera. Se considera que el color natural del agua sin ninguna acción antropogénica puede ocasionarse por:

- la extracción acuosa de sustancias vegetales de origen vegetal
- la descomposición de la materia

- la materia orgánica del suelo
- la presencia de hierro, manganeso y otros compuestos metálicos
- una combinación de los procesos descritos

Otros términos son color aparente el cual corresponde al agua cruda o natural sin haber sido pasada antes por un filtro y color verdadero que proviene después de ser filtrada, en la resolución 2115 de 2015 en su artículo 2° denominado *características físicas* establece como valor máximo de color un valor 15 Unidades de Platino Cobalto (UPC) (Sostenible, 2007).

**1.1.8. Olor y sabor:** estos dos conceptos están muy relacionados entre sí, esta característica representa el motivo principal por el cual el consumidor rechaza el líquido, un olor muy conocido es el producido por el H<sub>2</sub>S que puede indicar una acción séptica.

*Tabla 1 Olores características del agua y su origen*

<b>NATURALEZA</b>	<b>ORIGEN</b>
<b>OLOR BALSÁMICO DULZOR</b>	Flores Coelosphaerium
<b>OLOR QUÍMICO OLOR A CLORO</b>	Aguas residuales industriales Cloro libre
<b>OLOR A MEDICAMENTOS OLOR AZUFRE</b>	Fenol, yodoformo Ácido sulfhídrico, H <sub>2</sub> S
<b>OLOR A PESCADO</b>	Pescado, marismo
<b>OLOR SÉPTICO</b>	Alcantarilla
<b>OLOR TIERRA</b>	Arcilla húmeda
<b>OLOR FECALOIDE OLOR A MOHO</b>	Retrete, alcantarilla Cueva húmeda

Continuación Tabla 1 página 16

<b>OLOR LEGUMBRES</b>	Hierbas, hojas en descomposición
---------------------------	-------------------------------------

Fuente: (Ambiente, 2004)

No obstante, las sustancias que generan olor y sabor también pueden ser de origen orgánico que a su vez vienen de la acción microbiana y de algas, en otros casos también pueden provenir de los desechos industriales. La tabla 2 muestra algunos valores de percepción de sales y compuestos en el agua medidos en mg/L

*Tabla 2 Límites de percepción de algunas sales y compuestos del agua (mg/L)*

<b>SUSTANCIA</b>	<b>NETAMENTE RECONOCIBLE</b>	<b>DEBIDAMENTE PERCEPTIBLE</b>	<b>NO APRECIABLE</b>
<b>CaCl<sub>2</sub>; NaCl MgCl<sub>2</sub></b>	600	300	150
<b>FESO<sub>4</sub></b>		3.5	1.75
<b>CUSO<sub>4</sub></b>	7	3.5	1.75
<b>H<sub>2</sub>S</b>	1.15	0.55	0.3
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	4	2	1
<b>CL<sub>2</sub></b>	0.1	0.05	0.05
<b>CA(OCL)<sub>2</sub></b>	0.5	0.2	0.2

Fuente: (Ambiente, 2004)

Los problemas de olores y sabores pueden ser eliminados por filtros de carbón activado o puede ser aireado.

**1.1.9. Temperatura:** esta característica es el más importante visto que frecuentemente influye en la aceleración o desaceleración de la actividad biológica, asimismo como en la absorción de oxígeno, la desinfección, sedimentación, procesos de mezcla y filtración, esta característica está más apegada a los factores climáticos de la zona en la cual se genere el estudio

**1.1.10. pH:** Es responsable de algunos fenómenos que ocurre en el agua como la corrosión y las incrustaciones en las redes de distribución de agua potable, la normativa colombiana del ministerio de medio ambiente tiene un valor

comprendido de 6,5 a 9,0 de potencial de hidrogeno para consumo humano (Sostenible, 2007)

## 1.2. Características químicas

El agua puede contener casi cualquier elemento de la tabla periódica, sin embargo, muy pocos son elementos significativos para el tratamiento de agua cruda para consumo.

*Tabla 3 Criterios de calidad para el agua potable*

PARÁMETROS	REGULACIONES INTERNAS PRIMARIAS	GUÍAS DE CALIDAD PARA EL AGUA DE BEBIDA DEL CANADA-1978	GUIDELINES FOR DRINKING-WATER QUALITY OMS, 1996
UNIDADES	Nivel máximo del contaminante	Concentración máxima aceptable	Valor guía
<b>FÍSICOS</b>			
<b>COLOR</b>	TCU	—	15
<b>SABOR Y OLOR</b>	Acceptable	—	Acceptable
<b>TURBIEDAD</b>	UNT	5	5
<b>INORGÁNICOS</b>			
<b>ALUMINIO</b>	mg/L	—	0,2
<b>AMONIO</b>	mg/L	—	1,5
<b>ANTIMONIO</b>	mg/L	0,006	0,005
<b>ARSÉNICO</b>	mg/L	0,05	0,01
<b>BARIO</b>	mg/L	2,0	0,7
<b>BORO</b>	mg/L	—	0,3
<b>CADMIO</b>	mg/L	0,005	0,005
<b>CIANURO</b>	mg/L	0,2	0,07
<b>CINC</b>	mg/L	—	3
<b>CLORO</b>	mg/L	—	5
<b>CLORURO</b>	mg/L	—	250
<b>COBRE</b>	mg/L	1,3	2
<b>CROMO(TOTAL)</b>	mg/L	0,1	0,05
<b>FLUORURO</b>	mg/L	4	1,5
<b>HIERRO</b>	mg/L	—	0,3
<b>MANGANESO</b>	mg/L	—	0,5
<b>MERCURIO</b>	mg/L	0,002	0,001
<b>NITRATO(COMO N)</b>	mg/L	10	50
<b>NITRITO(COMO N)</b>	mg/L	1	3
<b>PH</b>	—	—	6,5—8,5
<b>PLATA</b>	mg/L	—	0,05
<b>PLOMO</b>	mg/L	0,015	0,01

Continuación Tabla 3 página 18

SELENIO	mg/L	0,05	0,01	0,01
SULFATO	mg/L	—	500	250
SULFUROS(H <sub>2</sub> S)	mg/L	—	0,05	0,05
SOLIDOS DISUELTOS	mg/L	—	500	1000

Fuente: (Ambiente, 2004)

**1.2.1. Aceites y grasas:** las pruebas de aceites presentes en el agua se reportan en mg/L, se sugiere que las aguas destinadas al consumo estén libres de grasas y aceites.

**1.2.2. Agentes espumantes:** los compuestos tensoactivos por su composición al entrar en contacto con el agua en menor o mayor rango produce una espuma, juegan un papel importante en la autodepuración de las aguas debido a la inhibición de la oxidación química y biológica causada por los detergentes que rodean con una fina película a las bacterias asilándolas del medio e impidiendo su acción.

**1.2.3. Alcalinidad:** Es la propiedad que contiene el agua de neutralizar un ácido. Al mismo tiempo existen ácidos débiles (bicarbonatos, carbonatos, sulfuro, bisulfuro, silicato y fosfato) pueden aumentar la alcalinidad. Esta característica se ve reflejada en cierto modo en las aguas naturales como un equilibrio entre bicarbonato, carbonatos con el ácido carbónico con tendencia a que prevalezcan los iones bicarbonato.

Este parámetro es muy importante en el proceso de coagulación debido a que reacciona con coagulantes hidrolizables (como hierro y aluminio), de modo similar tiene efecto sobre su condición corrosiva o incrustante que pueda tener el agua en las tuberías y en valor muy altos puede llevar a cambiar el sabor.

## 2. Agua residual

### 2.1. Concepto.

Son aquellas que sus características iniciales han sido modificadas por las actividades diarias del ser humano haciéndolas no aptas para el consumo directo de la fuente, haciendo necesario un tratamiento previo que dependerá de las

características del recurso y la finalidad que se le quiera dar a su uso; tenido en cuenta que antes de verter a un cuerpo de agua natural debe cumplir con la normativa que rija al emisario

Por otro lado, Enrique Arriols la define como, “**todo tipo de agua que haya sido afectada de forma negativa por la acción del ser humano**. De este modo, quedarían fuera aquellas aguas que, por causas naturales, no sean aptas para el consumo.

En este sentido, **las aguas residuales** son todas aquellas aguas que han sido usadas en los entornos domésticos y urbanos, en las industrias y ganaderías, así como las aguas naturales que, por accidente o mala praxis, se hayan mezclado con las anteriores. Visto de esta forma, nos encontramos con que las aguas residuales también contienen una **gran cantidad de elementos contaminantes**, ya sean sólidos o disueltos en la misma agua.

Respecto a la contaminación que pueden portar las aguas residuales hay que decir que se trata de una variedad casi tan amplia como las acciones que el ser humano puede realizar sobre el agua. Se pueden encontrar productos químicos procedentes de uso doméstico (jabones, detergentes, cosméticos, etc.), productos sólidos (papel higiénico, toallitas “desechables” de algodón, plásticos de diversos tamaños, etc.), metales pesados y muy contaminantes procedentes de la industria (plomo, zinc, mercurio, cadmio, bromo, etc.), y también restos orgánicos, procedentes, principalmente, de la materia fecal y los orines” (Arriols, 2018).

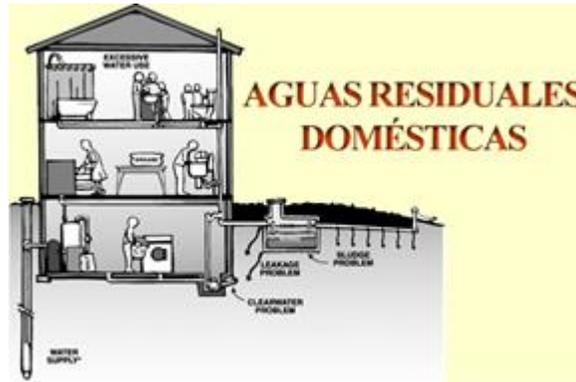
## **2.2. Fuentes del agua residual.**

Según el concepto el agua residual se genera por la influencia antropogénica, hecho que podemos clasificar según la actividad y el contaminante que aporte al recurso, divididas de la siguiente manera:

### **2.2.1. Aguas residuales domésticas.**

Se caracterizan por tener su origen en viviendas, zonas residenciales, establecimientos institucionales o comerciales.

*Ilustración 1 Aguas residuales domésticas.*



Fuente: (S.A.S., 2018)

La cual a su vez se subdividen en:

### ***2.2.1.1. Aguas negras.***

Tienen su origen principalmente de los escusados, siendo característico su contenido residual como disuelto, suspendido, o intermedio denominado como coloidal. Las cuales pueden tener un origen mineral u orgánico, la cual puede generar descomposición y posteriormente malos olores, por lo que generan propagación de vectores, al contener materia orgánica se generaran microorganismos capaces de desarrollarse en este entorno, los cuales son nocivos para la salud humana.

*Ilustración 2 Agua residual doméstica, Agua negra.*



Fuente: (S.A.S., 2018).

### **2.2.1.2. Aguas grises.**

Su característica es ser jabonosa, presentando contenido de grasas, su origen está en los lavados de la cocina, la ducha, la tina, el lavamanos, el lavadero y lavadora, dando la oportunidad de ser reutilizada en acciones de aseo de sectores como el inodoro, o el regadío ecológico; esta se diferencia de las aguas negras gracias a que no contienen bacterias fecales.

*Ilustración 3 Reutilización aguas grises en regadío ecológico.*



Fuente: (S.A.S., 2018).

### **2.2.1.3. Agua residual municipal o urbana (ARU).**

Se caracterizan por ser los residuos líquidos de los conjuntos urbanos, los cuales tiene actividades residenciales, recreativas e industriales, transportadas por una red de alcantarillado.

### **2.2.2. Agua residual industrial (ARI).**

Proceden de cual actividad industrial, en donde sus procesos de manipulación, transformación, producción y transporte, se emplee el uso del agua, siendo contaminada principalmente por microorganismos patógenos, materia orgánica consistente y metales pesados, así como material suspendido o sedimentados, químicos como pesticidas, provenientes en su mayoría de fuentes no localizadas.

*Ilustración 4 Punto de vertimiento al mar de agua residual industrial*



Fuente: (S.A.S., 2018).

Esta a su vez se subdivide en cinco grupos que son:

***2.2.2.1.ARI con vertimientos principalmente de tipo orgánico.***

En este grupo podemos encontrar los vertimientos con mayor contenido de materia orgánica, en suspensión o decantable, destacándose las industrias de los sectores: papeleras, azucareras, mataderos, curtiembres, conserveras, procesadoras de lácteos, fermentadoras, procesadores de productoras alimenticias y/o de bebidas y lavanderías.

***2.2.2.2.ARI con vertimientos de tipo orgánico e inorgánico.***

Encontramos refinerías, petroquímicas, coquerías, químicas y textilerías, las cuales vierten concentraciones de materia orgánica, aceites, fenoles, amoníaco y sulfuros.

***2.2.2.3.ARI con vertimientos de tipo inorgánico.***

En este grupo encontramos aquellas que se encargan de la limpieza y recubrimiento de metales, explotación minera y salina, las cuales vierten concentraciones de metales pesados, fenoles, alquitranes, cianuros libres y complejos, sulfuros, materiales en suspensión como hierro, aceites, grasas y pH.

#### ***2.2.2.4.ARI con vertimientos que contienen materia en suspensión.***

Industrias que su actividad económica es el lavado de minerales y carbón, corte y pulido de mármol y otros minerales, laminación en caliente y colada continua; los desechos vertidos por este tipo de industrias son concentraciones de productos tóxicos empleados, sólidos en suspensión, aceites, grasas y sedimentos.

#### ***2.2.2.5.ARI con vertimientos de tipo refrigerantes.***

Acá podemos encontrar centrales térmicas y centrales nucleares, estas industrias generan vertimientos tóxicos y peligrosos como concentraciones de ácidos, sólidos sedimentables, arsénico, selenio y mercurio.

#### ***2.2.3. Aguas lluvias (ALL).***

Tiene su origen en la escorrentía superficial de las lluvias las cuales fluyen por distintos tipos de superficie como lo son: techos, calles, jardines y demás superficies de terreno. Teniendo en cuenta que los primeros flujos de la lluvia estarán muy contaminados por el arrastre de basura y material acumulado en la superficie.

*Ilustración 5 Agua lluvia, contaminada por escorrentía.*



Fuente: (S.A.S., 2018).

#### 2.2.4. Aguas residuales agrícolas (ARA).

Se generan por la escorrentía superficial de las zonas de producción agrícola, y tiene como característica la presencia de pesticidas, sales y altos contenidos de sólidos en suspensión.

*Ilustración 6 Agua residual agrícola, por escorrentía superficial.*



Fuente: (S.A.S., 2018).

#### 2.3. Características – propiedades.

El agua residual se puede caracterizar por componentes físicos, químicos, y biológicos; destacando que su interrelación es directa o inversa según los parámetros estudiados, por ejemplo, una propiedad física como la temperatura afecta la actividad biológica y a su vez la cantidad de gases disueltos en el agua; a continuación, se clasifican las características por propiedades:

*Tabla 4 Características físicas del agua residual.*

CARACTERISTICAS	
<b>FISICA</b>	<b>PROCEDENCIA</b>
<b>COLOR</b>	Aguas residuales domésticas e industriales, degradación natural de materia orgánica
<b>OLOR</b>	Agua residual en descomposición, residuos industriales
<b>SOLIDOS</b>	Agua de suministro, aguas residuales domésticas e industriales, erosión del suelo, infiltración y conexiones incontroladas

Continuación Tabla 4 página 25

<b>TEMPERATURA</b>	Aguas residuales domésticas e industriales
<b>TURBIDEZ</b>	Se debe a la materia en suspensión, esta turbidez en las aguas receptoras afecta la penetración de la luz

Fuente: (AGUA C. D.)

*Tabla 5 Características químicas del agua residual.*

<b>CARACTERISTICAS</b>	
	<b>QUIMICA</b> <b>ORGÁNICO</b>
<b>CARBOHIDRATOS</b>	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
<b>GRASAS ANIMALES</b>	aceites Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales y grasa
<b>PESTICIDAS</b>	Residuos agrícolas
<b>FENOLES</b>	Vertidos industriales
<b>PROTEÍNAS</b>	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
<b>CONT. PRIORITARIOS</b>	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
<b>AGENTES TENSOACTIVOS COMP. ORGÁNICOS VOLÁTILES</b>	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
	<b>INORGÁNICOS</b>
<b>ALCALINIDAD</b>	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea
<b>CLORUROS</b>	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea
<b>METALES PESADOS NITRÓGENO</b>	Vertidos industriales
<b>PH</b>	Residuos agrícolas y aguas residuales domésticas
<b>FOSFORO</b>	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales
<b>CONT. PRIORITARIOS</b>	aguas de Escorrentía Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales

Continuación Tabla 4 página 26

<b>AZUFRE</b>	Agua de suministro; aguas residuales domésticas, comerciales e industriales
<b>SULFURO DE HIDROGENO</b>	Descomposición de residuos domésticos
<b>METANO</b>	Descomposición de residuos domésticos
<b>OXIGENÓ</b>	Agua de suministro; infiltración de agua superficial

Fuente: (AGUA C. D.)

*Tabla 6 Características biológicas del agua residual.*

<b>CARACTERISTICAS</b>	
<b>BIOLOGICA</b>	
<b>ANIMALES</b>	Cursos de agua y plantas de tratamiento
<b>PLANTAS</b>	Cursos de agua y plantas de tratamiento
<b>PROTISTAS</b>	Eubacterias Aguas residuales domésticas, infiltración de agua superficial, plantas de tratamiento
	Arqueobacterias Aguas residuales domésticas, infiltración de agua superficial, plantas de tratamiento
<b>VIRUS</b>	Aguas residuales domésticas

Fuente: (AGUA C. D.)

### **2.3.1. Características según la fuente de contaminación.**

Teniendo en cuenta el tipo de fuente del agua residual se puede encontrar diferentes rangos en sus características, como se describen en las siguientes tablas:

#### **2.3.1.1. Características específicas de aguas residuales típicas domésticas.**

Este tipo de agua residual descrita anteriormente, se describe ahora más específicamente en la tabla 2, con valores de rango fuerte, medio y débil, para cada una de las características físicas y químicas.

*Tabla 7 Características de las aguas residuales típicas domésticas.*

<b>CARACTERISTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES</b>			
<b>TIPICAS DOMESTICAS</b>			
<b>PARAMETROS (MG/LT).</b>	<b>Fuerte</b>	<b>Media</b>	<b>Débil</b>
<b>SÓLIDOS EN TOTAL</b>	1200	700	350
<b>DISUELTO EN TOTAL</b>	850	500	250
<b>FIJOS</b>	525	300	145
<b>VOLÁTILES</b>	325	200	105

<b>SUSPENDIDOS EN TOTAL</b>	350	200	100
<b>FIJOS</b>	75	50	30
<b>VOLÁTILES</b>	275	150	70
<b>SOLIDOS SEDIMENTABLES (ML/LT)</b>	20	10	5
<b>D.B.O. (5). (DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO), 20 GRADOS CENTÍGRADOS</b>	300	200	100
<b>CARBONO ORGÁNICO TOTAL (C.O.T.)</b>	1000	500	250
<b>NITRÓGENO TOTAL</b>	85	40	20
<b>NITRÓGENO ORGÁNICO</b>	35	15	8
<b>AMONIACO LIBRE</b>	50	25	12
<b>FOSFORO TOTAL</b>	20	10	6
<b>FOSFORO ORGÁNICO</b>	5	3	2
<b>FOSFORO INORGÁNICO</b>	15	7	4
<b>CLORURO*</b>	100	50	30
<b>ALCALINIDAD (COMO CaCO<sub>3</sub>)*</b>	200	100	50
<b>GRASAS</b>	150	100	50

\*. -LOS VALORES PUEDEN INCREMENTARSE POR LAS  
CARACTERÍSTICAS DEL AGUA ORIGINAL.

Fuente: (Pulido, Miranda, Guavita, & Molano)

### 2.3.1.2. Características específicas de aguas residuales municipales.

Este tipo de agua residual descrita anteriormente, se describe ahora más específicamente en la tabla 3, con valores típicos de la ciudad de Mérida (Venezuela), Palmira (Colombia) y (México) para cada una de las características físicas y químicas.

Tabla 8 Características de aguas residuales municipales.

<b>CARACTERISTICAS DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES</b>			
<b>PARAMETROS</b>	<b>Venezuela Mérida</b>	<b>Colombia Palmira</b>	<b>México</b>
<b>TEMPERATURA °C</b>	-	24,6	-
<b>TURBIEDAD, UNIDADES</b>	-	14,5	-

Continuación Tabla 8 página 28

<b>SÓLIDOS EN TOTAL (MG/LT).</b>	408	593	987
<b>FIJOS (MG/LT).</b>	230	272	769
<b>VOLÁTILES (MG/LT).</b>	178	321	218
<b>SUSPENDIDOS EN TOTAL</b>	-	262	167
<b>DISUELTO EN TOTAL</b>	-	331	820
<b>(MG/LT).</b>			
<b>SOLIDOS SEDIMENTABLES</b>	4	2.7	3
<b>(ML/LT)</b>			
<b>PH UNIDADES</b>	7.5	7.2	-
<b>CLORUROS (MG/LT).</b>	72	38.9	-
<b>FOSFATO (MG/LT).</b>	5.8	15.4	29
<b>NITRÓGENO TOTAL (MG/LT).</b>	34.5	21	21
<b>NITRÓGENO ORGÁNICO</b>	14.5	8.4	9
<b>(MG/LT).</b>			
<b>NITRÓGENO AMONIACAL</b>	20	12.6	12
<b>(MG/LT).</b>			
<b>NITRITOS (MG/LT).</b>	0.02	0.004	-
<b>NITRATOS (MG/LT).</b>	0.03	0.056	-
<b>D.B.O. (5) (DEMANDA</b>	219	167	301
<b>BIOQUÍMICA DE OXIGENO).</b>			
<b>DQO. (MG/LT). (DEMANDA</b>	364	361	430
<b>QUÍMICA DE OXIGENO)</b>			
<b>GRASAS Y ACEITES (MG/LT).</b>	-	32	96

Fuente: (Pulido, Miranda, Guavita, & Molano)

### ***2.3.1.3. Características específicas de aguas residuales industriales.***

Este tipo de agua residual descrita anteriormente, se describe ahora más específicamente en la tabla 4, con valores típicos de la ciudad de Cali (Colombia) y Venecia (Venezuela), para cada una de las características físicas y químicas.

*Tabla 9 Rangos de concentración para desechos industriales.*

<b>RANGOS DE CONCENTRACIÓN PARA DESECHOS INDUSTRIALES</b>		
<b>PARAMETROS</b>	<b>Cali Colombia</b>	<b>Valencia Venezuela</b>
<b>TEMPERATURA °C</b>	19 a 91	-
<b>PH UNIDADES</b>	0,8 a 13,5	2.8 a 12.3
<b>ALCALINIDAD A FENOL (MG/LT).</b>	0 a 240	-
<b>SÓLIDOS EN TOTAL (MG/LT).</b>	101 a 829.751	556 a 174.380
<b>SUSPENDIDOS EN TOTAL (MG/LT).</b>	1 a 67.920	-
<b>FIJOS (MG/LT).</b>	62 a 71.317	-
<b>VOLÁTILES (MG/LT).</b>	0 a 93.777	-
<b>SEDIMENTABLES (MG/LT).</b>	0.05 a 101	-
<b>D.B.O. (5) (DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO).20 GRADOS CENTÍGRADOS</b>	0 a 31.875	5 a 17.100
<b>DQO. (MG/LT). (DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO)</b>	0 a 54.0	10 a 79.6
<b>GRASAS Y ACEITES (MG/LT).</b>	9 a 2.574	-
<b>NITRÓGENO TOTAL (MG/LT).</b>	-	3.1 a 2.141

Fuente: (Pulido, Miranda, Guavita, & Molano)

#### **2.4. Contaminantes emergentes en agua.**

Según la fuente del efluente el agua residual puede tener diferentes tipos de contaminantes importantes que afectan la biota del cuerpo de agua al que se verta, y a su vez descarta al afluente como fuente de agua potable, o aumentar el costo de su tratamiento para esta finalidad, según Miriam Janet Gil, Adriana María Soto, Jorge Iván Usma, Omar Darío Gutiérrez, en su artículo del año 2012 llamado “Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos” describen:

#### **2.4.1. Pesticidas o plaguicidas:**

Los pesticidas son sustancias o mezclas de sustancias destinadas a prevenir, destruir, repeler o mitigar las plagas. Con respecto a la regulación a la cual ha sido sometida, los pesticidas se han estudiado durante décadas, por lo tanto, se tiene un conocimiento razonable sobre su presencia y destino en el medio acuático. En los últimos años la preocupación en torno a estos productos se centra en los metabolitos, productos de degradación, que han sido en su mayor parte ignorados hasta la fecha y que se ha visto que pueden ser más tóxicos que los compuestos a partir de los cuales se generan. Los estudios han demostrado que los metabolitos de plaguicidas a menudo se detectan en aguas subterráneas en concentraciones más altas que los compuestos precursores. En un estudio realizado por el Reino Unido, se reportaron concentraciones de metabolitos de plaguicidas medidos en las aguas subterráneas, estos metabolitos se originaron a partir de compuestos no autorizados en el Reino Unido como DDT, heptacloro y atrazina. Estas tres sustancias hacen parte de la lista de las doce sustancias tóxicas más utilizadas en el mundo, incluidas en el tratado de las Naciones Unidas de mayo de 2001 en Estocolmo, Suecia; un total de 127 países adoptaron este tratado. Estas sustancias orgánicas están prohibidas ya que son persistentes, bioacumulables y poseen características de toxicidad capaces de ocasionar efectos adversos al ambiente y a la salud como cáncer hepático y defectos congénitos en personas y animales. Un estudio patrocinado por la Awwa Research Foundation llevo a cabo un diagnóstico del riesgo a partir de los metabolitos de los plaguicidas en EE. UU y el Reino Unido, dicho diagnóstico arrojó para Reino Unido 54 productos identificados como metabolitos de pesticidas. Los compuestos con mayor índice de riesgo fueron los metabolitos de cianazina, seguidos por los de isoproturon, flufenacet, el tebuconazol y el dicamba. El glifosato es ahora el herbicida más usado en el mundo, con aumentos dramáticos en el uso agrícola desde la introducción de cultivos resistentes al glifosato, es comúnmente usado para combatir los

cultivos ilícitos, en Colombia hasta el presente se espera el pronunciamiento de la corte constitucional para retomar su uso envuelto entre una disputa por las partes que están a favor y en contra de su utilización. La degradación microbiana produce amino metilfosfónico (AMPA) y se ha comprobado que el AMPA causa problemas en la salud. La alta solubilidad en agua del glifosato y su metabolito ha significado que el análisis sea difícil.

En Antioquia, en un estudio realizado en el municipio de San Pedro, preocupa el uso de manera frecuente de plaguicidas de toxicidad alta como Lorsban (Clorpirifos), Ráfaga (Clorpirifos), Látigo (Clorpirifos), Neguvon (Metrifonato), Furadán (Carbofurán), Ganabaño y (Cipermetrina), que luego son arrastrados por las lluvias y van a parar a las aguas residuales y los ríos. En 1978, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció una clasificación de los plaguicidas, esta clasificación tiene en cuenta peligrosidad o grado de toxicidad aguda, a su vez se define por la capacidad del plaguicida de producir un daño agudo a la salud dependiendo de una o múltiples exposiciones, en un período de tiempo relativamente corto (tabla 10). (Miriam Janet Gil, 2012)

*Tabla 10 Clasificación de los plaguicidas según su toxicidad*

CLASE	TOXICIDAD	EJEMPLOS
<b>CLASE IA</b>	Extremadamente peligrosos	Paratión, dieldrin
<b>CLASE IB</b>	Altamente peligrosos	Eldrin, diclorvos
<b>CLASE II</b>	Moderadamente peligrosos	DDT, clordano
<b>CLASE III</b>	Ligeramente peligrosos	Malatión

Fuente: (Miriam Janet Gil, 2012)

Por su vida media, los plaguicidas se clasifican en permanentes, persistentes, moderadamente persistentes y no persistentes. Esta clasificación se muestra a continuación (tabla 11).

*Tabla 11 Clasificación de los plaguicidas según su vida media de efectividad*

<b>PERSISTENCIA</b>	<b>VIDA MEDIA</b>	<b>EJEMPLOS</b>
<b>NO PERSISTENTE</b>	De días has 12	Malatión, diazinón, carbarilo, diametrin
<b>MODERADAMENTE PERSISTENTE</b>	Semanas	Paratión, lannate
<b>PERSISTENTE</b>	De 1 a 18 meses	DDT, aldrin, dieldrín
<b>PERMANENTES</b>	De varios meses	Productos hechos a partir de mercurio, plomo, arsénico

Fuente: (Miriam Janet Gil, 2012)

De acuerdo con su estructura química, los plaguicidas se clasifican en diversas familias, que incluyen desde los compuestos organoclorados y organofosforados hasta compuestos inorgánicos. En la tabla 12 se representa esta clasificación.

Son muy variados los tipos de plaguicidas que, en largos periodos de tiempo y desde diferentes fuentes y dosis pequeñas penetran al organismo utilizando distintas vías. Las principales vías de exposición en la población son los alimentos de origen vegetal (frutas, verduras, cereales, leguminosas) o animal (carne bovina, porcina y sus derivados, pescado, productos lácteos, huevo, etc.), y en menor proporción el agua, el aire, la tierra, la fauna y la flora contaminados. Al mismo tiempo se asegura que no hay sección alguna de la población en sí la cual esté exenta de la exposición de estos compuestos y por consiguiente a sus potenciales efectos nocivos para la salud. Esto es por lo cual algunos de los plaguicidas son importantes por el daño que causan a la salud, por su gran demanda de uso y por considerarse como contaminantes emergentes en aguas residuales. (Miriam Janet Gil, 2012)

*Tabla 12 Clasificación de los plaguicidas, según la familia química.*

<b>FAMILIA QUÍMICA</b>	<b>EJEMPLOS</b>
<b>ORGANOCOLORADOS</b>	DDT, aldrín, endosulfán, endrin
<b>ORGANOFOSFORADOS</b>	Bromophos, diclorvos, malatión
<b>CARBAMATOS</b>	Carbaryl, methomyl, propoxur
<b>TIOCARBAMATOS</b>	Ditiocarbamato, mancozeb, maneb

Continuación Tabla 12 página 33

<b>PIRETROIDES</b>	Cypermethrin, fenvalerato, permethrin
<b>DERIVADOS BIPIRIDILOS</b>	Clomequat, diquat, paraquat
<b>DERIVADOS DEL ÁCIDO FENOXIACÉTICO</b>	Dicloroprop, picram, silvex
<b>DERIVADOS CLORONITROFENÓLICOS</b>	DNOC, dinoterb, dinocap
<b>DERIVADOS DE TRIAZINAS</b>	Atrazine, ametryn, desmetryn, simazine
<b>COMPUESTOS ORGANICOS DEL ESTAÑO</b>	Cyhxatin, dowco, plictrán
<b>COMPUESTOS INORGÁNICOS</b>	Arsénico pentóxido, obpa, fosfito de magnesio, cloruro de mercurio, arsenato de plomo, bromuro de metilo, entimonio, mercurio, selenio, talio y fosforo blanco
<b>COMPUESTOS DE ORIGEN BOTÁNICO</b>	Rotenona, nicotina, aceite de canola

Fuente: (Miriam Janet Gil, 2012)

#### **2.4.2. Productos farmacéuticos**

La presencia de productos químicos de origen farmacéutico en el agua ha sido vista como una preocupación debido a que los tratamientos normales no son capaces de eliminar los residuos que dejan productos, por lo general la vía principal de estos desechos son las excretas humanas para llegar al medio ambiente, gran variedad de estos productos ha sido detectados en aguas superficiales y subterráneas por causa de la eliminación de las aguas residuales, dichos residuos llegan al ciclo del agua por varios factores, las plantas de tratamiento de aguas residuales, por ejemplo, estas actúan como una entrada de estos residuos a los cuerpos hídricos como consecuencia de no poder ser retenidos o eliminados allí en los procesos que se realizan, no obstante muchos fármacos de origen veterinario son descargados directamente a los ecosistemas. (Cetina, Viatela, & Miranda, 2016)

##### **2.4.2.1. Analgésicos:**

Tiene un mayor consumo mundial, a su vez son los de mayor automedicación, como ejemplo tenemos el diclofenaco y el ASA los

cuales se reportaron su hallazgo en aguas residuales, al mismo tiempo analgésicos como el naproxeno, el ibuprofeno y el acetaminofén se encontraron en aguas residuales hospitalarias; asimismo los metabolitos del ibuprofeno se han hallado en aguas residuales hospitalarias, esto es un indicador de la importancia de reconocer las rutas metabólicas de los diferentes compuestos para tener certeza o descartar su toxicidad. (Tejada & Edgar Quiñonez, 2014)

#### **2.4.2.2. Antihipertensivos:**

Pertencen a un grupo muy grande de los cuales se destacan el calcio-antagonista, los inhibidores de la enzima convertidor a de angiotensina (IECA) y los betas bloqueadores, entre otros. Algunos  $\beta$ -bloqueadores como el etanol, el metoprolol y el propanol han alcanzado niveles superiores a los  $0.017\mu\text{g/L}$  en efluentes de aguas municipales (Cartagena, 2011), lo anterior se debe al aumento del uso de estos medicamentos por prescripción, “las complicaciones de la hipertensión causan anualmente 9,4 millones de muertes, la hipertensión causa por lo menos 45% de las muertes por cardiopatías, casi el 80% de las muertes por enfermedades cardiovasculares corresponden a países de ingresos bajos y medianos” (Salud, 2013)

#### **2.4.2.3. Antibióticos:**

De los contaminantes emergentes los fármacos son los que probablemente generen mayor preocupación y estudios en los últimos años, en particular los antibióticos, su efecto contra los microorganismos patógenos en animales y humanos, su implementación en la preservación de alimentos ha incrementado su demanda y utilización por parte del ser humano, en la UE se cifra en toneladas por año de uso de antibióticos, tanto así que su empleo es similar al de los pesticidas en cantidad (Alda, 2012), antibióticos como la tetracilinas, los aminoglicósidos, los macrólidos, los betalactámicos y la vancomicina tienen el mayor reporte en los cuerpos de agua (Cartagena, 2011)

### 2.4.3. *Drogas ilícitas*

Las drogas ilícitas están entre los grupos más nuevos de compuestos emergentes encontrados en aguas residuales y aguas superficiales. Puede que suene impresionante encontrar estos compuestos en el agua, pero cabe mencionar que las cantidades consumidas de drogas ilícitas en el mundo son similares a las farmacéuticas. Según datos de la ONU, se calcula, que en el 2008 entre 129 y 250 millones de personas en edades comprendidas entre los 15 y 64 años consumieron drogas ilícitas al menos una vez, entre las drogas ilícitas se encuentran sustancias como anfetaminico (ETA), cannabis, cocaína, opiáceos (heroína) con una estimación de los consumidores de 25, 166, 12 y 16 millones de consumidores. Debido a este uso excesivo de las drogas y la excreta, orina humana o por causa de arrojar los químicos con los cuales se fabrican estas drogas a los cuerpos de agua son la causa por las cuales estos compuestos llegan a las plantas de tratamiento de agua residuales y a cuerpos superficiales de agua, debido a que la mayoría de cuerpos superficiales se pueden utilizar para agua potable es de gran preocupación, estas drogas ilícitas no se eliminan de forma fácil de las aguas residuales, la presencia de la cocaína y su metabolito benzoilecgonina tanto en aguas residuales como superficiales se han encontrado en Italia, varios países europeos y estados unidos. En plantas municipales utilizando tratamientos avanzados como osmosis inversa y en plantas convencionales de agua potable se evaluaron el comportamiento de benzoilecgonina, así como de la metadona y su metabolito EDDP, estos compuestos sobrevivieron a los tratamientos anteriores. Las determinaciones de estos metabolitos en agua de centro poblados son importantes para determinar el consumo de drogas ilícitas, aunque estas estén en nano gramos por litro no se debe descartar su impacto en la fauna y la flora así como en la salud de la población (M. Rosa Boleda, 2011)

#### **2.4.4. *Hormonas esteroideas***

Las hormonas esteroideas son catalogadas como “compuestos disruptores endocrinos” (EDCs), estas hormonas pueden llegar al medio ambiente por medio de diferentes vías siendo la más común la descarga de las estaciones depuradoras de aguas residuales por causa de la eliminación incompleta de que se produce en ellas, las concentraciones de dichas hormonas en los cuerpos de agua son del orden de nano gramos por litro, esto hace necesario metodologías exhaustivas para su determinación, estos compuestos son un grupo de contaminantes emergentes que pueden ser clasificados en diferentes subgrupos como lo son glucocorticoides, andrógenos, estrógenos y progestágenos, las hormonas sirven para el control del metabolismo, inflamación, funciones inmunológicas, equilibrio de sal y agua, desarrollo de características sexuales y capacidad de resistir enfermedades. Las hormonas esteroideas tanto naturales como artificiales alcanzan el medio acuático mediante los efluentes de las estaciones depuradoras de aguas residuales por lo que varios autores han determinado como la principal fuente de contaminación las plantas de tratamiento de aguas residuales. (Rayco Guedes Alonso, 2015)

Estos contaminantes son muy resistentes a la degradación microbiana y a tratamientos convencionales, esteroides como  $17\beta$  Estradiol y  $17\alpha$  Etinilestradiol, se han detectado en efluentes de plantas de tratamiento de todo el mundo a niveles en los que son capaces de causar alteraciones endocrinas; los efectos tóxicos sobre organismos acuáticos pueden llegar a ser cambios fisiológicos en peces producidos por la presencia de estrógenos, disminución de la reproducción o cambios de niveles de vitelogenina en organismos marinos. (Ortiz)

#### **2.4.5. *Compuestos. “estilo de vida”***

La cafeína, la nicotina, y el metabolito de la nicotina han sido ampliamente detectados en el agua subterránea impactada por aguas residuales. Así lo

citan Miriam Janet Gil, Adriana María Soto, Jorge Iván Usma, Omar Darío Gutiérrez, en su artículo del año 2012 llamado “Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos”, quienes comentan que Godfrey et al., Seiler et al. y Teijón et al. y Van Stempvoort et al., encontraron altas concentraciones de los edulcorantes artificiales de acesulfame, sacarina, ciclamato y sucralosa en las aguas subterráneas afectadas por estanques de infiltración de aguas residuales, y Buerge et al., mostraron acesulfamo a ser ampliamente detectada en el medioambiente debido a su uso, la movilidad y la persistencia. En algunos estudios realizados en España en las Islas Canarias se encontró que la cafeína y la nicotina son frecuentemente detectadas en los acuíferos y también en el delta del río Llobregat (77,4% y 71,7%, respectivamente). Otros compuestos detectados, en porcentajes menores, fueron teobromina y la teofilina (50% cada uno en las Islas Canarias) y paraxantina (6% en el área de Llobregat). Las fuentes comunes de cafeína incluyen tanques sépticos, así como el tratamiento de aguas residuales de descarga a las aguas superficiales y subterráneas de la superficie de intercambio de agua en los sistemas acuíferos aluviales. (Miriam Janet Gil, 2012)

#### **2.4.6. *Cuidado personal***

Son producidos para uso directo sobre el cuerpo humano. En general están dirigidos a alterar el olor, el aspecto, el tacto, y no deben mostrar actividad bioquímica significativa. Muchos de estos son usados como ingredientes activos o preservativos en cosméticos, productos de baño o fragancias. En ocasiones estas sustancias son usadas en cantidades mayores a las recomendadas. Los que hacen parte de los contaminantes emergentes son: perfumes, fragancias, policíclicos y macrocíclicos; agentes de protección solar, Benzofenona, metilbenzilidenecambor; repelentes de insectos: N,N-dietiltoluidina. Los productos de cuidado personal se diferencian de los farmacéuticos ya que en grandes cantidades pueden ser directamente

introducidos al ambiente; por ejemplo, estos productos pueden ser liberados dentro de las aguas recreacionales o volatilizados en el aire. Pueden afectar a los organismos acuáticos y a los humanos en ciertas concentraciones, estando presentes como: DEET-N, N-dietil-meta-toluamida, el ingrediente activo más común de los repelentes de insectos; parabenos -ésteres de alquilo del ácido p-hidroxibenzoico, utilizados desde los años 1930 como agentes bacteriostáticos y fungistáticos en medicamentos, cosméticos, y alimentos; bactericida y agentes antifúngicos, triclosan ampliamente utilizado en productos domésticos, tales como rociadores de dientes, jabón y anti-microbianas; almizcles policíclicos -tonalide y galaxolide utilizados como fragancias en una amplia gama de agentes de lavado y de limpieza y de higiene personal-; filtros de protección solar UV/, compuestos principalmente por aromáticos conjugados lipofílicos, detectados en medio acuoso, filtros orgánicos que incluyen las benzofenonas y methoxycinnamates. Adicionalmente, Miriam Janet Gil, Adriana María Soto, Jorge Iván Usma, Omar Darío Gutiérrez, en su artículo del año 2012 llamado “Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos”, encontraron en un estudio realizado por Lindström et al, que detectaron triclosán y un metabolito el metiltriclosán, en aguas superficiales en Suiza. Asimismo, hallaron que Heberer, en una de sus investigaciones, muestra los resultados de las concentraciones de almizcles sintéticos que se encuentran en las aguas residuales, en los lodos de estas, en las aguas superficiales y muestras de biota; estas investigaciones se centraron en estudiar cómo afecta la bioacumulación de estos productos el metabolismo de los peces, y la evaluación del riesgo ambiental y humano.

#### **2.4.7. *Surfactantes***

Comprende residuos de agentes tensoactivos, entre los cuales se incluyen dos grandes tipos de aromáticos, tales como: tensoactivos aniónicos del tipo sulfonato alquilbenceno lineal (LAS) y no aniónicos del tipo

alquilfenolpolietoxilado (APEO). En los últimos años debido al uso indiscriminado de detergentes se ha producido un gran impacto ambiental en diversos ecosistemas acuáticos, cada vez son mayores sus concentraciones en las aguas residuales, y se observa más espuma en los distintos cuerpos de agua, los efectos de los tensoactivos y la presencia de fosfatos en las formulaciones de detergentes, favorecen la proliferación de algas y microorganismos que terminan consumiendo el oxígeno disuelto en el agua, y por consiguiente afectando a la vida acuática. A este fenómeno se le conoce como eutrofización, En los detergentes líquidos se utiliza el pirofosfato de sodio ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ) o de potasio porque se hidroliza en el ion fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) a menor rapidez que el tripolifosfato de sodio, los detergentes después de ser utilizados en la limpieza doméstica e industrial son arrojados a las alcantarillas de las aguas residuales y se convierten en fuente de contaminación del agua. estos surfactantes son importantes en industrias tales como el papel, textiles, recubrimientos, pesticidas agrícolas, aceites combustibles y lubricantes. La producción de los surfactantes aniónicos representa alrededor del 55% de los surfactantes producidos anualmente en el mundo. Los surfactantes no iónicos están en el segundo rango por orden de importancia con un poco menos del 40% del total. Los APEO pasan al ambiente directamente de las plantas de tratamientos de aguas residuales, donde son parcialmente degradados aeróbicamente y parcialmente absorbidos por los lodos residuales. (Agua.org.mx, 2007)

#### **2.4.8. *Productos para tratamientos de aguas***

Durante los procesos de tratamientos químicos de desinfección para agua potable se da lugar a la formación de subproductos indeseables, que tienen un potencial de toxicidad crónica. Entre los principales productos utilizados se tiene al cloro, que además de ser barato, es eficaz en la eliminación de patógenos, proporcionando una protección residual en los sistemas de distribución de agua, pero a su vez el cloro reacciona con la materia orgánica formando subproductos como los trihalometanos y ácidos haloacéticos.

Otros productos utilizados en menor cantidad para la desinfección de aguas son: yodo, bromo y ozono, que también forman subproductos al contacto con la materia orgánica presente. En las plantas de tratamiento, donde cada combinación puede interactuar con la materia orgánica disuelta para producir sus propios subproductos en el agua. Más de 250 subproductos han sido identificados, pero solo se conoce adecuadamente el comportamiento de 20 subproductos, uno de esos subproductos es el yodo-THM y los yodo ácidos, los cuales se encuentran en niveles altos, otro ejemplo son los subproductos de ácidos bromosos los cuales se forman con la interacción entre el bromuro y el ozono que a su vez entran en contacto con la materia orgánica natural; subproductos como halonitrometanos y haloaldehidos que son formados por la pre ozonización en bajas concentraciones. Las concentraciones de cloro, dióxido de cloro, cloroaminas y nitrosaminas que se incrementan por la cloraminación y que a su vez aumentan la concentración en altas cantidades de mutagenos MX son un problema en los tratamientos de aguas lo que se hace necesario realizar estudios para determinar su toxicidad de forma individual con el fin de lograr una desinfección del total de los subproductos. (Zone, s.f.)

#### **2.4.9. Aditivos industriales y subproductos**

Comúnmente utilizados son estabilizadores como disolventes, agentes tensoactivos e inhibidores de corrosión. En este grupo también se encuentran a las parafinas cloradas, que tienen propiedades retardantes de llama y estabilizantes químicos, son utilizadas como aditivos en fluidos de corte y lubricantes en carpintería metálica, en la industria automovilística y como plastificantes en materiales de PVC, en pinturas y adhesivos. Muchos de estos causan problemas en la salud, tales como los disolventes clorados, hidrocarburos de petróleo, incluidos los hidrocarburos poliaromáticos y el combustible oxigenado de éter de metilo butilo terciario, y los plastificantes / bisfenoles resinas, adipatos y ftalatos. Estas sustancias han sido calificadas

como muy tóxicas para la fauna acuática, ya que son persistentes, bioacumulativas, de lenta degradación, e incluso se los puede considerar como carcinógenos para los seres humanos. (Zone, s.f.)

#### ***2.4.10. Retardantes de llama/fuego***

El incendio en las industrias ha disminuido gracias a la utilización de los retardantes de llama, estos químicos son muy utilizados en una amplia gama de productos (televisores, computadoras, camas de hospitales, sillas para las salas de espera y cortinas para los consultorios). Aunque aportan en prevenir incendios, salvar vidas, prevenir daños, reducir costo económico por incendios, los retardantes de llama, así como muchos otros productos químicos, no son eliminados totalmente en las plantas de tratamiento, por lo tanto, aportan a la contaminación emergente en el agua. Entre los retardantes de llama, se encuentran aquellos compuestos basados en organofosfatos, tales como el tris (cloro isopropil) fosfato (TCPP) y tris (2-cloro etil) fosfato (TCEP), usados en productos industriales y de consumo. El TCPP ha sido encontrado con mayor frecuencia y mayor concentración que el TCEP. Igualmente, también se han encontrado compuestos bromados entre los que se destacan, el polibromodifenil éter (PBDEs), hexabromociclododecano (HBCD) y decabromodifeniletano (DBDFE) los cuales se aplican a una diversidad de compuestos o mezclas de compuestos químicos incorporados en plásticos, textiles, circuitos electrónicos, entre otros. En todo el mundo, aproximadamente 5.000.000 de toneladas de bromo, se producen cada año, y a partir del 2000, la cantidad de este tipo de retardante representa el 38% de demanda mundial de bromo, un incremento marcado comparado con el 8% en 1975, encontraron niveles de PBDE en la fauna silvestre, incluyendo invertebrados acuáticos, peces, aves y algunos mamíferos de especies marinas. Las concentraciones son crecientes a lo largo de la cadena alimenticia y de concentraciones más elevadas en fuentes de sitios cercanos de reciclaje de residuos electrónicos. Estos compuestos se asocian con ciertos

efectos en la salud, tales como la toxicidad sobre el comportamiento neurológico, disruptor endocrino y, posiblemente cáncer. Los aditivos alimentarios El citrato de trietilo se usa como aditivo alimentario para estabilizar espumas, por ejemplo, la clara de huevo; también se utiliza en recubrimientos farmacéuticos y como plastificante. Hidroxianisolbutilado (BHA) e hidroxitoluenobutilado (BHT) se utilizan para prevenir el deterioro de la grasa en alimentos. Otros aditivos alimentarios incluyen alcanfor, 1,8-cineol (eucaliptol), citral, citronelal, cis3-hexenol, heliotropina, ácido hexanoico, mentol, alcohol feniletílico, tricantina, y terpineol. Algunos de estos pueden estar implicados como agentes oxidantes o disruptores endocrinos. Los aditivos alimentarios que se han detectado en las aguas subterráneas son el acesulfame edulcorantes, sacarina y sucralosa, así como otros agentes de conservación, tales como parabenos. Este grupo de compuestos no han sido ampliamente estudiados en las aguas subterráneas, pero se considera que son de cuidado y se deben tener en cuenta en estudios futuros. Algunos ftalatos (n-butilftalato, benzilbutilftalato) suelen usarse en la industria de envasado de alimentos, tratamientos de suelos, como antioxidantes alimentarios y como aditivos en plásticos para proporcionarles elasticidad, en productos tales como bolsas de transfusión de sangre, tetinas y mordedores infantiles. Estas sustancias incorporan compuestos catalogados como contaminantes emergentes. (Miriam Janet Gil, 2012)

## Capítulo II CURTIEMBRES

### 1. Efluente de curtiembre

La industria de curtiembre se encarga de transformar la piel animal en cuero, como resultado del proceso de estabilización del colágeno presente en la misma con agentes de curtido, gracias a la formación de complejos tipo de quelotos. Esto se lleva a cabo con la finalidad de impedir su descomposición y facilitar su uso en la fabricación de productos como: calzado, talabartería, tapizados, entre otros. Este proceso se lleva a cabo en cuatro etapas (rivera, curtido, acabado húmedo, acabado seco). (Bógota, 2015)

En Colombia los primeros registros de esta actividad económica datan a la década de 1920 en el departamento de Antioquia, en Cundinamarca inició a mediados de los años 50, en los municipios de Choconta y Villapinzón, se establecieron las primeras curtiembres artesanales en las riveras del río Tunjuelito siendo esta la opción más rentable para trabajar el cuero, trasladándose después hacia la zona conocida en la actualidad como San Benito, a las afueras de Bogotá D.C., hecho que permitió el desarrollo de esta actividad de forma industrial, desencadenando la problemática ambiental relacionada con malos olores, vapores de solventes y vertimientos de los efluentes de las curtiembres al río que contienen residuos del cuero tratado y de los insumos químicos empleados en el proceso. En la década de los 90 después de entrar en vigor la ley 99 de 1993 y la ley 142 de 1994, las autoridades inspeccionan formalmente estas industrias, y para el año 2006 la corporación Autónoma Regional (CAR) define la reglamentación sobre los usos del agua en cada uno de los tramos y afluente del río Bogotá y en el 2009 se establecieron los tipos y cantidades de vertimiento a la red de alcantarillado público por la secretaria distrital de ambiente (SDA). En la actualidad, la industria del curtido y recurtido de cueros se clasifica con los códigos 1511 y 1512, según el código industrial internacional uniforme – CIIU, versión 4.0. Para el año 2014 en el sector de San Benito se encontraban aproximadamente 265 curtiembres registradas, las cuales representan del 70% de las industrias curtidoras del país, son las productoras del 30% de la contaminación vertida al río Bogotá. (GRAJALES & BELTRÁN, 2014)

Las industrias curtidoras tienen un consumo elevado de agua por que los procesos más importantes para convertir la piel en cuero se efectúan sobre medios acuosos, en promedio se estima un gastos de 10 kg agua/1 kg cuero; o en otras palabras este sector consume 400lts-1200lts de agua por piel según el proceso utilizado, en los países en vías de desarrollo se llega a alcanzar un valor de 100 metros cúbicos por tonelada de piel bruta salada procesada, por otra parte, se emplean 442 kg de productos químicos por cada tonelada de piel procesada, teniendo porcentajes de contaminación hídrica por Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) por etapa, siendo el proceso de rivera contribuyente del 80%, en remojo 10%, encalado y desencalado 10%; además el efluente

presenta rangos de salinidad, amoníaco, colorante sintético de fórmula química estructural derivada de anilinas o azocompuestos entre otros. (S.G. Alvarez, 2004)

El proceso más utilizado es el curtido al cromo con un porcentaje del 80% de las industrias del sector, y un 20% utilizan compuestos vegetales; el agua residual que se genera en el primer proceso mencionado generalmente no es recuperable, por la presencia de alta concentración de cromo (3-10 gr/L), así como componentes desengrasantes, aminas, sulfuros, sodio y cloruros, compuestos altamente contaminantes. (GRAJALES & BELTRÁN, 2014)

## 2. Secuencia del proceso

Según la Guía de producción más limpia para el sector curtiembres de Bogotá por la Alcaldía mayor, las industrias de curtiembre tienen un proceso productivo similar en la gran mayoría; con la variante de dosificación de insumos químicos y el tipo de los mismos, esto último dependerá de los proveedores, la calidad de las pieles y el conocimiento del curtido. El proceso de transformación de las pieles inicia instantáneamente se ha sacrificado el animal, su comercialización se realiza en dos presentaciones: pieles frescas y pieles saladas:

- Pieles frescas: Se presenta cuando el tiempo entre el sacrificio y su transformación es corto, el curtido se puede iniciar sin ningún pretratamiento.
- Pieles saladas: se hace el proceso en el que se salan (inmersión en salmuera o adición de sal común) con el objetivo de preservarlas y almacenarlas por periodos de tiempo extendido, evitando su descomposición.

Para la ciudad de Bogotá se puede agrupar el proceso de curtido de pieles en cuatro etapas, así:

- **Etapas 1. Rivera:** Es el tiempo de preparación de la piel para ser curtida sin importar su presentación (fresca o salada), se limpia, acondiciona, hasta que se divide en dos capas, las operaciones unitarias son:
  - ✓ Recepción de materia prima: descarga y almacenamiento temporal de las pieles, tanto frescas como saladas.

- ✓ Pre-descarne: se retira de manera mecánica los restos de musculo y grasa de la piel, se realiza sobre la piel en tripa o remojada.
  - ✓ Remojo: rehidratación de la piel, elimina la sal y otros componentes como sangre, excrementos y suciedad en general.
  - ✓ Pelambre y encalado: retirar el pelo y la capa epidermis de la piel, utilizando cal y sulfuros de sodio, lo cual tiene como efecto un hinchamiento alcalino, el cual permite que se abran las fibras de colágeno, y de esta formar preparar la para el curtido.
  - ✓ Descarne: elimina de manera mecánica la grasa natural del tejido conjuntivo, en el equipo descarnador.
  - ✓ Dividido: Separa la piel en dos capas (flor y carnaza), por medio de una cuchilla.
- **Etapa 2. Curtido:** se prepara la piel para ser transformadas en materiales fuertes y resistentes a la descomposición por medio de agentes curtidos que son fijados en las fibras de colágeno, estabilizándolas a través de enlaces químicos de tres fibras, los agentes curtientes más utilizados son las sales metálicas, principalmente las sales de cromo. A continuación, se explican las operaciones unitarias:
    - ✓ Desencalado: Es la etapa en donde se retira la cal, el sulfuro y además los insumos alcalinos de la piel, utilizando principalmente sales de amoniaco, ácidos orgánicos, tampones, azucares y melezas, ácido sulfoftalico, entre otros. Este proceso neutraliza la piel y determina su hinchamiento.
    - ✓ Purga enzimática: suelta las fibras de colágeno con enzimas proteolíticas, pancreáticas y/o bacterianas y retira los restos de epidermis, pelo y grasa no eliminados anteriormente.
    - ✓ Piquelado: Proceso en donde se lleva las pieles al pH requerido para su curtido, (2.8 - 3.5), con sal y ácidos (sulfúrico, clorhídrico o fórmico), además se detiene la tendencia de hinchamiento y fija las sales de cromo entre las células.

- ✓ Curtido al cromo: transforma la piel en un producto resistente a la descomposición, activando el colágeno de la piel con el agente curtiente, principalmente con sales de cromo trivalente o taninos vegetales.
  - ✓ Ecurrido: retira la humedad, estira las partes arrugadas y mantiene un espesor uniforme
  - ✓ Rebajado: Da un calibre final al curtido, utilizando un equipo provisto de cuchillas que giran a gran velocidad.
- **Etapa 3. Acabado en húmedo:** Proceso que confiere las características de suavidad, color y tacto, que requiere cada tipo de cuero, teniendo en cuenta los requisitos del producto final.
    - ✓ Recurtido: concede al curtido sus características finales, en términos de resistencia y firmeza, dependiendo de su finalidad.
    - ✓ Teñido y engrase: proporciona un color determinado, da textura, llenura, suavidad y flexibilidad.
  - **Etapa 4. Acabado en seco:** Da el aspecto de color y brillo, permite controlar las posibles imperfecciones del producto, sus operaciones unitarias son:
    - ✓ Secado: extrae un porcentaje de humedad.
    - ✓ Ablandado: Evita la dureza del cuero, generando más suavidad.
    - ✓ Esmerilado: Lija para igualar y corregir defectos del lado de la flor.
    - ✓ Desempolvado: Elimina de la superficie del curtido el polvo fino residual generado en la operación de esmerilado.
    - ✓ Pigmentada: Pinta la superficie del cuero por diferentes métodos.
    - ✓ Planchado: se basa en presar el cuero en una placa caliente que varía entre lisa o figuras.
    - ✓ Lacado: da el terminado de calidad que protege el acabado.
    - ✓ Medido: determina el área del cuero.
    - ✓ Almacenado: se dispone el cuero terminado para su protección, uso y/o comercialización.

En la ilustración se muestra el diagrama de flujo del proceso productivo de las curtiembres en Bogotá. (Bógota, 2015)

Ilustración 7 Diagrama de flujo del proceso productivo.



Fuente: (Bógota, 2015)

### 3. Impactos ambientales del proceso de producción de curtido de cueros

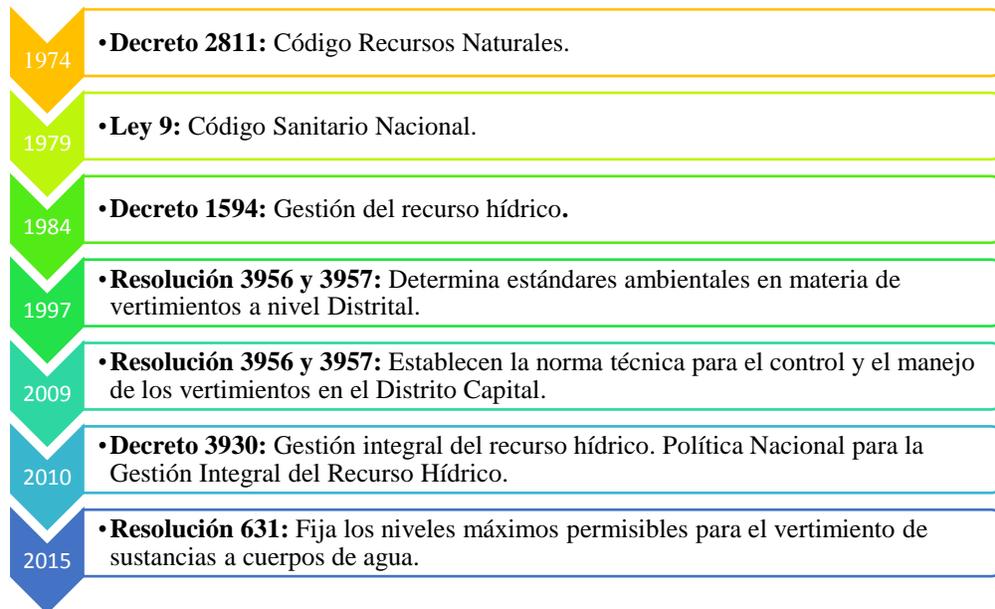
La etapa de biodegradación de materia orgánica vertida en efluentes, consume el oxígeno disuelto del cuerpo de agua receptor, que acompañado de sales como cloruro de sodio y ácidos como el ácido sulfúrico y fórmico, alteran la biota y las funciones naturales de los ríos; en el caso del ácido sulfúrico empleado en el proceso de eliminación del pelo o pelambra, en el momento en que se transforman en ácido sulfhídrico es nocivo para la salud, al punto de que entre 20 y 50 ppm en el aire causa de malestar agudo a sofocación y a muerte por sobreexposición, esta toxicidad es semejante a la del ácido cianhídrico, desde las 50 ppm, en las células receptoras del olfato provoca un efecto narcótico, en donde el afectado llega al punto de no percibir el hedor, a partir de las 100 ppm puede ocurrir la muerte; en cuanto a los restos biológicos no pueden ser utilizados en procesos

de compostaje u otros métodos de reutilización, gracias a su exposición intensiva a químicos; además la implementación del metal pesado cromo (III) con posible oxidación a cromo (VI), es difícilmente biodegradable, siendo una carga para el ambiente por su persistencia, acumulación en el tiempo, con efectos impredecibles en la vida acuática, adicionalmente se comprobó que es cancerígeno para los humanos, teniendo en cuenta que los demás compuestos curtiertes como productos químicos florados y polímeros, esteres de ftalato, compuestos orgánicos de estaño empleados como catalizadores son altamente tóxicos; los productos más utilizados como solventes son los COVS- (Compuestos Orgánicos Volátiles) sustancias restringidas por normativa internacional gracias a sus impactos negativos en el ambiente y la salud; finalizando con el hecho de que el ineficiente uso de agua para estos procesos, generan altos volúmenes de vertimiento diarios a los cuerpos de agua naturales. (greenpeace, 2012)

#### 4. Legislación

En el territorio nacional desde el año 1974 se ha buscado proteger el medio ambiente, con el código de recursos naturales, a continuación, se muestra el avance de la normativa de vertimiento en colombiana en la ilustración 7. (Bógota, 2015)

*Ilustración 8 Avance de la normativa de vertimiento en colombiana.*



Fuente: Editado por autor, información tomada de (Bógota, 2015)

En la actualidad, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA, reglamentaron el Artículo 28 del Decreto 3930 de 2010, crearon una nueva normativa de vertimientos, la Resolución 631 de 2015, la cual busca garantizar la implementación del control efectivo de las sustancias contaminantes que son vertidos en los cuerpos de agua, en esta normativa se contemplan 56 parámetros y 73 actividades para 8 sectores productivos; las industrias de curtiembres hacen parte del sector de ganadería, los límites máximos interpuestos por la normativa se muestra en la tabla 13. (SOSTENIBLE M. D., 2015)

*Tabla 13 Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domesticas (ARND) a cuerpos de aguas superficiales.*

PARÁMETRO	UNIDADES	GANADERÍA DE BOVINO, BUFALINO, EQUINO, OVINO Y/O CAPRINO (BENEFICIO)	GANADERÍA DE BOVINO, BUFALINO, EQUINO, OVINO Y/O CAPRINO	GANADERÍA DE PORCINOS (CRÍA)	GANADERÍA DE PORCINOS (BENEFICIO)
<b>PH</b>	unidades de pH	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
<b>DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (DQO)</b>	mg/L O2	500	900	900	800
<b>DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO5)</b>	mg/L O2	250	450	450	450
<b>SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)</b>	mg/L	150	200	400	200
<b>SOLIDOS SEDIMENTABLES (SSED)</b>	mg/L	5	5	5	5
<b>GRASAS Y ACEITES</b>	mg/L	20	50	20	30
<b>SUSTANCIAS ACTIVAS AL AZUL DE METILENO (SAAM)</b> COMPUESTOS DE FOSFORO	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte

Continuación Tabla 13 página 50

<b>ORTO FOSFATOS (P-PO43-)</b>	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
<b>FOSFORO TOTAL (P)</b>	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
<b>COMPUESTOS DE NITRÓGENO</b>					
<b>NITRATOS (N-NO3-)</b>	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
<b>NITRITOS (N-NO2-)</b>	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
<b>NITRÓGENO AMONIACAL (N-NH3)</b>	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
<b>NITRÓGENO TOTAL (N)</b>	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
<b>IONES</b>					
<b>CLORUROS (CL-)</b>	mg/L	500	500		
<b>SULFATOS (SO42-)</b>	mg/L	500	500		
<b>OTROS PARÁMETROS PARA ANÁLISIS Y REPORTE</b>					
<b>ACIDEZ TOTAL</b>	mg/L Ca CO3	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
<b>ALCALINIDAD TOTAL</b>	mg/L Ca CO4	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
<b>DUREZA CÁLCICA</b>	mg/L Ca CO5	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
<b>DUREZA TOTAL</b>	mg/L Ca CO6	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
<b>COLOR REAL (MEDIDA DE ABSORBANCIA A LAS SIGUIENTES LONGITUDES DE ONDA: 436NM, 525NM, 620NM)</b>	m - 1	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte

Fuente: (SOSTENIBLE M. D., 2015)

# Capítulo III TIPOS DE TRATAMIENTOS

## 1. Pretratamiento

Su función es remover los sólidos de gran tamaño y las arenas presentes en el afluente de agua a la planta de tratamiento, evitando los daños por corrosión de los equipos involucrados en los diferentes procesos de tratamiento de la planta. Se clasifican así:

### 1.1.Cribado o desbaste:

*Ilustración 9 Pre-Tratamiento, Rejillas.*



Fuente: (AGUA C. N., 2016)

El Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento, en su capítulo Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: pretratamiento y tratamiento primario, describe en la página 1 “El pretratamiento con rejillas es uno de los procesos más antiguos. En las plantas de tratamiento de aguas residuales, las rejillas remueven los contaminantes gruesos procedentes de la corriente para proteger de posibles daños la operación y al equipo de las unidades siguientes. Algunas de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales modernas emplean rejas, rejillas gruesas

y rejillas finas. Las rejillas gruesas, normalmente utilizadas como la primera operación unitaria de la unidad, quitan los sólidos y basura que de lo contrario podrían dañar o interferir con las operaciones de los equipos de los procesos que siguen en la planta de tratamiento, tales como bombas, válvulas, aireadores mecánicos y filtros biológicos. Se incluyen en la categoría de malla gruesa las rejas de limpieza manual y mecánica, incluyendo bastidores de basura. Las rejillas consisten en barras de acero verticales o inclinadas, espaciadas a intervalos iguales a través de un canal por el que fluye el agua residual. Los criterios utilizados en su diseño incluyen: el tamaño de la barra, el espaciado y el ángulo desde la vertical, así como la anchura del cauce y la velocidad de aproximación de las aguas residuales. Las rejillas gruesas más comúnmente utilizadas se limpian mecánicamente. La Tabla 8 muestra los rangos de tamaño típicos y criterios de diseño.” (AGUA C. N., 2016)

*Tabla 14 Tamaño de apertura de rejas y rejillas.*

CONCEPTO	RANGO	COMENTARIOS
<b>APERTURAS DE REJAS RETENEDORAS DE BASURA</b>	38-150mm	Se usa frecuentemente en combinación con otros sistemas, el tamaño de las aperturas depende del equipo
<b>APERTURA DE REJILLAS MANUALES</b>	25-50mm	Se usan en plantas pequeñas o en canales bypass
<b>VELOCIDAD DE APROXIMACIÓN</b>	0.30-0.60mm	
<b>REJILLAS DE LIMPIEZA MECÁNICA</b>	6-38mm	La apertura de 18 mm se considera satisfactoria para la protección de los equipos de los procesos siguientes
<b>VELOCIDAD DE APROXIMACIÓN MÁXIMA</b>	0.60-1.20mm	

Continuación Tabla 14 página 53

<b>VELOCIDAD DE APROXIMACIÓN MÍNIMA</b>	0.30-0.60mm	Velocidad necesaria para evitar la acumulación de arenas
<b>REJILLAS CONTINUAS</b>	6-38mm	Este tipo de rejilla es conveniente con aperturas de 6 a 18 mm
<b>VELOCIDAD DE APROXIMACIÓN MÁXIMA</b>	0.30-1.20 m/s	
<b>VELOCIDAD DE APROXIMACIÓN MÍNIMA</b>	0.30-0.60 m/s	
<b>PERDIDA DE CARGA ADMISIBLE</b>	0.15-0.60m	
<b>TRITURADOS (REDUCCIÓN DE TAMAÑO SOLAMENTE)</b>	6-13mm	En canal abierto
<b>PERDIDAS TÍPICAS</b>	300-450mm	
<b>TAMIZ FIJO ESTÁTICO (REJILLA FINA)</b>	2.3 a 6.4 mm	Aperturas menores a 2.3 mm son usadas en pre tratamiento o tratamiento primario
<b>TAMIZ AJUSTABLE</b>	0.02 a 0.3 mm	Poco utilizado en plantas municipales, solo en el efluente secundario.

Fuente: (AGUA C. N., 2016)

Este tipo de pretratamiento se puede clasificar así:

- Cribado por medio de rejas y rejillas.
  - ✓ Rejillas de limpieza manual.
  - ✓ Rejas y rejillas de limpieza automática.

### 1.2. Tamizado

Un método que puede perfeccionar el proceso de eliminación de residuos sólidos, es el tamizado; en este caso la separación libre entre barras es del orden de milímetros; sustituyendo en muchos casos los desbastes, logrando incluso hasta eliminar arenas gruesas y hasta un porcentaje del 30% de grasas. Se pueden distinguir entre: (Cruz & Mallebrera)

- Macro tamizado: el paso de los tamices es  $> 0,2$  mm
- Micro tamizado: el paso de los tamices es  $< 100$  micras

Y se pueden clasificar en:

- Tamices estáticos
  - ✓ Planos
  - ✓ curvos
- Tamices giratorios
- Tamices con superficies móviles

### **1.3.Remoción de grasas**

Hace referencia a una unidad que elimina grasas y aceites, cuenta con un mecanismo de descarga inferior para la evacuación del agua, obteniendo como resultado en la parte superior una película de grasas, que se remueve posteriormente de forma mecánica. (Orozco, 2017)

### **1.4.Desarenado**

Los afluentes de aguas negras por lo general transportan material particulado como arena, el cual puede tener su origen por escorrentía de agua lluvia, o agua potable utilizada para el aseo general, este material afecta negativamente la tubería de aducción, o conducción además de los equipo presentes en la planta, para prevenir esta problemática se diseña una unidad denominada desarenador; el Manual de tratamiento lo explica como “una parte importante del tratamiento de aguas residuales, evita la abrasión innecesaria y el desgaste de los equipos mecánicos, la deposición de arena en tuberías y canales, y la acumulación de arena en digestores anaerobios y tanques de aireación. Además, reduce la frecuencia de limpieza del digestor causada por la acumulación excesiva de arena. La experiencia en la operación de plantas ha demostrado que la arena está presente en las aguas residuales, normalmente transmitida por los sistemas de alcantarillado separados o combinados, sobre todo por el segundo. Sin el desarenado, la arena sería eliminada en los clarificadores primarios o, si la planta carece de tratamiento primario, en

tanques de aireación y clarificadores secundarios. La instalación de un sistema de desarenado es ahora una práctica común para las plantas de tratamiento con equipos mecánicos y procesos del manejo de lodos, ya que la retención de las arenas evita que los equipos se deterioren. (AGUA C. N., 2016)

Los métodos se eligen con base en la pérdida de carga, requerimientos de espacio, topografía, tipo de equipo utilizado en la planta y consideraciones económicas. Algunos desarenadores se emplean para controlar la velocidad del agua residual que entra en la planta. Estos se pueden dividir básicamente en tres tipos: de velocidad controlada, aireados y de nivel constante (AGUA C. N., 2016). Este método se puede clasificar en:

- Desarenadores horizontales con control de velocidad
- Desarenadores aireados
- Desarenadores de vórtice
- Desarenadores rectangulares de nivel constante

## **2. Tratamiento primario**

Es la etapa del proceso que se encarga de eliminar los sólidos en suspensión, y agentes patógenos por medio de procesos físico-químicos que se explican a continuación:

### **2.1.Sedimentador**

Proceso físico que también recibe el nombre de decantador, que se basa en la separación por gravedad permitiendo el descenso de la partícula más densa que el agua acumulándose en el fondo del sedimentador, tiene su base en la densidad del líquido, el tamaño, el peso específico y morfología de la partícula. Si la partícula posee un peso y tamaño considerable y densidad del agua, el proceso será más eficaz. (Cyclus)

## **2.2.Flotación**

Es el proceso físico que tiene como objetivo remover los sólidos suspendidos y DBO (demanda bioquímica de oxígeno) del agua residual, aprovechando que estas partículas sean menos densas que el agua, su eficiencia depende del tiempo de retención el cual se recomienda que sea mínimo de una hora, una profundidad mínima de 2.5 a 4 m, y una velocidad de 0.3m. (Orozco, 2017)

## **2.3.Coagulación-sedimentación**

Parte de la materia suspendida son partículas muy pequeñas, lo que conforma una suspensión coloidal, que tiene como comportamiento común una sedimentación muy lenta para el proceso, lo que conlleva a la implementación de agentes químicos denominados coagulantes, que funcionan desestabilizando la suspensión coloidal (coagulación), para así favorecer la floculación que facilita la sedimentación de las mismas. (Cyclus)

## **2.4.Filtración**

Operación mecánica empleada para separar partículas sólidas suspendidas en un medio líquido, este proceso físico consiste en hacer fluir el agua a través de un medio poroso permeables capaz de permitir el paso del líquido únicamente, con el objetivo de retener la mayor cantidad de materia suspendida, por lo general es construido en base de diferentes diámetros de grava a alturas variables. (S.A.S., 2018)

## **2.5.Tanque séptico**

Es un proceso físico y biológico definido por la sedimentación y digestión de materia orgánica en el mismo tanque, evitando problemas de excavación en su construcción, es principalmente utilizado en zonas donde no se cuenta con un sistema de tratamiento de agua residual para su disposición final. (Orozco, 2017)

## **2.6.Tanque Imhoff**

Sistema de tratamiento anaerobio de agua residual con capacidad de tratar los efluentes de hasta 5000 habitantes o menos, se denominó así en honor al ingeniero alemán especializado en aguas Karl Imhoff (1876-1965), teniendo en cuenta que no tiene partes mecánicas su operación es sencilla, está equipado con dos compartimentos, uno inferior que tiene como función la digestión de los sedimentos,

y el superior que es denominada como la cámara de sedimentación, los sólidos se transportan de un compartimento a otro a través de la apertura que va de la zona de sedimentación a la zona de digestión. (Adminmgv, 2016)

### **2.7.Reactor anaerobio de flujo a pistón – RAP**

Esta tecnología puede trabajar en regiones donde la temperatura se encuentre entre 10 y 20°C, ventaja en comparación al sistema UASB (Reactor de manto de lodo y flujo ascendente), esta condición permite la implementación de este sistema en zonas como la región Andina; además trabaja con caudales pico máximos y mínimos sin necesidad de un tanque de igualación, se toma un tiempo de 40 a 60 día arrancar el sistema, obteniendo un lodo granular con una concentración 1 gr. SSV/lt; manteniendo unas condiciones de operación después de la puesta en marcha de un tiempo de retención hidráulica (TRH) 8hr, una velocidad de ascenso el flujo del RAP 0.313 +/- 0.115 m/h, y un numero de cámaras de 11. (Arias, 2013)

### **2.8.Reactor anaerobio de flujo ascendente- UASB**

Es un tratamiento de tanque simple, cuyo funcionamiento se basa del ingreso del agua residual por el fondo, fluyendo de forma ascendente, una capa de lodo suspendida cumple la función de filtrar el agua, tratándolas a medida que se va recorriendo la capa, gracias a la acción de microorganismos que se alimentan de la materia orgánica presente en el afluente del reactor. (saneamiento, 2009)

### **2.9.Lagunas de estabilización (Oxidación)**

Es un proceso simple que tiene el objetivo de embalsar agua residual mejorando sus características sanitarias, se construyen de profundidades pequeñas (2-4 m) y con periodos de retención relativamente grandes (generalmente de días), en estas se lleva a cabo un proceso denominado autodepuración o estabilización natura, en el que ocurren fenómenos físicos, químicos, bioquímicos y biológicos, procesos que ocurre en todo cuerpo de agua estancada con contenido de materia orgánica biodegradable. (estrucplan, 2004)

### **3. Tratamiento secundario**

Es la etapa del sistema que tiene como objetivo eliminar la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y sólidos en suspensión, los más utilizados son:

#### **3.1.Laguna aerobia**

Cumple la función de estabilizar la materia orgánica por medio de oxidación biológica. Estas condiciones se generan a poca profundidad, conservadas por la acción de la fotosíntesis, con gran producción de algas que deben ser retiradas periódicamente, con retiro de lodos, soportan altas cargas de DBO (Demanda bioquímica de oxígeno) superiores a 150 kg/hab.d. (Orozco, 2017)

#### **3.2.Laguna facultativa**

Este tipo de lagunas posee una zona aerobia y una anaerobia, siendo respectivamente en superficie y fondo; con la finalidad de estabilizar la materia orgánica en un medio oxigenado dotado gracias a las algas presentes, con la ventaja de que en ella se puede desarrollar cualquier tipo de microorganismos, bacterias y protozoarios, además de las algas que son la principal fuente de oxígeno; este tratamiento tiene el objetivo de obtener un efluente con la mayor calidad posible, donde se haya alcanzado una elevada estabilización de materia orgánica, y reducción de nutrientes y bacterias Coliformes. (Gamarra, 2016)

#### **3.3.Lodos activados**

Es un proceso biológico o mejor conocido un bioproceso, el cual permite desarrollar una depuración de origen natural donde los microorganismos tratan el agua residual, convirtiéndola a un estado natural, principalmente por procesos anaerobios, por medio de aireación prolongada y recirculación de lodos activos que eliminan las sustancias biodegradables disueltas en el agua residual. (S.A.S., 2018) Se pueden clasificar en:

- Según la etapa de tratamiento del agua residual
  - ✓ Crudos
  - ✓ Primarios
  - ✓ Biológicos, secundarios o activos

- ✓ Mixtos
- ✓ Químicos, físico-químicos, o terciarios
- Según el tipo de tratamiento en la línea de lodos
  - ✓ Tratados
  - ✓ Deshidratados o secados
  - ✓ Compostados
- Según el origen del efluente a tratar
  - ✓ Urbanos
  - ✓ Industriales

### **3.4.Zanjas de oxidación**

Es una variedad de tratamiento de lodos activados, está limitado para un efluente proveniente de localidades de 1000 hab. O volúmenes líquidos  $<1500\text{m}^3$ , con cargas orgánicas de hasta 500 kg. Tirantes de 1.5 m. Esto cuando los rotores de eje horizontal no obtienen una mezcla adecuada en el fondo de zanjas profundas, si se cuenta con rotores de 1m de diámetro se puede instalar en profundidades de 3m para tratar el efluente de 50000 hab. (ambiental, 2005)

### **3.5.Filtros percoladores**

Es un filtro biológico de lecho fijo que opera bajo condiciones aerobias, su funcionamiento se hace en dejar caer el agua residual decantada sobre el filtro. Al fluir el agua a través de los poros del filtro, la materia orgánica se degrada con ayuda de los microorganismos o biomasa formada en el material del filtro, este último debe tener alta superficie específica entre 30 y 900  $\text{m}^2/\text{m}^3$ , de esta forma se previene obstrucciones y asegura una eficiencia en el tratamiento siendo fundamental garantizar un pretratamiento. Esta tecnología por lo general tiene 1 a 3 m de profundidad, pero los que contienen material plástico que es más ligero pueden ser de hasta 12 m de profundidad. (saneamiento, 2009)

### **3.6.Biodiscos**

Es una tecnología conformada por un conjunto de discos, de un material determinado por ejemplo polietileno corrugado, que giran en torno a un eje horizontal, situados

dentro del reactor. Sobre este soporte se genera una biopelícula de microorganismos de tipo bacteriano, el cual se sustenta en base de la materia orgánica disuelta en el agua residual, cuando una fracción del disco está expuesta la biomasa toma el oxígeno necesario para la inmersión donde se produce la degradación de materia orgánica. (Envitech, 2019)

#### **4. Tratamiento terciario o complementario**

Conocido también como tratamientos avanzados, permite tener efluentes finales de mayor calidad, que permiten el vertimiento en zonas muy exigentes o hasta su reutilización. (Secretariado Alianza por el Agua) En esta etapa del tratamiento se puede encontrar:

##### **4.1.Lagunas de maduración**

Son muy parecidas a las lagunas facultativas, y su objetivo principal es la eliminación de bacterias patógenas, siempre operan al menos como lagunas secundarias, es decir como mínimo el agua residual debió haber pasado antes por otro tratamiento antes que ellas, la secuencia más frecuente y de mayor eficiencia es: laguna anaerobia-laguna facultativa-laguna de maduración, si bien hay diferentes combinaciones y a menudo se instalan más de una laguna de maduración; en ocasiones están son la etapa final del tratamiento de otros sistemas de depuración. (Cidta, 2010)

##### **4.2.Electrocoagulación**

Es un modelo alternativo para la depuración de aguas residuales, el cual desestabiliza los contaminantes del agua sin importar cuál sea su estado dentro de ella, gracias a la acción de corrientes eléctricas directa de bajo voltaje y por la acción de electrodos metálicos de sacrificio, los cuales son normalmente aluminio/hierro. (Envitech, 2019) De este tipo de tratamiento se profundizará en el siguiente capítulo.

##### **4.3.Desinfección**

Es el último proceso unitario de tratamiento del agua, el cual cumple con el objetivo de garantizar la calidad de la misma desde el punto de vista microbiológico, asegurando que sea apta para el consumo humano, gracias a que el agente físico o

químico utilizado (el más frecuente el cloro) se encarga de eliminar los microorganismos existentes, capaces de producir enfermedades, esta última etapa es un proceso selectivo pues no destruye todos los organismos presentes en el agua y no siempre elimina todos los patógenos, razón por la cual necesita de procedimientos previos que si lo hagan. (Ada Barrenechea Martel, 2014)

## **Capítulo IV ELECTROCOAGULACION**

A raíz de las problemáticas ambientales por los vertimientos de agua residual industrial, y en búsqueda de avances en eficiencia y sustentabilidad se han desarrollado una serie de tecnologías basadas en la electroquímica, que garantizan ventajas en comparación con los métodos tradicionales de tratamiento puntual, la electrocoagulación, la electroflotación y la electrodecantación hacen parte de este grupo; en esta investigación se va a profundizar en la primera, teniendo en cuenta que no es una tecnología nueva, sin embargo ha sido poco estudiada y desarrollada, pese a esto ha logrado alcanzar un aprovechamiento importante en el sector de tratamiento puntual de algunos contaminantes, captando en los últimos años interés científico, gracias a la necesidad de entender a fondo el proceso y sus mecanismos. (Mejía, Ruiz, & Giraldo, 2006)

### **1. Origen**

La ciencia de la electroquímica da sus inicios a finales del siglo XVIII con las investigaciones de Galvani y Volta, y ha tenido desarrollos y aplicaciones en varias áreas. Cabe mencionar su utilización en el arranque de los motores de los automóviles, en procesos de síntesis químicas, así como métodos para la eliminación de la contaminación. La electrocoagulación nace a inicios del siglo XX, más específicamente en 1906 en Estados Unidos lugar donde se otorga la primera patente. Como resultado de diversos problemas de tipo financiero y regulación de incentivos causaron tropiezos para que la industria se hiciera con el uso de esta técnica, cabe resaltar que se conocen desarrollos anteriores de esta tecnología, si bien la primera patente data de 1906 al otro

lado del océano atlántico años atrás en 1888 exactamente se reportó el primer ensayo en Londres por Webster el cual utilizaba ánodos de hierro soluble con una potencia de 1.8 vatios entre los electrodos a una distancia de una pulgada y una corriente anódica de 0.6 A/pie<sup>2</sup>. Wolff electrolizó una solución concentrada de sal para producir cloro y soda cáustica en 1893 que utilizaba para esterilizar aguas negras en Brewster condado de Putnam en el estado New York. En 1896 se usó en Louisville, Kentucky, una modificación del proceso de Webster para coagular agua cenagosa del río Ohio, en este proceso se utilizaron ánodos de hierro y aluminio. 12 años después en Santa Mónica se utilizó el proceso de Webster arrojando unas reducciones de 40% de materia orgánica, Bull en 1911 electrolizó una salmuera con ánodos de grafito interponiendo una membrana de asbesto entre los electrodos. En el año que iniciaba la primera guerra mundial se utilizó en New York una modificación del proceso de Webster llamado Landreth, en este se adiciona Cal para mejorar la conductividad del electrolito. Alemania décadas más tardes utilizaría la electrocoagulación en 1932 con eficiencias del 50% de reducción de la DBO en aguas residuales. Sin embargo, este proceso fallo por el alto costo de la energía y la necesidad de recambiar los electrodos, otro país en utilizar la electrocoagulación fue la unión soviética URSS en 1947, utilizaría el proceso con electrodos de hierro para formar hidróxido ferroso siendo capaz de obtener remociones de 70% al 80% para la DBO, además también se han reportado procesos para remover partículas dispersas de aceite, grasas y petróleo. Unos años más tarde en la década de los 50 el profesor Mendía, de la universidad de Nápoles hizo uso de esta técnica para la desinfección las aguas negras de ciudades costeras, en dicho proceso se mezcló 25% al 30% en volumen de agua de mar antes de la electrolisis. En noruega, Foyen combinó 20% de agua de mar con las aguas residuales en la electrolisis para la remoción de fosfato haciendo uso de electrodos de carbón, este método tuvo problemas de corrosión. En 1971, en Vancouver del norte, se usaron ánodos de aluminio para disolverlos y coagular aguas negras, cabe destacar que este proceso operó a un costo menor que el requerido con alumbre. (Ruiz Á. A., 2005)

En las últimas décadas se han reportado trabajos en donde se utiliza la electrocoagulación para remover partículas de aceite, grasas, petróleo en tratamientos de

agua residual provenientes de procesos de electroplateado, fábrica de textiles y en procesos de potabilización del agua en sí. (Ruiz Á. A., 2005)

## **2. Fundamento**

Esta tecnología tiene semejanza con la coagulación, teniendo en cuenta que se caracteriza por que presenta una mayor eficiencia, ventaja determinada por los cationes de sacrificio generados, los cuales presentan mayor porcentaje de remoción frente a los provenientes de productos químicos tradicionales como el sulfato de aluminio o hierro. Su uso implica utilizar un reactor de electrocoagulación, considerado como una celda electrolítica cuyos elementos conductores de corriente o electrodos, son sumergidos en el flujo de agua que contiene los metales o sustancias a remover con el tratamiento, este reactor es aprovechado como un medio electrolítico que puede tener una disposición discontinua o continua. Contemplando que su funcionamiento requiere de una fuente externa de energía eléctrica, que da origen a las reacciones electroquímicas como consecuencia del flujo de electrones entre los electrodos metálicos y los contaminantes presentes en el efluente, lo cual tiene como efecto procesos de reducción en el cátodo y oxidación en el ánodo, del mismo modo tienen como resultado iones metálicos y oxígeno, el ultimo producido por la hidrolisis del agua, cuando esto ocurre los compuestos contaminantes forman componentes hidrofóbicos, los cuales según su densidad se decantan o flotan, facilitando su remoción por métodos de separación secundaria. Una amplia variedad de especies coaguladas e hidróxidos metálicos pueden ser formados en base a los iones metálicos a un pH apropiado, dando paso a la desestabilización, sedimentación y eliminación de contaminantes disueltos como por ejemplo los metales pesados. Los compuestos más estudiados son: arsénico, níquel, hierro, zinc, cobre, cadmio, plomo, cromo hexavalente y mercurio, para los cuales los electrodos más utilizados en este proceso son: hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) y aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ), donde se han reportado altos porcentajes de remoción. (Barrera, García, & Cuervo, 2013)

### **2.1. Proceso de electrocoagulación**

Según Mejía, Ruiz y Giraldo los procesos físicos y químicos que ocurren durante la electrolisis permiten la remoción de los contaminantes, los cuales se describen así:

En los electrodos se generan iones positivos y negativos gracias a las reacciones que en ellos suceden, el ánodo provee iones metálicos, a este electrodo se le conoce como de sacrificio, gracias a que la placa metálica que lo conforma se disuelve, mientras la placa que forma el cátodo permanece sin disolverse.

Los iones cumplen la función de desestabilizar la carga que poseen las partículas contaminantes presentes en el agua, al neutralizarse las cargas, los sistemas que permiten que las partículas estén suspendidas desaparecen, permitiendo la formación de agregados de los compuestos dando paso al inicio de la coagulación.

Los electrodos que generan iones desencadenan los procesos de eliminación de los contaminantes, procesos que se puede dar por dos vías: reacción química y precipitación, o procesos físicos de agregación de coloides, que a partir de su densidad decanta o flota.

Las principales reacciones que pueden sufrir las partículas de contaminantes son: hidrólisis, electrolisis, ionización y formación de radicales libres. Reacciones que cambian las propiedades del sistema agua-compuestos contaminantes, que conllevan a la eliminación de la carga contaminante del agua.

La ley de Faraday es la que rige el proceso de electrocoagulación, dice que la cantidad de sustancias formadas en un electrodo es proporcional a la cantidad de cargas que pasan a través del sistema, y a su vez el total de moles de sustancias formadas está relacionado estequiométricamente con la cantidad de electricidad puesta en el sistema.

A diferencia de los procesos convencionales, el coagulante en la electrocoagulación es formado in situ mediante las reacciones dadas por la disolución de iones del metal que conforma el electrodo de sacrificio.

Según explica Mohllah, en este proceso intervienen tres etapas: la primera es la formación del coagulante in situ mediante la oxidación electrolítica del metal del ánodo, seguidamente se desestabilizan los contaminantes, y por último se forman los floculos por agregación de partículas del contaminante o adsorción de estas en el coagulante.

Este proceso es afectado por diferentes factores, entre los más importantes se encuentra la naturaleza y concentración de contaminantes, el pH del agua residual y la conductividad, factores que determinan y controlan las reacciones ocurridas en el sistema y la formación de coagulante. (Mejía, Ruiz, & Giraldo, 2006, págs. 65, 66)

### **3. Ventajas y desventajas**

El proceso de electrocoagulación ofrece grandes ventajas y a su vez se encuentran algunas desventajas como:

#### **3.1. Ventajas** las más relevantes son:

- Costos de operaciones menores en comparación con los métodos convencionales de tratamiento.
- Maquinaria sencilla, pequeña y de fácil operación.
- No requiere almacenamiento, ni uso de equipos químicos.
- Genera lodos compactos, en menor cantidad, menor impacto por disposición de estos residuos.
- Producción de floculos de gran tamaño en comparación a los métodos convencionales.
- Efectividad en remoción de un amplio rango de contaminantes.
- Permite la purificación y reciclaje del agua.
- La transmisión de corriente permite la excitación de las partículas más pequeñas de los contaminantes, aumentando la coagulación.
- Reduce la contaminación de los cuerpos de agua naturales.
- Aporta un resultado de agua con menor cantidad de solidos disueltos, permitiendo reutilizarla con un costo menor de tratamiento.
- Puede generar agua potable, incolora e inodora.
- La remoción de los contaminantes se puede hacer gracias al arrastre a la superficie por burbujas facilitando su eliminación.
- Menor generación de sales y residuos. (Ruiz Á. A., 2005, págs. 54, 55)

### **3.2.Desventajas** las principales son:

- Se hace necesario reponer los electrodos de sacrificio.
- Los lodos residuales tienen alto contenido de hierro y aluminio dependiendo del material de los electrodos de sacrificio.
- Se convierte en un tratamiento costoso, si en la región la tasa de electricidad es alta.
- La formación de oxígeno en el ánodo puede convertirse en una capa que impide la transmisión de electricidad, disminuyendo la eficiencia del tratamiento. (Mejía, Ruiz, & Giraldo, 2006, pág. 65)

## **4. Diseño**

A partir de la revisión bibliográfica se deben tener en cuenta en el siguiente orden los parámetros que afectan el diseño del reactor de electrocoagulación:

- Área de la celda gracias a que de ella depende el volumen de agua a tratar.
- Tipo de electrodo, los materiales más utilizados son el hierro, y con mayor efectividad el aluminio, determinando la distancia entre placas.
- Variabilidad de la solución de acuerdo al pH y la conductividad. (Gonzalez, 2015)
- Numero de celdas.
- Flujo de entrada.
- Forma de operación: tipo Batch o proceso continuo.
- Tiempo de residencia.
- Materiales de construcción.
- Relación voltaje e intensidad de corriente de la fuente de poder de corriente y la capacidad. (Sanchez & Flores, 2010)

El reactor se diseña contemplando tres regiones:

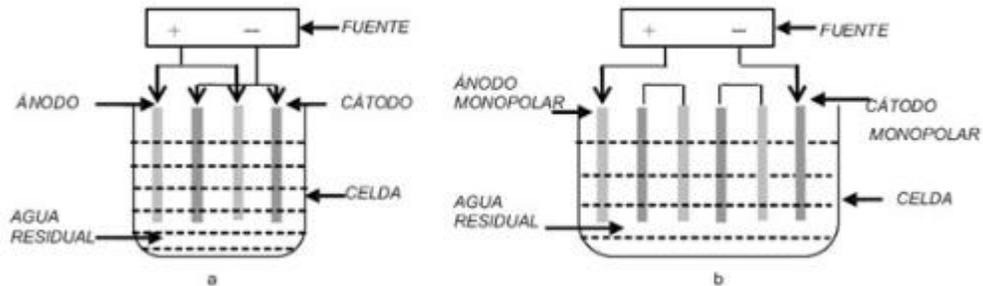
- Región superior para la disposición de lodo de flotación o lodo menos denso y la espuma, llamado zona de flotación.

- Región media de reacciones electroquímicas, llamada zona de reacción en donde se encuentran los electrodos.
- Región inferior, llamada zona de sedimentación, donde se depositan los lodos más densos. (Sanchez & Flores, 2010)

#### 4.1. Los electrodos en la electrocoagulación

La ubicación de los electrodos (cátodo, ánodo) es de forma paralela en el tanque, un ejemplo de ello se muestra en la ilustración 10: donde a) Reactor con electrodos mono polares conectados en paralelo, b) Reactor con electrodos mono polares conectados en serie.

Ilustración 10 Reactores para electrocoagulación tipo Batch.

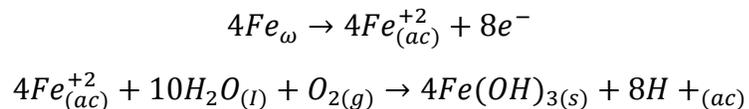


Fuente: (Weinhold & Martinez, 2012, pág. 13)

Álvaro Arango Ruiz explica que en el caso de que el ánodo este formado de hierro, se proponen dos mecanismos de formación in situ de dos posibles coagulantes los cuales se forman de la siguiente manera:

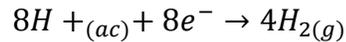
- Formación del hidróxido férrico: en el ánodo se producen las siguientes reacciones

*Ecuación 1 Reacciones para la formación de hidróxido férrico.*



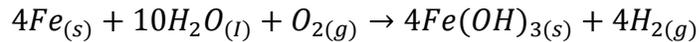
Fuente: (Mejía, Ruiz, & Giraldo, 2006, pág. 68)

*Ecuación 2 Reacción en el cátodo*



Fuente: (Mejía, Ruiz, & Giraldo, 2006, pág. 67)

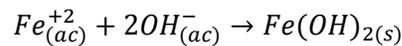
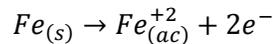
*Ecuación 3 Reacción global para la formación de hidróxido férrico.*



Fuente: (Mejía, Ruiz, & Giraldo, 2006, pág. 67)

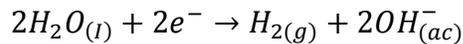
Formación del hidróxido ferroso

*Ecuación 4 Reacciones en el ánodo.*



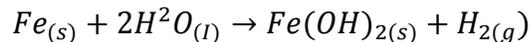
Fuente: (Mejía, Ruiz, & Giraldo, 2006, pág. 67)

*Ecuación 5 Reacción en el cátodo.*



Fuente: (Mejía, Ruiz, & Giraldo, 2006, pág. 67)

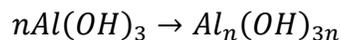
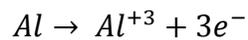
*Ecuación 6 Reacción global.*



Fuente: (Mejía, Ruiz, & Giraldo, 2006, pág. 67)

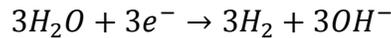
En el caso de utilizar Aluminio como material del ánodo Álvaro Arango Ruiz muestra las ecuaciones de reacción de formación de coagulante in situ.

*Ecuación 7 Reacciones en el ánodo.*



Fuente: (Mejía, Ruiz, & Giraldo, 2006, pág. 67)

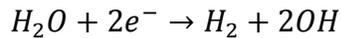
*Ecuación 8 Reacción en el cátodo.*



Fuente: (Mejía, Ruiz, & Giraldo, 2006, pág. 67)

#### **4.2. Factores que afectan el proceso**

- *Temperatura:* aunque los efectos de este factor en el proceso no han sido muy investigados, según Weinhold y Martínez se encontró que la eficiencia en la corriente incrementa inicialmente hasta llegar a 60°C punto donde se hace máxima, para seguidamente decrecer. (Weinhold & Martinez, 2012, pág. 16)
- *Densidad de corriente (se puede controlar):* Determina la cantidad de iones de hierro o aluminio ( $Fe^{+2}$  y  $Al^{+3}$ ) liberados por los electrodos. (dosis de coagulante y velocidad de generación de burbujas), esta define la distancia entre electrodos. (Weinhold & Martinez, 2012, pág. 14)
- *Presencia de NaCl:* la sal aumenta la conductividad del agua residual, la presencia de los iones de cloruro reduce el efecto adverso de los iones  $HCO_3^-$  y  $SO_4^{2-}$ , si hay presencia de iones carbonatados o sulfatos pueden conducir a la sedimentación de  $Ca^{+2}$  y  $Mg^{+2}$  generando una capa insoluble que cubre los electrodos, aumentando el potencial entre ellos decreciendo así la eficiencia de la corriente. Se recomienda mantener la cantidad de  $Cl^-$  del 20%. (Weinhold & Martinez, 2012, pág. 15)
- *pH:* su efecto se refleja en la eficiencia de la corriente y se relaciona con la disolución del hidróxido del metal, teniendo en cuenta que la eficiencia del proceso depende de la naturaleza del contaminante y con una mejor remoción en un pH cercano a 7. Sin embargo, el pH neutral genera un alto consumo de energía, gracias a la variación de la conductividad. El agua residual acida después de un proceso de electrocoagulación puede incrementar el pH, ocurriendo el efecto contrario en agua residual alcalina, en el primer caso se le atribuyo este efecto a la reacción del hidrogeno en el cátodo dada por: (Weinhold & Martinez, 2012, pág. 15)

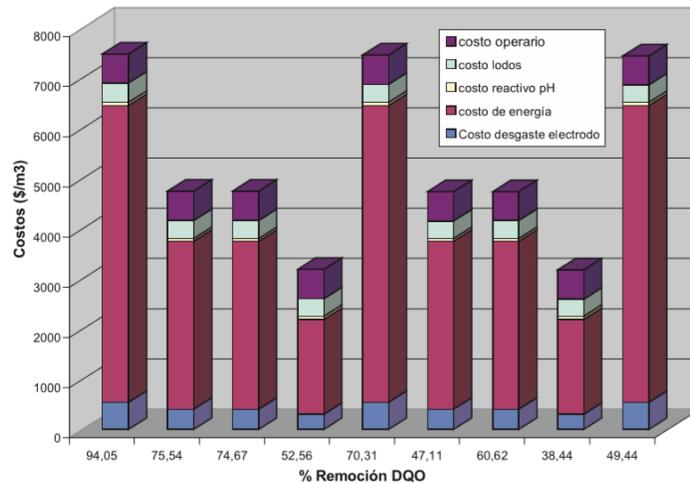


Fuente: (Weinhold & Martinez, 2012, pág. 15)

## 5. Costos

Hay estudios que analizan los costos de tratamiento por medio de la electrocoagulación minuciosamente por etapas del proceso, como se observa en el caso de la gráfica 1.

Grafica 1 Costos de operación para la electrocoagulación a diferentes porcentajes de remoción de DQO



Fuente: (Gallo, Arias, Ruíz, & Giraldo, 2008, pág. 18)

En la anterior gráfica, se muestra que para el 2008 los gastos de tratamiento en una industria de electrocoagulación se sintetizan de la siguiente manera:

- Para el montaje del reactor con capacidad de tratamiento de 1 m<sup>3</sup>/h requirieron para: fuente de voltaje (400 A) 14'332.500; celda electroquímica 9'000.000; bomba 2'800.000; tubería y accesorios 1'000.000; centrifuga 111'159.200; subtotal 138'159.200; Total (considerado el factor diseñado, planos, montaje e instalación) 207'238.800 es relativamente más económico en comparación con un total de costos en montaje para coagulación química 297'588.060.
- Los costos de insumos para la operación en el año oscilaban en el caso del consumo de energía en la zona industrial en Medellín \$/Kw-h 256,42; hierro 1.913,4; ácido sulfúrico \$/g 3,747.

- Mayores costos de operación (7.475,15 \$/m<sup>3</sup>) se atribuye a una remoción del 94.1% de DQO y pH de 5, siendo la más alta remoción, obteniendo los menores costos en este pH considerando que en ellos se obtuvieron buenos porcentajes de remoción.
- Los mayores costos observados se obtuvieron en rangos de pH de 7 y 8, considerando los porcentajes de remoción.
- El menor costo de operación (3.183,57 \$/m<sup>3</sup>) se le atribuye a rangos de pH en el efluente de 5 y una remoción de DQO de 52.56%, teniendo en cuenta que para un pH de 7 se obtuvo un costo similar (3.171,92 \$/m<sup>3</sup>) por un porcentaje de remoción de 38.4%.
- La grafica muestra que los costos de energía eléctrica son los más representativos, contribuyendo con el 60 al 80% del valor total por ensayo, estando ligado al porcentaje de remoción, comparando los costos de desgaste de electrodo no alcanza a ser el 10% y los costos por tratamiento de lodos es cercano al 7%.

Además, Gallo, Arias, Ruiz y Giraldo hablan de costos de tratamiento por 114,79 \$/m<sup>3</sup>, reactivos por 2.078,00 \$/m<sup>3</sup>, y operarios 1.750,00 \$/m<sup>3</sup> con un total de 3.942,30 \$/m<sup>3</sup>. (Gallo, Arias, Ruíz, & Giraldo, 2008)

En el caso de comparar la coagulación química y la electrocoagulación para la remoción de arsénico del agua con caudal a tratar constante en el año 2012, el consumo fue de 0.607 kWh/m<sup>3</sup> y 0.7375 kWh/m<sup>3</sup> respectivamente, considerando para el año 1.34/ kWh, en el caso de la primera para la remoción más alta de arsénico con un 99%, el costo más bajo fue de 1.19 \$/m<sup>3</sup>, mientras que en el caso de la electrocoagulación para obtener un porcentaje de remoción de 97% en hierro, 94% en arsénico gastaron 1.67\$/m<sup>3</sup>, teniendo en cuenta que en este último método genera menor cantidad de lodo residual por m<sup>3</sup> de agua tratada (0.0019 m<sup>3</sup> de lodo por m<sup>3</sup> de agua residual tratada), será menor el costo de tratamiento de los mismos, teniendo en cuanta que la coagulación química genera en promedio (0.02 m<sup>3</sup> de lodo por m<sup>3</sup> de agua residual tratada). (Castrejón, y otros, 2012)

## 6. Investigaciones sobre electrocoagulación en tratamiento de agua residual de curtiembre.

En la tabla 15 se describen las investigaciones más relevantes en cuanto a la aplicación de este método de tratamiento, su metodología y las eficiencias obtenidas.

**Tabla 15 Investigaciones sobre electrocoagulación en tratamiento de agua residual de curtiembre.**

<b>Título original</b>	<b>Título en Español</b>	<b>Referencia</b>	<b>Descripción</b>
<b>Pollutant Removal from Wastewater at Different Stages of the Tanning Process by Electrocoagulation</b>	Eliminación de contaminantes de las aguas residuales en diferentes etapas del proceso de bronceado por electrocoagulación	(Alejandra de la Luz-Pedro, 2019)	Se utilizó electrodos de hierro y aluminio, se analizaron los efectos del pH inicial, densidad de corriente y consumo de energía, pH inicial de 7.0 con una densidad 28 mA/cm <sup>2</sup> para un proceso de 60 minutos con una eficiencia de eliminación de DQO y COT de 72% y 57% con electrodos de aluminio y de 69% y 60 % con electrodos de hierro, se registró un consumo de energía mínimo para la eliminación más alta de DQO y COT fue de 0.37 y 0.69 kWh/m <sup>3</sup> . El proceso de EC no depende del material del electrodo si no la etapa de proceso de curtido
<b>Treatment of tannery wastewater by a hybrid electrocoagulation/ electro dialysis process</b>	Tratamiento de aguas residuales de curtiembre mediante un proceso híbrido de electrocoagulación / electrodiálisis.	(Abdalahdi Deghles, 2016)	Este artículo se basa en la investigación del rendimiento de un proceso híbrido de electrocoagulación/electrolisis para eliminar DQO, NH <sub>3</sub> -N, Cr y color; la densidad de corriente y el tiempo de electrolisis se analizaron para optimizar el proceso con electrodos de aluminio o hierro, la EC fue integrada luego con la ED. La EC con electrodos de aluminio integrado con ED obtuvo eficiencias de eliminación para DQO, NH <sub>3</sub> -N, Cr y color de 92, 100, 100, 100 % respectivamente, la conductividad tuvo un valor de 0,371 mS/cm a 45 minutos, para EC con electrodos de hierro integrada con ED las eficiencias fueron 87, 100, 100, 100% para los parámetros de eliminación respectivamente con una conductividad de 1.5 mS/cm a 75 minutos
<b>Treatment of highly concentrated tannery wastewater using electrocoagulation :</b>	Tratamiento de aguas residuales de curtiembre altamente concentradas mediante electrocoagulación: Influencia de la calidad	(Leclerc, 2016)	En este artículo encontraron que la aleación de aluminio (duraluminio A-U4G) era más eficiente que el aluminio puro para la eliminación de DQO y Cromo. Se usaron muestras de 2 L para cada prueba de electrocoagulación con contenido de cromo de 7 g/L y 6 g/L de

Continuación Tabla 15 página 73

<b>Influence of the quality of aluminium used for the electrode</b>	del aluminio utilizado para el electrodo		DQO. La celda de electrocoagulación (20 cm, 10 cm, 5 cm) contaba con placas de electrodos de 15x7 cm, la distancia entre las placas era de 2 cm, la densidad de corriente utilizada fue de 200-400 A/m <sup>2</sup> con variaciones de voltaje de 2 a 3 V. la eficiencia aumento con la densidad de corriente y el tiempo de electrolisis, con electrodos de duraluminio se obtuvieron rendimientos de cromo del 93, 95.4 y 99.7% después de 360 minutos a densidades de corriente de 200, 300 y 400 A/m <sup>2</sup> , con electrodos de aluminio las eficiencias fueron de 75, 93 y 99% a 200, 300 y 400 A/ m <sup>2</sup>
<b>Removal of Chromium (III) from Wastewater by Electrocoagulation Method</b>	Eliminación de cromo (III) de las aguas residuales mediante el método de electrocoagulación	(Shahriari, Bidhendi, Mehrdadi, & Torabian, 2014)	Se usó un tanque cubico hecho de plexiglás con un volumen efectivo de 2.5 L como reactor de electrocoagulación, 10 placas metálicas hechas de hierro de 11 x 7 cm y 2 mm de grosor se colocaron en el tanque, también se utilizaron electrodos de matriz bipolar y mono polar en el reactor. El pH optimo fue de 6, la concentración inicial de cromo fue de 500 mg/L. el experimento se desarrolló a diferentes tiempos de EC, 25 minutos es el tiempo optimo, el aumento en el tiempo de prueba condujo a un aumento del porcentaje de remoción, sin embargo, un aumento en el tiempo también conlleva a un aumento en la energía consumida, el voltaje utilizado fue 30 V, la velocidad de rotación adecuada del imán puede ser de 100 rpm. Este experimento obtuvo valores de remoción del 99.96% en Cr III
<b>Phosphate removal from wastewater by electrocoagulation using aluminium electrodes</b>	eliminación de fosfato de las aguas residuales por electrocoagulación usando electrodos de aluminio	(Asmaa Shalaby, 2014)	Los principales objetivos de los experimentos fueron investigar los efectos de los diversos parámetros operativos como la densidad de corriente, tiempo de duración, concentración inicial de fosfato, temperatura, pH, concentraciones de NaCl y el tipo de electrolito. Los rangos fueron 10-150 mg PO <sub>4</sub> /L para inicial de fosfato, 3-10 pH, 0.5-5 NaCl/L para electrolitos de apoyo, 2g/L para los otros electrolitos de soporte y 1,13-4,54 mA/cm <sup>2</sup> densidad de corriente. La remoción de PO <sub>4</sub> fue de 85 y 95% a densidades de 1,13 a 4.54 mA/cm <sup>2</sup>
<b>Integration of electro coagulation</b>	Integración de electro coagulación y	(Ouaissaa, Chabania,	En este trabajo se examinó la eficiencia de la EC y la adsorción en términos de

Continuación Tabla 15 página 74

<p><b>and adsorption for the treatment of tannery wastewater – The case of an Algerian factory, Rouiba</b></p>	<p>adsorción para el tratamiento. de aguas residuales de curtiembre - El caso de una fábrica argelina, Rouiba</p>	<p>Amranec, &amp; Bensmailia, Integration of electro coagulation and adsorption for the treatment of tannery wastewater – The case of an Algerian factory, Rouiba, 2012)</p>	<p>eliminación de DQO, disminución de la turbidez y cantidad de cromo residual VI. Se mezclaron 5 g de carbón activado con 500 ml de efluente de curtidura para luego agitarse durante 2h 30 minutos. La EC se realizó en una celda de 800 ml, los electrodos fueron de aluminio, el efluente se trató a una corriente de 1.5 A, la duración de la electrolisis fue de 2h 30 min. El Cr VI se determinó de acuerdo con el método Balasubramanian. La concentración final de Cr con EC fue de 53 µg/L y con adsorción (AD) fue 175µg/L mientras que uniendo los dos métodos alcanzo una concentración final de 19 µg/L que representa un 92% de eficiencia, la DQO tuvo una eficiencia de 75% con EC+AD y turbidez de 96.1%.</p>
<p><b>Electrocoagulation and effect of cathode materials on the removal of pollutants from tannery wastewater of Rouiba</b></p>	<p>Electrocoagulación y efecto de los materiales del cátodo en la eliminación de contaminantes de las aguas residuales de la curtiduría de Rouiba</p>	<p>(Benhadji, Ahmed, &amp; Maachi, 2011)</p>	<p>Analizaron el tiempo de electrolisis y densidad de corriente en el reactor de EC, el cátodo de aluminio (7x4x0.5 cm) tenía 30 mm entre electrodos, la densidad de corriente de 75 A/m<sup>2</sup> en 45 minutos para un volumen de un litro con un agitador magnético para conseguir una buena transferencia de masas, el experimento se realizó a T° ambiente, se alcanzaron eficiencias de remoción de más del 90% de DBO<sub>5</sub>, DQO, turbidez, Cromo, hierro y nitrato. Se analizó el lodo residual encontrando cromo en un 50%, carbono total 15%, 03% de sulfuro. El pH aumento para todos los valores de densidad</p>
<p><b>The removal of the trivalent chromium from the leather tannery wastewater: the optimisation of the electro-coagulation process parameters</b></p>	<p>La eliminación del cromo trivalente de las aguas residuales de la curtiduría de cuero: la optimización de los parámetros del proceso de electrocoagulación</p>	<p>(E. GilPavas, 2011)</p>	<p>Se utilizaron electrodos de Al y Fe, se evaluó la distancia entre electrodos, la densidad de corriente, velocidad de agitación. Los electrodos de aluminio parecieron más efectivos en la remoción de cromo, un pH igual a 4.52 y a 28 °C se encontraron las condiciones óptimas de eliminación de cromo, la concentración inicial de Cr 3596 mg/L, el espacio del electrodo = 0.5 cm, la velocidad de agitación = 382.3 rpm y densidad de corriente = 57. 87 mA/cm<sup>2</sup>, a estas condiciones de operación alcanzaron remociones de 99.76% de Cr III, el 64% y 61% de carbono orgánico (COT) y DQO respectivamente, los autores aconsejan utilizar electrodos de aluminio</p>

Continuación Tabla 15 página 75

<p><b>Pollutant removal from tannery effluent by electrocoagulation</b></p>	<p>Eliminación de contaminantes del efluente de la curtiduría por electrocoagulación</p>	<p>(Fernando R. Espinoza-Quinones, 2009)</p>	<p>Para este estudio se aplicó un diseño experimental fraccional factorial(estadístico) 2<sup>3</sup> los autores evaluaron la respuesta del proceso de EC en función de la DQO, la turbidez, el SST, SVT y concentración de los elementos, el tiempo de electrolisis se trabajó en el rango de 30 a 45 minutos, el reactor (7x14x0.15cm) con un área efectiva de 80.5 cm<sup>2</sup>, los voltajes iban de 0 a 30 V y corrientes de 0 a 10 A con unas densidades de corrientes de 43-68 mA/cm<sup>2</sup>, se utilizaron diferentes intervalos de pH para el experimento aunque se concluyó que el pH del efluente no vario mucho la eficiencia en la eliminación por lo que se podría utilizar pH entre los intervalos de 7 a 8.3, para una densidad de corriente 68 con un tiempo de electrolisis de 30 minutos arrojó 99% de reducción de turbidez para los intervalos de 6.5 a 9.0 de pH, los TVS se redujo 80% para casi todos los intervalos de pH, TSS obtuvieron una reducción cercana del 50% para pH de 7.5 a 9.0, pH de 6.5 a 7.5 obtuvieron 70 y 30% respectivamente, la concentración de calcio se logró una eliminación entre el 60% y 80%. el cromo obtuvo resultados del 99% y 50% para la DQO en todos los tratamientos</p>
<p><b>Treatment of tannery liming drum wastewater by electrocoagulation</b></p>	<p>Tratamiento de aguas residuales del tambor encalado de la curtiduría por electrocoagulación</p>	<p>(engil, Kulac, &amp; Özacar, 2009)</p>	<p>Los investigadores utilizaron un sistema de EC de corriente continua, encontraron que la densidad de corriente óptima para la eliminación de DQO, sulfuro y grasas de aceite en el agua residual del tambor de encofrado fue de 35mA/cm<sup>2</sup>, 35mA/cm<sup>2</sup> y 3.5 mA/cm<sup>2</sup> a los 10 minutos de electrolisis y pH 3 respectivamente, obtuvieron eficiencias de 82% para DQO, sulfuro 90% y grasas y aceites de 96% con un consumo medio de energía de 5.768kWh/m<sup>3</sup> de DQO, 0.524kWh/m<sup>3</sup> de sulfuro y 0.00015kWh/m<sup>3</sup> de aceite y grasas.</p>

Fuente: Autor, 2019.

Teniendo en cuenta toda la revisión que se ha llevado a cabo se logra corroborar la eficiencia y efectividad del método, teniendo en cuenta que esta depende de factores como el pH, la densidad de corriente y el tiempo de retención de la muestra en el sistema.

## 6.1. Otras investigaciones sobre electrocoagulación.

En pro de resolver la incertidumbre que plantea la eficacia y efectividad del método para el tratamiento de efluentes diferentes al de curtiembres, se desarrolla la tabla 16 en donde se describen las investigaciones realizadas en este ámbito.

*Tabla 16 Otras investigaciones sobre electrocoagulación.*

<b>TITULO ORIGINAL</b>	<b>TITULO EN ESPAÑOL</b>	<b>REFERENCIA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea por electrocoagulación</b>	Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea por electrocoagulación	(LASALLE, 2019)	En el 2019 se tuvo el objetivo de tratar el suero resultante de los procesos de transformación láctea que son normalmente vertidos en los efluentes aumentando las cargas de DBO <sub>5</sub> , hasta un valor de 37.5 kg de O <sub>2</sub> /t de leche tratada; tomando las muestras de análisis y de tratamiento del tanque de homogenización de la industria; tratándola en un reactor discontinuo a escala prototipo con capacidad de tratar 2L de agua residual, con electrodos de hierro y aluminio con forma de placa rectangular, dispuestas en paralelo, conectada a una fuente de voltaje de corriente continua, para cada uno de las muestras se realizaron 4 repeticiones, comprobando que los mejores porcentajes de remoción se obtienen en condiciones iniciales de pH 5, densidad de corriente 43.23 y 32.43 A/m <sup>2</sup> y tiempo de proceso de 15 min, estas remociones fueron de 93.99 y 75.73% respectivamente.
<b>Electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea</b>	Electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea	(López & Harnisth, 2016)	Gracias a la gran cantidad de agua residual generada por la industria láctea, en el año 2016 decidieron realizar una investigación basado en su tratamiento por medio de la electrocoagulación

Continuación Tabla 16 página 77

			fundamentada por tres factores: tiempo, número de placas y voltaje del sistema, alcanzando eficiencias de remoción de DQO: 82%, DBO <sub>5</sub> : 82% y SS: 76%.
<b>Uso de electrocoagulación para la remoción de tartrazina en soluciones acuosas</b>	Uso de electrocoagulación para la remoción de tartrazina en soluciones acuosas	(Ruiz A. A., 2012)	Las industrias de alimentos, farmacéutica y de cosméticos, vierten efluentes ricos en colorantes compuestos como la tartrazina que causan un impacto negativo en los cuerpos de agua naturales, el objetivo de esta investigación es implementar la electrocoagulación como método de tratamiento, para aguas sintéticas con concentración de 100 mg/L de tartrazina, probando un diseño experimental factorial de 3*2*3, evaluando factores como pH, densidad de corriente y tiempo de tratamiento; obteniendo eficiencias de remoción para DQO: 95.5%, color: 99.4%, a pH 4, densidad de corriente de 43.23 A/m <sup>2</sup> con 12 min de tratamiento.
<b>Electrocoagulation system treatment of galvanic wastewater</b>	Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas	(Posada & Niño, 2010)	esta investigación es la continuación de un proyecto en donde construyen y evalúan una planta piloto de electrocoagulación como tratamiento de ARI galvanera de agua residual para el reúso; implementaron un prototipo en la universidad para remover metales pesados como Cr, Pb Y Zn, tratando 10 L obteniendo eficiencias de remoción en Cr: 51.65%, Ni: 18.09%, Pb: 50%, Zn: 47.37%; para un pH: 3.18, conductividad: 21.83 mS/m y temperatura: 48.5°C.

<b>Electrochemical treatment of industrial wastewater</b>	Tratamiento electroquímico de aguas residuales industriales	(AMBIENTALES, 2004)	Montaron una celda electrolítica de vidrio, en donde ubicaron el ánodo y el cátodo de forma paralela, donde el primero era de malla de titanio (10*5cm) como material, el 2do en carbono grafito, sumergidos en la muestra de agua de refinería e industria de medicamentos con 0.5 L de volumen de cada una, conteniéndolo a una temperatura de 30°C constante, se agito a 200 rpm, las características se determinaron por medio de los métodos estándares, llevando los experimentos a una densidad de corriente de 5.4 A/dm <sup>2</sup> bajo galvanostático (electrolisis de corriente constante). Para la refinería se obtuvo en remoción un 25.25% de DQO con un consumo de energía de 235.3 kWh/kg después de 20 Ah/L de carga entrante y el 48% en COT; mientras que en la industria de medicamentos 73.1% de DQO.
---	---	---------------------	---

Fuente: Autor, 2019.

Encontrando que, en las industrias como la alimentaria, cosmética, farmacéutica, y por su puesto de manufactura, este método obtiene grandes resultados en términos de eficiencia de remoción, controlando los parámetros iniciales que lo afectan.

## 7. Consideraciones finales

En los últimos años a partir de investigaciones experimentales se ha logrado comprobar la eficiencia y efectividad del método de Electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales, no solo en el ámbito de remoción de metales pesados compuestos principalmente encontrados en los efluentes de curtiembres, sino también en aquellos que contengan gran cantidad de material particulado de baja densidad y grasas, eliminando la turbiedad y color, sin embargo se deben tener en cuenta las condiciones iniciales de pH y llegado el caso hacer lo posible por ajustarlo a un rango acido-alcalino

preferiblemente alcalino y parámetros de diseño como la densidad de corriente y el tiempo de electrólisis en donde se ha demostrado que el método alcanza eficiencias iguales o mayores al 90%, teniendo en cuenta además en su diseño el material del electrodo, en donde el de mayor efectividad ha sido el aluminio, aunque aleaciones como el duraluminio A-U4G obtuvo mejores eficiencias en una investigación, considerando que el primero es más comercial se recomienda su uso, descartando el del hierro por la generación de color como subproducto del tratamiento, además de lo anterior es importante tener en cuenta que en función del volumen tratado la eficiencia es directamente proporcional a la densidad de corriente y tiempo de electrolisis. En el caso de dirigir el tratamiento a la remoción específica de cromo, turbidez y materia orgánica en términos de DQO, se encontró autores que implementaron la asociación del método de electrocoagulación con la adsorción por carbono activado granulado obteniendo eficiencias de hasta el 96.1% de turbidez, 92% de cromo y 75% de DQO, otros autores han utilizado la electrocoagulación acompañado de la electrodiálisis haciendo que este procesos híbrido aumente su rendimiento para eliminar DQO, NH<sub>3</sub>-N, Cr y color mediante la utilización de electrodos de hierro y aluminio en donde se evidencio una mejor remoción de DQO con electrodos de aluminio alcanzando la eficiencia del 92% y 100% para parámetros como NH<sub>3</sub>-N, Cr y color respectivamente. La EC también puede ser utilizada no solo para eliminar cromo o materia orgánica, este método puede ayudar con los problemas del grupo fosfato presente en el agua los cuales pueden causar la eutrofización en cantidades considerables, investigaciones realizadas arrojan eficiencias del 95% en la remoción de estos contaminantes, es un método económico y de poca inversión de mantenimiento.

## 8. Conclusiones

- Al analizar toda la bibliografía consultada, se evidencio que el método de electrocoagulación es muy eficiente y eficaz que alcanza porcentajes de remoción iguales o mayores al 90% en DQO, Cr, fosfatos, Turbidez y color en las investigaciones que lo emplean, hecho que responde el primer interrogante planteado en la monografía.
- El cromo es un elemento de importancia de eliminación del agua debido a que es cancerígeno, ventaja que ofrece la electrocoagulación en remoción de altos porcentajes, evidenciado en las investigaciones que trataban agua residual industrial como la de curtiembre.
- La electrocoagulación muestra ventajas en comparación con los métodos convencionales como la coagulación química, siendo el primero evidentemente más económico cuando se aplica en escalas significativas gracias a la reducción de subproductos como los lodos residuales, disminuyendo los costos para su disposición final.
- Aunque es un método de ya hace varias décadas, la electrocoagulación es muy versátil y adaptable a diferentes procesos, por lo que en la actualidad se ha convertido en un tema de investigación, gracias a sus beneficios en cuanto eficiencia, capacidad de manejo, operación y económica ventaja ya antes mencionada, también ha sido utilizado en otros tipo de aguas residuales como por ejemplo en la industria láctea y otros ejemplos los cuales se encuentran recopilados en este documento, hecho que responde la segunda incógnita planteada en la introducción.

## **Bibliografía**

- Abdalahdi Deghles, U. K. (2016). Treatment of tannery wastewater by a hybrid electrocoagulation/electrodialysis process. *ELSEVIER*, 43-50.
- Ada Barrenechea Martel, L. d. (2014). Capitulo 10 Desinfección. En L. d. Ada Barrenechea Martel. <http://www.ingenieroambiental.com/4014/diez.pdf>.
- Adminmgv. (5 de mayo de 2016). *tratamiento del agua* . Obtenido de ¿que es el tanque imhoff?: <http://www.tratamientodelagua.com.mx/que-es-un-tanque-imhoff/>
- AGUA, C. D. (s.f.). *CIDTA*. Obtenido de CIDTA: <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/Caracteristicas.PDF>
- AGUA, C. N. (2016). MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO. En CONAGUA, *DISEÑO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES: PRETATAMIENTO Y TRATAMIENTO PRIMARIO*. (págs. 1, 2, 3, 4, 5, 12, 13,14,15,20). MEXICO.
- Agua.org.mx. (08 de Noviembre de 2007). *Agua.org.mx*. Obtenido de Agua.org.mx: <https://agua.org.mx/biblioteca/contaminacion-del-agua-por-detergentes-eutrofizacion/>
- Alda, L. D. (2012). *Fundación Nueva Cultura del Agua* . Obtenido de Fundación Nueva Cultura del Agua : [https://fnca.eu/phocadownload/P.CIENTIFICO/inf\\_contaminacion.pdf](https://fnca.eu/phocadownload/P.CIENTIFICO/inf_contaminacion.pdf)
- Alejandra de la Luz-Pedro, E. F.-A. (2019). Pollutant Removal from Wastewater at Different Stages of the. *Hindawi*, 9.
- ambiental, P. d. (2005). *ingenieria ambiental*. Obtenido de tratamientos de aguas residuales: <http://www.ingenieroambiental.com/mayo2005/Apunte-tratamiento-aguas-residuales.pdf>
- AMBIENTALES, C. D. (2004). Electrochemical treatment of industrial wastewater. *ELSEVIER*, 123-129.
- Ambiente, C. P. (2004). *Organizacion Panamericana de la Salud* . Obtenido de Organizacion Panamericana de la Salud : <http://www.ingenieroambiental.com/4014/uno.pdf>
- Apaydin, O., & Kurt, U. (2008). an investigation on the treatment of tannery wastewater by electrocoagulation. *Global Nest*, 546-555.
- Aquae, F. (2017). *Fundacion Aquae*. Obtenido de Fundacion Aquae: <https://www.fundacionaquae.org/wiki-aquae/sostenibilidad/agua-y-contaminacion/>
- Arias, F. M. (7 de Mayo de 2013). *SCRIB*. Obtenido de Reactor Anaerobio de flujo a piston Ascendente: <https://es.scribd.com/document/140055975/Reactor-Anaerobio-de-Flujo-a-Piston-Ascendente-2>

- Arriols, E. (6 de agosto de 2018). *Ecología Verde*. Obtenido de Ecología Verde: <https://www.ecologiaverde.com/que-son-las-aguas-residuales-y-como-se-clasifican-1436.html>
- Asmaa Shalaby, E. N. (2014). Phosphate removal from wastewater by electrocoagulation using aluminium electrodes. *Open Science*, 9.
- Bab, R. R., Bhadrinarayana, N., Begum, K. S., & Anantharaman, N. (2007). Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation. *ResearchGate*, 202-208.
- Barrera, G. E., García, A. B., & Cuervo, E. (2013). LA ELECTROCOAGULACIÓN COMO UN TRATAMIENTO EFICIENTE PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS PRESENTES EN AGUAS RESIDUALES. *FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS*, 309, 310.
- Benhadji, A., Ahmed, M. T., & Maachi, R. (2011). Electrocoagulation and effect of cathode materials on the removal of pollutants from tannery wastewater of Rouïba. *ELSEVIER*, 128-134.
- Bogota, A. m. (2014). Guia de producción mas limpia para el sector curtiembres de Bogota enfoque en vertimientos y residuos. <http://www.ambientebogota.gov.co/documents/24732/3987253/Guía+de+producción+más+limpia+para+el+sector+curtiembres+de+Bogotá.+Enfoque+en+vertimientos+y+residuos.pdf>, 9.
- Bógota, A. m. (2015). *Ambiente Bogota*. Obtenido de <http://www.ambientebogota.gov.co/documents/24732/3987253/Guía+de+producción+más+limpia+para+el+sector+curtiembres+de+Bogotá.+Enfoque+en+vertimientos+y+residuos.pdf>
- C.V., A. Y. (2013). *AGUA Y AIRE S.A. DE C.V. DE C.V.* Obtenido de ELECTROCOAGULACION TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES: <http://www.electrocoagulacion.com/ventajasdesventajas.html>
- Cartagena, C. J. (2011). Contaminantes orgánicos emergentes en el ambiente:. *Revista Lasallista de Investigación*, 12.
- Castrejón, S. P., Huerta, M. d., Domínguez, A. M., Santiago, S. L., Soberanis, M. P., Rojas, A. G., . . . Muñoz, J. E. (2012). Comparación técnico-económica entre coagulación química y electrocoagulación para remover arsénico del agua. *Tecnología y ciencias del agua* , 5-22.
- Cetina, A. R., Viatela, J. K., & Miranda, J. P. (18 de julio de 2016). *Revista LOGOS CIENCIA Y TECNOLOGIA*. Obtenido de Policia Nacional: <http://revistalogos.policia.edu.co/index.php/rfct/article/view/305/html>

- Cidta. (s.f.). *Lagunas de maduración*. Obtenido de <http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/maduracion.PDF>
- Cruz, F. J., & Mallebrera, M. A. (s.f.). Desbastes y tamizado. *Universidad Politecnica de Cartagena*, 9.
- Cyclus. (s.f.). *Cyclus*. Obtenido de <http://www.cyclusid.com/tecnologias-aguas-residuales/tratamiento-aguas/tratamiento-primario/>
- Durante, C., Cuscov, M., Isse, A. A., & Sandona, G. (2011). Advanced oxidation processes coupled with. *ELSEVIER*, 2122-2130.
- E. GilPavas, I. D.-G.-G. (2011). The removal of the trivalent chromium from the leather tannery wastewater: the optimisation of the electro-coagulation process parameters. *Water Science & Technology*, 385-394.
- engil, A. S., Kulac, S., & Özacar, M. (2009). Treatment of tannery liming drum wastewater by electrocoagulation. *ELSEVIER*, 940-946.
- Envitech, C. (2019). *Condorchem Envitech*. Obtenido de Sitemas con reactores aerobicos para tratar aguas residuales: <https://blog.condorchem.com/tag/biodiscos/>
- estrucplan. (10 de abril de 2004). *estrucplan*. Obtenido de Lagunas de estabilización: Definiciones: <https://estrucplan.com.ar/producciones/contenido-tecnico/p-efluentes-liquidos-y-gaseosos/lagunas-de-estabilizacion-definiciones/>
- Fernando R. Espinoza-Quinones, M. M. (2009). Pollutant removal from tannery effluent by electrocoagulation. *ELSEVIER*, 59-65.
- Gallo, Á. A., Arias, J. S., Ruíz, Á. A., & Giraldo, L. F. (2008). Análisis de costos de la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Revista lista*, 10-22.
- Gamarra, j. R. (s.f.). *tesis uson*. Obtenido de capitulo IV. lagunas de estabilización: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/19117/capitulo4.pdf>
- García, F. P., Hernández, J. C., Cruz, V. E., & Santillán, Y. M. (2012). ELECTROCOAGULACIÓN: UNA ALTERNATIVA. *AIDIS*, 51-77.
- Gonzalez, K. E. (2015). Diseño conceptual y construcción de un electrocoagulador controlado por LABVIEW. *Universidad Santo Tomas*, 29, 30.
- GRAJALES, D. M., & BELTRÁN, C. A. (2014). *TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE TEÑIDO DE CUERO EN BOMBO POR ELECTROCOAGULACIÓN- SECTOR DE SAN BENITO*. Bogota: UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS.
- greenpeace. (2012). Cueros toxicos. *dpn*, 5, 6.

- IDEAM, I. D. (2001). EL AGUA. En I. D. IDEAM, *EL MEDIO AMBIENTE EN COLOMBIA* (págs. 115, 116). Bogota: PABLO LEIVA.
- Kongjao, S., Damronglerd, S., & Hunsom, a. M. (2008). Simultaneous removal of organic and inorganic pollutants in tannery wastewater. *Korean J. Chem.*, 703-709.
- LASALLE, U. (2019). Tratamiento de aguas. *INGENIERIA QUIMICA*, 180-186.
- Leclerc, S. E.-N.-P. (2016). Title: Treatment of highly concentrated tannery wastewater using electrocoagulation: Influence of the quality of aluminium used for the electrode. *Journal of Hazardous Materials*, 38.
- López, P., & Harnisth, A. (2016). Electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *SCIELO*, 13-21.
- M. Rosa Boleda, M. H.-F. (2011). Evaluación de la presencia de drogas de abuso en aguas del grifo. *ELSEVIER*, 7.
- Mejía, A. P., Ruiz, Á. A., & Giraldo, L. F. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción + limpia*, 60.
- Miriam Janet Gil, A. M. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *scielo*, 56.
- ONU. (22 de Marzo de 2017). *NACIONES UNIDAS*. Obtenido de NACIONES UNIDAS: <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, I. C. (2017). *AGUAS RESIDUALES, EL RECURSO NO EXPLOTADO*. Francia: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos.
- Orozco, T. (2017). unilibre.
- Ortiz, A. F. (s.f.). *Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica S.C.* Obtenido de Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica S.C: <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/348/1/Eliminaci%C3%B3n%20de%20hormonas%20persistentes%20en%20aguas%20residuales.pdf>
- Ouaissaa, Y. A., Chabania, M., Amranec, A., & Bensmailia, A. (2012). Integration of electro coagulation and adsorption for the treatment. *ELSEVIER*, 98-101.
- Ouaissaa, Y. A., Chabania, M., Amranec, A., & Bensmailia, A. (2012). Integration of electro coagulation and adsorption for the treatment of tannery wastewater – The case of an Algerian factory, Rouiba. *ELSEVIER*, 98-101.
- Posada, N. B., & Niño, G. E. (2010). ELECTROCOAGULATI ON SYSTEM AS TREATMENT OF GALVANIC WASTEWATER. *ciencia e ingeniería Neogranadina* , 33-44.

- Pulido, S. P., Miranda, V. A., Guavita, M. G., & Molano, E. J. (s.f.). *PTAR-Uniminuto*. Obtenido de Origen y Características de las aguas residuales: <https://sites.google.com/site/ptaruniminuto/origen-y-caracteristicas-de-las-aguas-residuales>
- R. Ramesh Babu, N. B. (2007). Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation. *ResearchGate*, 201-206.
- Rayco Guedes Alonso, Z. S. (2015). *Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*. Obtenido de Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.: [https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/13573/4/0706261\\_00000\\_0000.pdf](https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/13573/4/0706261_00000_0000.pdf)
- Ruiz, Á. A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Lasallista de Investigación*. vol. 2, núm. 1, 49-56.
- Ruiz, A. A. (2012). Uso de electrocoagulación para la remoción de tartrazina en soluciones acuosas. *Produccion + limpia*, 58-77.
- S.A.S., F. Y. (12 de 2018). *FIBRAS Y NORMAS De Colombia S.A.S. Ingenieria en Aguas*. Obtenido de FIBRAS Y NORMAS De Colombia S.A.S. Ingenieria en Aguas: <https://www.fibrasynormasdecolombia.com/terminos-definiciones/aguas-residuales-clasificacion-y-caracteristicas/>
- S.G. Alvarez, M. M. (2004). Caracterización de Agua Residual de Curtiduría y Estudio del Lirio Acuático en la Recuperación de Cromo. *SCIELO*, 6.
- Saha, N., Balakrishnan, M., & Batra, V. (2005). Improving industrial water use: case study for an Indian distillery. *ELSEVIER*, 163-174.
- Salud, O. M. (7 de abril de 2013). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de Organización Mundial de la Salud: [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/87679/WHO\\_DCO\\_WHD\\_2013.2\\_spa.pdf;jsessionid=F89131B3C03DEEB432014AC7ADC59B0F?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/87679/WHO_DCO_WHD_2013.2_spa.pdf;jsessionid=F89131B3C03DEEB432014AC7ADC59B0F?sequence=1)
- Sanchez, A. J., & Flores, S. A. (2010). Diseño, construcción y analisis de los parametros de operación de un sistema de electrocoagulación. *Escuela politecnica nacional.*, 45, 46.
- saneamiento, C. d. (2009). *Compendio de sistemas y tecnologias de saneamiento*. Obtenido de T9-Reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos (UASB): <http://alianzaporelagua.org/Compendio/tecnologias/t/t9.html>
- Secretariado Alianza por el Agua, C. (s.f.). *MANUAL DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS*. ALIANZA POR EL AGUA .
- Shahriari, T., Bidhendi, G. N., Mehrdadi, N., & Torabian, A. (2014). Removal of Chromium (III) from Wastewater by Electrocoagulation Method. *Springer*, 949-955.

- Sostenible, M. d. (22 de JUNIO de 2007). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: [http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res\\_2115\\_de\\_2007.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf)
- SOSTENIBLE, M. D. (17 de marzo de 2015). *docs.supersalud*. Obtenido de [https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R\\_MADS\\_0631\\_2015.pdf](https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf)
- SOSTENIBLE, M. D. (17 de marzo de 2015). *Supersalud.gov*. Obtenido de [https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R\\_MADS\\_0631\\_2015.pdf](https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf)
- Suman, I. Q. (24 de Septiembre de 2016). *OXFAM intermon*. Obtenido de OXFAM intermon: <https://blog.oxfamintermon.org/cuales-son-las-principales-causas-de-la-contaminacion-del-agua/>
- Tejada, C., & Edgar Quiñonez, . M. (2014). CONTAMINANTES EMERGENTES EN AGUAS:. *UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA*, 80-100.
- UNICEF, O. y. (7 de Febrero de 2018). *Oranización Mundial de la Salud*. Obtenido de Oranización Mundial de la Salud: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Weinhold, E., & Martinez, C. (abril de 2012). *SliderPlayer*. Obtenido de Tratamiento de aguas residuales por metodos electroquimicos, Universidad Nacional Experimental: <http://slideplayer.es/slide/5569521/>
- Zone, N. (s.f.). *Natural Zone* . Obtenido de Natural Zone : <http://natzone.org/index.php/component/content/article?id=152:contaminacion-del-agua-por-compuestos-emergentes>