



Universidad Nacional

SAN LUIS GONZAGA



[Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0)

Esta licencia permite a otras combinar, retocar, y crear a partir de su obra de forma no comercial, siempre y cuando den crédito y licencia a nuevas creaciones bajo los mismos términos.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>



INFORME DE REVISIÓN

Se ha realizado el análisis con el software antiplagio de la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga", por parte de los docentes reponsables, al documento cuyo título es:

EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA POR ELECTROCOAGULACIÓN

presentado por:

**Yakelin Ventura Rojas
BULEJE PARIAN RUTH YESSENIA**

del nivel **PREGRADO** de la facultad de **INGENIERIA QUIMICA Y PETROQUIMICA** obteniéndose como resultado una coincidencia de 7.17% otorgándosele el calificativo de:

APROBADO

Se adjunta al presenta el reporte de evaluación del software antiplagio.

Observaciones:

El presente **BORRADOR DE TESIS** ha sido **APROBADO** con un 7.17% de coincidencias.

Ica, **23 de Enero de 2021**



**SANTOS HUMBERTO OLIVERA MACHADO
COORDINADOR
SOFTWARE ANTIPLAGIO
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y
PETROQUIMICA**



**RAUL GERARDO AVILA MEZA
ASESOR
SOFTWARE ANTIPLAGIO
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y
PETROQUIMICA**

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN LUIS GONZAGA DE ICA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
PETROQUÍMICA

***“EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DEL
PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA POR
ELECTROCOAGULACIÓN”***

PRESENTADO POR:

Bach. YAKELIN VENTURA ROJAS
Bach. RUTH YESSENIA BULEJE PARIÁN

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

ICA - PERÚ

2019

RESUMEN

La electrocoagulación ha sido usada industrialmente y demostrado su eficacia en el tratamiento de efluentes conteniendo sólidos en suspensión, grasas y aceites, además de los contaminantes orgánicos e inorgánicos, mejorando su eliminación.

Este proceso es compacto y de fácil instalación, los controles pueden ser automáticos. Esta tecnología reemplazará gradualmente las técnicas convencionales de flotación. Por otra parte, señala la investigación de varios materiales como el titanio, diamante- boro, para aplicaciones industriales.

El agua es también electrolizada en una reacción paralela, produciéndose pequeñas burbujas de oxígeno en el ánodo y de hidrógeno en el cátodo. Estas atraen partículas floculadas y, a través de la flotabilidad natural, los contaminantes floculados flotan en la superficie.

En un experimento de electrocoagulación el electrodo o electrodos suelen estar conectados a una fuente externa de corriente continua. El nivel de metal disuelto o almacenado depende del nivel de electricidad que se transporta por la solución electrolítica. Una relación sencilla comprendida por la intensidad de corriente ($A\text{ cm}^{-2}$) y el nivel de sustancia disuelta (M) ($g\text{ de }M\text{ cm}^{-2}$) pueden deducirse de la ley de Faraday.

INDICE

RESUMEN	02
INDICE	03
INTRODUCCIÓN	06
CAPÍTULO I FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	07
1.1. Situación problemática	07
1.2. El problema de investigación	08
1.3. Hipótesis de la investigación	08
1.4. Objetivos de la investigación	09
1.4.1. Objetivo general	09
1.4.2. Objetivos específicos	09
1.5. Justificación e importancia de la investigación	09
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	12
2.1. Antecedentes	12
2.2. Bases teóricas	14
2.2.1. Las aguas residuales	14
2.2.2. Parámetros de contaminación	17
2.2.2.1. Sólidos y microorganismos	17
2.2.2.2. Materias oxidables biológicamente	22
2.2.2.3. Oxígeno disuelto (OD)	26
2.2.2.4. Ciclo del nitrógeno	26
2.2.2.5. Fósforo total	27
2.2.2.6. pH	27
2.2.2.7. Cloruros	28
2.2.2.8. Grasas	29

2.2.3. Caracterización de las aguas residuales	29
2.2.3.1. Aguas blancas	29
2.2.3.2. Aguas negras	31
2.2.3.3. Aguas industriales	31
2.2.3.4. Efectos de la contaminación	35
2.2.4. Reutilización de aguas residuales	36
2.2.4.1. Reutilización agrícola y forestal	37
2.2.4.2. Reutilización con fines recreativos	38
2.2.4.3. Reutilización industrial	39
2.2.4.4. Reutilización en acuicultura	40
2.2.5. Métodos electroquímicos de tratamiento de aguas residuales	41
2.2.5.1. Fundamentos de la Electrocoagulación	42
2.2.5.2. Potencial en una celda de electrocoagulación	46
2.2.5.3. Tipos de reactores para electrocoagulación	47
2.2.5.4. Ventajas y desventajas del proceso de electrocoagulación	48
2.2.5.5. Aplicaciones de la electrocoagulación	51
2.3. Marco conceptual	52
2.3.1. Tratamiento de aguas	52
2.3.2. Electrocoagulación	54
CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	56
3.1. Tipo, nivel y diseño de la investigación	56
3.1.1. Tipo de investigación	56
3.1.2. Nivel de investigación	56
3.1.3. Diseño	56
3.2. Población y muestra de investigación.	56

3.2.1 Población	56
3.2.2 Muestra	57
3.3. Variables e indicadores	57
3.3.1. Variable independiente	57
3.3.2. Variable dependiente	57
3.4 Técnicas de recolección de información	57
3.5 Técnicas de procesamiento y análisis de resultados	57
3.6 Métodos y procedimientos	57
3.6.1. Reactivos	57
3.6.2. Materiales	58
3.6.3. Equipos	59
3.6.4. Instalación de equipos	62
3.6.5. Proceso de electrocoagulación	62
3.6.6. Metodología para los parámetros fisicoquímicos.	63
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	65
4.1. Resultados, análisis y discusión	65
4.1.1. Eliminación de nitratos y sulfatos	65
4.1.2. Eliminación en fosfatos del fósforo	66
4.1.3. Eliminación de sulfatos, nitratos, fósforo, DQO, ionización del Al	67
4.1.4. Eliminación de microorganismos	68
4.1.5. Separación de placas	69
4.1.6. Influencia de los parámetros pH y conductividad	73
CONCLUSIONES	75
RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	78

INTRODUCCIÓN

Podemos mencionar como recurso no convencional a las aguas residuales regeneradas que se ha desarrollado en los últimos decenios, sin embargo para reutilizarlo se necesita de tecnología adecuada y de estudios previos detallados y específicos.

La desalación del agua es una aspiración del hombre que se remonta a la más remota antigüedad. El proceso de desalación se define como la separación de las sales de una disolución acuosa. Dicha definición puede ampliarse y entenderse como la disgregación total del elemento disolvente, es decir el agua, de la disolución inicial, con el fin último de separar totalmente ambos componentes para obtener agua apropiada para el uso humano.

Las aplicaciones potenciales más importantes de la electrodiálisis son:

- Desalación del agua salobre y agua marina.
- Concentración de agua marina.
- Desmineralización de suero.
- Recuperación de metales y aguas de lavado de electrodeposición.
- Desalación de purga de agua de fibra y refrigeración.
- Recuperación de ácidos y bases de efluentes ácidos usados.
- Desmineralización del vino.
- Desmineralización del azúcar.
- Obtener agua ultrapura para la industria farmacéutica y electrónica

La electrodiálisis es, técnica que ocupa el transporte de iones a través de membranas selectivas bajo la semántica de un campo eléctrico.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Situación problemática

Los problemas del mal manejo de las aguas residuales no sólo afectan la salud humana, también está relacionado con la contaminación atmosférica, del suelo, las aguas superficiales y subterráneas que muchas veces abastecen al agua potable. Estos recursos hídricos se contaminan por la afluencia de lixiviados sin tratamiento previo (aguas crudas).

El tratamiento de aguas residuales es uno de los grandes problemas; el tratamiento primario es aquel proceso que se usa para eliminar los sólidos de las aguas contaminadas; secundario, usado para reducir la cantidad de materia orgánica por la acción de bacterias (disminuir la demanda bioquímica de oxígeno) y terciario, usado para eliminar los productos químicos como fosfatos, nitratos, plaguicidas, sales, materia orgánica persistente, entre otros.

1.2. El problema de investigación

Normalmente, los daños ambientales debidos a la eliminación de aguas residuales pueden incluir la contaminación de la calidad del suelo, de las aguas subterráneas y superficiales, y del aire. Resultan impactos adversos de la ubicación incorrecta, diseño inadecuado o mala operación. Por ejemplo, las aguas residuales vertidas al suelo sin ningún tipo de tratamiento previo, contienen partículas finas y micro organismos, así sólidos disueltos que

pueden ser filtrados por la matriz del suelo, o pueden pasar a través del suelo no saturado que se halla debajo del depósito, y entrar en las aguas subterráneas. El agua superficial puede ser contaminada al recibir el agua subterránea contaminada, o por el flujo superficial directo.

De allí la necesidad de realizar estudios para: determinar un procedimiento adecuado para realizar la depuración de las aguas residuales de la ciudad de Ica.

El problema se plantea mediante la pregunta: **¿Cómo se determina la evaluación de los parámetros de diseño del proceso de tratamiento de agua por electrocoagulación?**

1.3. Hipótesis de la investigación

Determinación de la evaluación de los parámetros de diseño del proceso de tratamiento de agua por electrocoagulación.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Evaluar los parámetros de diseño del proceso de tratamiento de agua por electrocoagulación.

1.4.2. Objetivos específicos

- Estudio comparativo de la electrocoagulación como tratamiento de aguas para obtener agua regenerada.
- Conocimiento fisicoquímico de la electrocoagulación.

- Establecer la influencia sobre la electrocoagulación de parámetros físicos, como pH, conductividad.

1.5. Justificación e importancia de la investigación

La calidad microbiológica y parasitológica es una de las limitaciones del aprovechamiento en el área agrícola de lodos y biosólidos producidos por las plantas de tratamiento de aguas residuales domesticas (PTAR),

La purificación de aguas residuales origina lodos y biosólidos según el impacto del tratamiento. Los lodos hacen parte de los procesos y su termino es usado antes de que un criterio benéfico haya sido obtenido, de igual manera, los biosólidos son lodos que pueden ser usados benéficamente para posteriormente ser sometidos a procesos de estabilización (4).

El tipo de tratamiento a utilizar se basará en la composición y el aprovechamiento de disposición final.

Los lodos y biosólidos tienen elevado potencial de aprovechamiento agrícola debido a que perfeccionan los niveles de materia orgánica, de macro y micronutrientes, pero también existen riesgos por la presencia de sustancias toxicas (arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, níquel, plomo, selenio, zinc) (5) y microorganismos existentes en las aguas residuales. Sin olvidar la inadecuada aplicación puede deteriorar la formación y producción de algunas especies vegetales.

En las aguas residuales se encuentran en abundancia los biosólidos que están formados principalmente por materia orgánica degradable (entre un 60% y

88%) y una población microbiológica no estabilizada capaz de causar un impacto negativo al ambiente en el caso de no ser tratado adecuadamente.

La cantidad de lodos generados por un sistema de tratamiento es variable, dependiendo de diversos parámetros, entre ellos si el sistema de tratamiento biológico involucra procesos aeróbicos o anaeróbicos. La generación de sólidos finales en un proceso aeróbico puede llegar a ser el doble que en un proceso anaeróbico.

Sabemos por la información confiable obtenida que no existe ningún tipo de control de las aguas residuales en Ica, de allí que es necesario de realizar esta investigación referente a realizar un tratamiento adecuado de las aguas residuales de Ica.

La factibilidad económica es posible si los proyectos conciben el tratamiento y el uso de manera integral y si se toman en cuenta los costos del terreno, transporte del agua hasta el lugar de tratamiento o reuso, el proceso de tratamiento mismo y la rentabilidad de los cultivos. Muchos proyectos pueden carecer de viabilidad si no existe disponibilidad de terrenos y si se eleva el costo de trasladar el agua hasta un lugar lejano.

De una u otra forma, la responsabilidad del tratamiento adecuado y uso de las aguas residuales solo podrá ser asumida por "unidades de producción" a escala comercial, ya que requiere de una evaluación de factibilidad técnica, económica y financiera, poco probable de ser lograda a nivel de minifundios

A menudo, los proyectos relacionados con el tratamiento y el uso aguas residuales traen conflictos en la población, la mayoría de las personas admiten la necesidad de este proceso, pero no desean que se ejecute en zonas

aledañas a sus comunidades. Estas situaciones han originado la postergación o paralización de proyectos. La negativa de los vecinos ocasiona una presión política sobre las autoridades, lo que resulta que estas tomen una posición populista y conlleve a revocarlos.

El rechazo de la población urbana al uso de las aguas residuales muchas veces se sustenta en una actitud psicológica de repulsión a las excretas, temor a las enfermedades transmisibles.

En otros casos el rechazo obedece a los malos olores y a la proliferación de zancudos generados por la mala operación de algunas plantas de tratamiento. Esta es una razón más para insistir en la necesidad de contar con el personal necesario y calificado que asegure la eficiencia del proceso.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

En las últimas décadas, las tecnologías electroquímicas aplicadas al tratamiento de aguas residuales han experimentado un rápido desarrollo. Una de estas tecnologías es la coagulación asistida de forma electroquímica, que puede competir con el proceso de coagulación química convencional en el tratamiento de numerosos tipos de efluentes, como son las aguas de abastecimiento, las aguas residuales coloidales, las aguas residuales contaminadas con macromoléculas orgánicas disueltas, o las emulsiones de aceite en agua. (17)

El proceso de coagulación asistida electroquímicamente fue considerado como una tecnología prometedora a finales del siglo XIX aunque, como situación desgraciadamente muy frecuente en la historia de la ingeniería electroquímica, esta tecnología fue aplicada directamente sin realizar estudios científicos que determinasen cual era el caso idóneo de aplicación. En las siguientes décadas, algunas plantas de electrocoagulación fueron empleadas en los Estados Unidos para el tratamiento de aguas residuales urbanas. Sin embargo, estas plantas fueron abandonadas debido a los aparentes mayores costes de operación, y a las mayores inversiones si se las comparaba con los procesos de dosificación química convencional. (17)

Recientemente, algunos trabajos enfocados en el estudio de esta tecnología han mostrado resultados prometedores, y varias empresas han empezado a comercializar plantas para el tratamiento de aguas residuales reales, especialmente para potabilización y depuración en pequeños núcleos de población, y para el tratamiento de efluentes industriales. Asimismo, el proceso de coagulación asistida de forma electroquímica ha sido empleado satisfactoriamente en el tratamiento de suspensiones coloidales, y ha sido muy ampliamente utilizado (con éxito) en la eliminación de color de aguas residuales procedentes de industrias textiles. También existen trabajos en los que esta técnica es empleada en la desestabilización de efluentes emulsionados, e incluso se han publicado otros en los que se utiliza la técnica para eliminar iones solubles, tales como los nitratos y los fluoruros. (17)

No obstante, se puede afirmar que existen muy pocos trabajos en los que se haya comparado los procesos de coagulación por vías química y electroquímica en el tratamiento de distintos tipos de aguas residuales. Además, estos trabajos se limitan a estudiar las diferencias en cuanto a la eficacia de ambas tecnologías e intentan directamente su optimización de funcionamiento en cada caso concreto, sin profundizar en el fundamento de los procesos que tienen lugar en su interior. (17)

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Las aguas residuales

A lo largo de los años, se ha usado las aguas para consumo, actividad y confort del hombre, convirtiéndola en aguas residuales, originando así sus aguas usadas como aguas residuales.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) todo ser humano tiene como derecho fundamental “el disfrute del grado máximo de salud posible”.

También considera a la salud como “estado completo de bienestar físico, mental y social”, y fija el nivel de salud por el grado de armonía, que exista entre el hombre y el medio que sirve de escenario a su vida.

Uno de los factores importantes que divide la armonía entre el hombre y el medio tanto a corto, medio y largo plazo es la contaminación de las aguas, es por ello por lo que la prevención y la lucha contra esta conforma en estos tiempos una necesidad de suma importancia.

La acción y el efecto de introducir materia, formas de energía o impulsar condiciones en el agua de forma directa o indirecta son los efectos de la ley de las aguas, la contaminación, esto implica una alteración contraproducente de la calidad en relación con posteriores usos o su función ecológica.

La contaminación de los cauces receptores superficiales y subterráneos (ríos, lagos, embalses, acuíferos, mar) tiene su origen en:

- Precipitación atmosférica.
- Escorrentía agrícola y de zonas verdes.
- Escorrentía superficial de zonas urbanizadas.
- Vertidos de aguas procedentes del uso doméstico.
- Descargas de vertidos industriales.

Dentro de las distintas clasificaciones que pueden establecerse de las aguas residuales, uno de los esquemas, más generalmente utilizado por su simplicidad, es el que las identifica por su procedencia:

- Drenaje
- Escorrentía
- Domésticas: Fecales; limpieza
- Industriales: Comerciales; Industriales
- Agrarias: Agrícolas; Ganaderas

En base a ello, las aguas contaminadas se clasifican también en:

Aguas pluviales:

Agua producida por las precipitaciones atmosféricas, tales como lluvia, nieve, granizo, entre otras. Se caracteriza por sus grandes aportaciones intermitentes de caudal y por una alta contaminación en los primeros 15-30 minutos. Las cargas contaminantes se unen al agua al pasar por la atmosfera y por el lavado de superficies y terrenos.

Aguas blancas:

Aguas procedentes de la escorrentía superficial y de drenajes. Se caracteriza por sus grandes aportaciones intermitentes de caudal y por una alta contaminación en los 15-30 minutos de las escorrentías, de igual forma se determina por los caudales drenados (aguas salobres, filtraciones de alcantarillado, etc.).

Aguas negras o urbanas:

Aguas obtenidas de las aglomeraciones urbanas que proceden de la actividad humana doméstica o de actividades comerciales, industriales y agrarias de los

alrededores. Sus volúmenes son inferiores que las aguas blancas y sus caudales y su contaminación mucho más frecuente.

Aguas industriales:

Agua originada de las actividades industriales tales como preparaciones de materias primas, elaboración y acabo de productos, así como transmisión de calor y frío.

En estas aguas pueden aparecer elementos propios de cada actividad, entre los que podemos mencionar: tóxicos, iones metálicos, productos químicos, hidrocarburos, detergentes, pesticidas, productos radioactivos, etc.

Aguas agrarias:

Son aguas procedentes de actividades agrícolas y ganaderas. La denominación de aguas agrícolas se debe reservar a las procedentes exclusivamente de la actividad agrícola, aunque está muy generalizada (impropiamente) su aplicación también a las procedentes de actividades ganaderas. La contaminación de las aguas agrarias es muy importante, perjudicando sensiblemente las características del cauce o medio receptor.

Análogamente a las aguas industriales, las aguas agrarias, además del contenido en sustancias similares a los vertidos de origen doméstico, pueden contener elementos propios de las actividades agrarias: Fertilizantes, biocidas (plaguicidas, pesticidas, productos fitosanitarios, ...), estiércol, residuos varios, etc. Con respecto a los fertilizantes es importante destacar que antes eran de origen orgánico y hoy han sido casi sustituidos por abonos de origen inorgánico, tales como sulfatos, nitratos, fosfatos, etc., de especial incidencia en la contaminación de las aguas. (3)

2.2.2. Parámetros de contaminación

2.2.2.1. Sólidos y microorganismos

El total del contenido de materia solida almacenada en el agua constituye los solidos totales (ST), tanto orgánicos como inorgánicos, el valor queda delimitado por toda la materia que existe como residuo de evaporación a 105°C. Estos pueden hallarse como:

- a) Sólidos Disueltos (SD) que no precipitan siendo hallados en el agua en estado tanto iónico como molecular.
- b) Sólidos en Suspensión (SS), pueden ser:
 - Sedimentables (SSs), puede ser sedimentado fácilmente en un periodo de 2 horas en cono Imhoff por su peso.
 - No sedimentables (SSn), no puede ser sedimentado fácilmente debido a su peso aproximado al líquido.

Los solidos suspendidos sedimentables formar parte de una medida del nivel de fango que se almacenara durante el proceso de decantación en las depuradoras.

Cabe señalar que estos solidos pueden ser clasificados en base a una volatilidad a 500°C. Dando espacio a que la fracción orgánica se oxide y sea expulsada como gas, pero permaneciendo su tracción inorgánica como ceniza, es por ellos que cuando queremos referirnos a la parte orgánica e inorgánica usamos los términos volátiles y fijos respectivamente, siendo estos aplicados a los solidos totales, disueltos, en suspensión, sedimentables y no sedimentables.

De la actividad humana, ya sea animal y/o vegetal se originan los sólidos orgánicos, conteniendo estos, C, H, O, N, S, P y K. Tal es el caso de los hidratos de carbono, las proteínas, las grasas, etc. La probabilidad de degradación y descomposición por acciones enzimáticas de microorganismos o reacciones químicas es su mayor característica. Los minerales, áreas, tierras y entre otros son denominados sólidos inorgánicos con sustancias inertes y no degradables.

Es totalmente necesario un índice que represente los elementos orgánicos e inorgánicos presentes en el agua. Para este fin deben determinarse y definirse los parámetros que figuran en la Figura 1.

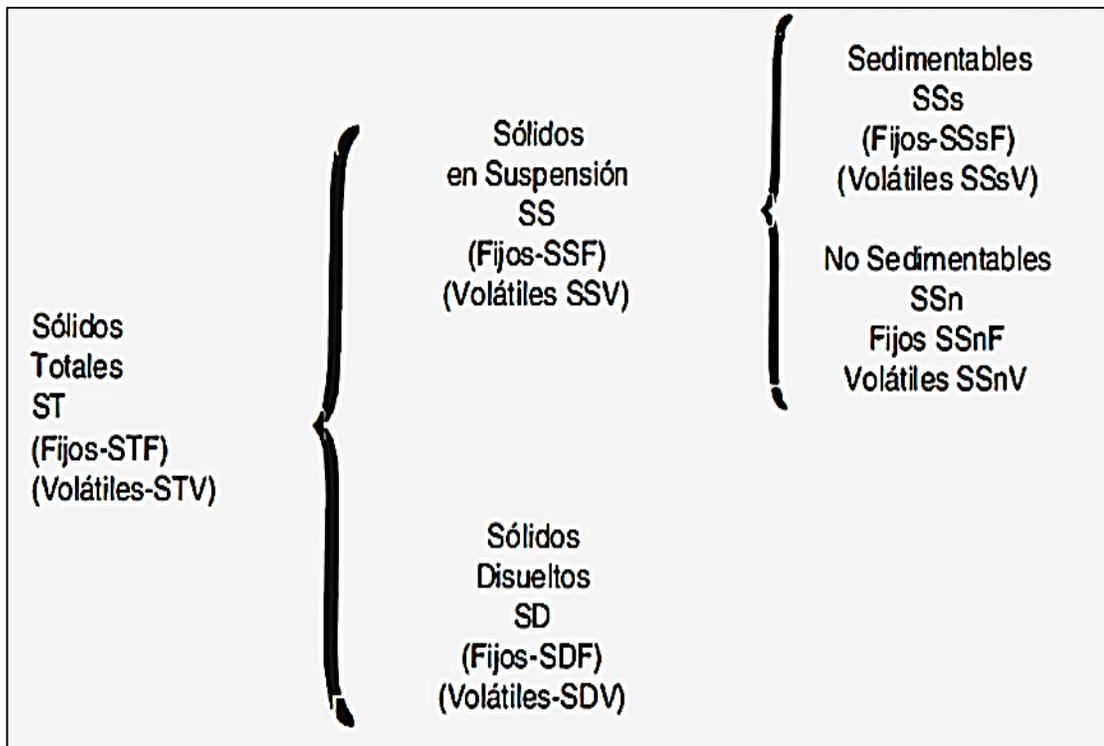


Figura 1. Distribución de los sólidos (3)

Cada uno de estos sólidos son de constitución diferente por el contenido orgánico e inorgánico. A los sólidos inorgánicos se les denomina sólidos fijos

(F) y a los orgánicos volátiles (V). Para la determinación de los sólidos se desecará la muestra a 105°C. A 500° C la materia orgánica se volatiliza, quedando los sólidos fijos, y por diferencia con los que permanecen a 105°C se obtienen los volátiles.

Para determinar los sólidos sedimentables se realiza un ensayo introduciendo un litro de muestra en un cono IMHOFF. Los sólidos separados al cabo de un tiempo de 2 horas se denominan sólidos sedimentables.

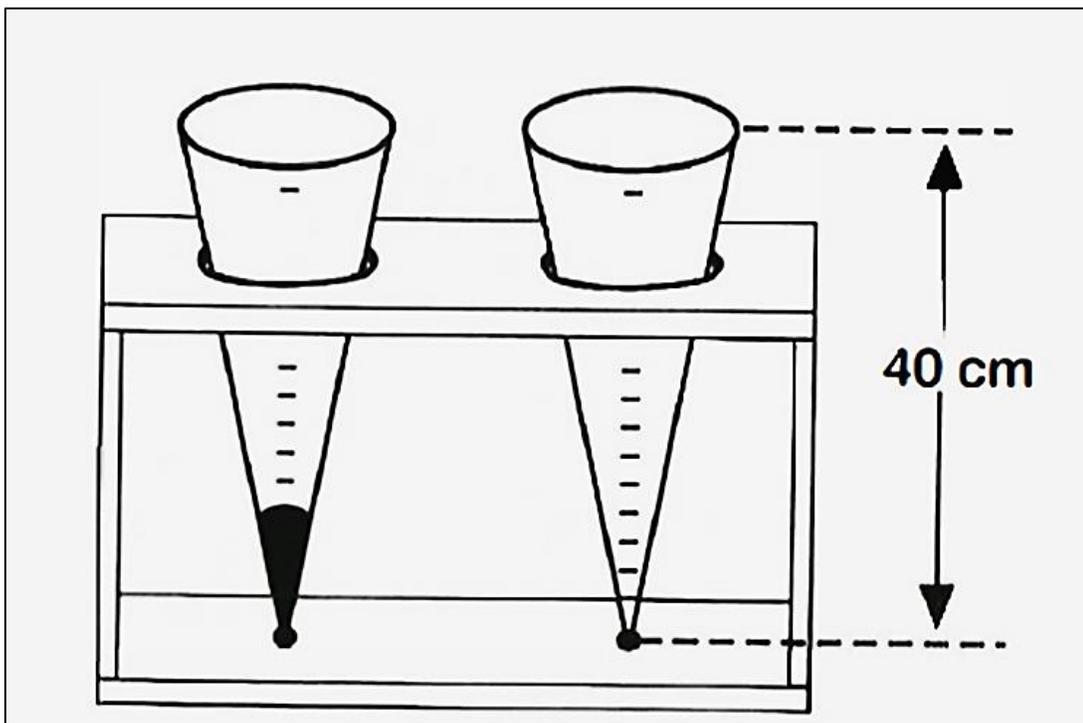


Figura 2. Cono Imhoff (3)

Entre la materia viva incorporada a las aguas, contemplada bajo la denominación de microorganismos, pueden citarse: virus, algas, protozoos, bacterias, hongos, insectos, rotíferos, etc.

Los microorganismos pueden clasificarse en:

- Parásitos, si viven a expensas de otro organismo vivo, pudiendo ser BENIGNOS o PATÓGENOS. Estos últimos pueden ser causa de enfermedades que afectan directamente al hombre, como hepatitis, fiebres tíficas, cóleras, salmonelosis, disenterías, etc.
- Saprofitos, que viven de la materia orgánica muerta descomponiéndola para alimentarse. De su actividad metabólica se origina nueva materia viva, productos de desechos y formación de flóculos.

Otra clasificación importante es la basada en la posibilidad que tienen los microorganismos para la captación de oxígeno, como elemento básico energético de su vida. Atendiendo a esta característica se clasifican en:

- Aerobios, que constituyen el 60-65% de microorganismos existentes en un agua residual, caracterizándose por captar de forma directa el oxígeno disuelto en el agua.
- Anaerobios, que constituyen el 10-25% de los microorganismos existentes en las aguas residuales. Obtienen el oxígeno por descomposición de la materia orgánica constituida por tres o más elementos (C, H, O, N, S, P, K).
- Facultativos, que constituyen el 10-30%. Pueden estos adaptarse según las condiciones, tanto aerobias o anaerobias, teniendo en cuenta la existencia o falta de oxígeno disuelto en las aguas.

Conviene dejar claro aquí que, existen microorganismos patógenos que pueden causar problemas sanitarios al hombre, sin embargo, también existen los que aportan a la naturaleza, reciclando, reutilizando la materia y cerrando ciclos tan importantes como los del carbono, nitrógeno, fósforo y azufre.

También deben ser mencionados aquellos organismos denominados macroscópicos porque son visibles, como insectos gusanos y entre otros, que colaboran en la descomposición biológica de la materia orgánica.

2.2.2.2. Materias oxidables biológicamente

Estas son de tipo orgánicos y absorben una cantidad de oxígeno de forma natural hasta su mineralización, debido a los procesos químicos o biológicos de oxidación que se producen en el seno del agua. Mediante el análisis de parámetros como los siguientes se pueden medir el índice de este fenómeno.

a) Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Cantidad de oxígeno disuelto y consumido por vía biológica por un agua residual durante el proceso de oxidación de la materia orgánica biodegradable presente en esta agua, en determinadas condiciones de ensayo en un tiempo dado, tales como 20°C, oscuridad, presión atmosférica y muestras diluidas en agua pura tomando en cuenta condiciones aerobias durante las pruebas. (3)

Para indicar el oxígeno necesario para alimentar a las reacciones químicas y microorganismos se refleja la materia orgánica existente en el agua.

Este ensayo se lleva a cabo llenando un frasco con el agua a evaluar, siendo tapado a continuación, a la vez observando el consumo de oxígeno en algunos días. Con dicho ensayo se pretende simular lo que originaría un volumen de agua que discurre dentro de una corriente de agua, en régimen laminar, con una temperatura de 20°C, donde el oxígeno es consumido por acción microbiana y reacciones de oxidación.

A título ilustrativo, esta curva podría representarse según la Figura 3.

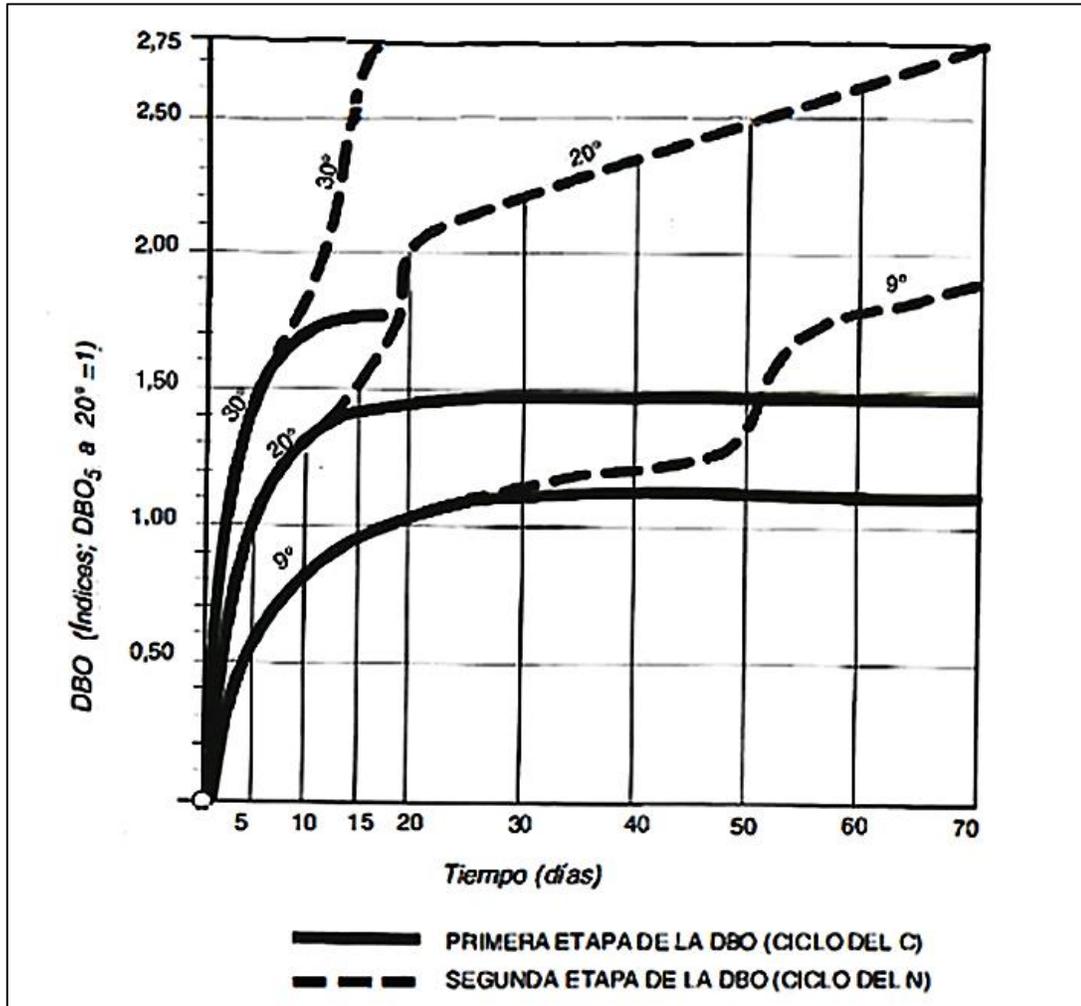


Figura 3. Evolución de la DBO en función del tiempo y la temperatura (3)

Se observa en dicha curva la evolución del consumo diario de oxígeno en relación con la incidencia de la temperatura.

Se recalca igualmente que a partir de un cierto tiempo la curva, parece en una primera instancia a tender a un valor asintótico, pero varía elevando su valor en la segunda instancia. La primera se debe a la demanda del ciclo del carbono y la segunda al ciclo del nitrógeno.

Donde se produce la descomposición de los compuestos del carbono es la primera etapa de la oxidación biológica de la materia orgánica, se inicia con una temperatura de 20°C y finaliza a los 20 días aproximadamente.

Donde se origina la descomposición de los compuestos nitrogenados es la segunda etapa, inicia con 20°C a los 10-15 días.

En la determinación de la DBO influye la presión, pero su variación no es muy importante.

Para controlar los procesos de depuración o autodepuración natural se suele adoptar la demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días y a 20°C (DBO₅), dicho valor se aproxima suficientemente al valor asintótico de la DBO correspondiente al ciclo del carbono.

Se ha señalado la correspondencia de este ensayo con la realidad, lo que marca su importancia, y se han señalado los problemas de su determinación por su variación con la temperatura y el tiempo.

Es sabido que el resultado no refleja la realidad del hecho de la naturaleza, es por ello por lo que es necesario adoptar otros métodos, pues estos permitirán una rapidez de determinación, control de procesos de depuración y vertidos.

b) Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Cantidad de oxígeno disuelto y consumido por vía química por un agua residual provocada por un agente químico fuertemente oxidante.

Encontrar su determinación precisa un ensayo de 1 o 2 horas si la oxidación se realiza en frío o 20 a 30 min si se da con dicromato en caliente, por lo tanto, es más rápida que la DBO.

La oxidación se activa sobre la materia orgánica biodegradable y las sales minerales oxidables que existen en el agua por analizar.

El agua con la sustancia oxidante como puede ser el dicromato potásico y a pH determinado, se calienta para facilitar la oxidación para luego determinar la cantidad de oxígeno desaparecido. Esta depende de las materias que oxida tanto orgánica como inorgánica y del reactivo oxidante que existen en el agua. Si bien de lo dicho anteriormente se desprende que no existe relación alguna entre la DBO₅ y la DQO, es posible en determinados tipos de aguas residuales obtener unas curvas de correlación válidas para control.

La relación encontrada entre la DBO₅ y la DQO indicará la importancia de los vertidos industriales dentro del agua residual analizada y sus posibilidades de biodegradabilidad (Tabla 1.).

Tabla 1. Biodegradabilidad de un agua residual

$\frac{DBO_5}{DQO}$	Biodegradabilidad del agua residual
< 0.2	Poco biodegradable
0.2 – 0.4	Biodegradable
>0.4	Muy biodegradable

2.2.2.3. Oxígeno disuelto (OD)

El oxígeno es la fuente de energía de los seres vivos por lo tanto se convierte en el índice principal para la descripción y control de aguas residuales.

La cantidad de oxígeno en el agua puede ser incrementada por:

- Captación del oxígeno a través de la superficie de interfase agua-aire.
- Acción fotosintética, debida principalmente a las algas verdes.
- Descenso de temperatura.
- Dilución.

La cantidad de oxígeno puede disminuir por las algas, la respiración de los microorganismos y organismos macroscópicos, reacciones químicas, elevación de la temperatura, y por la acción metabólica de los microorganismos regidos por la acción enzimática.

2.2.2.4. Ciclo del nitrógeno

En su variedad nitritos, amoniacal, y nitratos señalan la proximidad al punto de vertido de las aguas residuales.

Concentración del ion amonio

Primera etapa del ciclo del nitrógeno por variación de la urea.

El ion-amonio procede también de la disolución de amoníaco de alguna de sus compuestos nitrogenados en fase de descomposición de los vertidos o sales.

El agua con contenidos bajos de amoníaco no es dañina para uso agrícola ya que son usados como abonos, pero si daña a la vida piscícola.

Concentración de nitritos y nitratos

Segunda y tercera etapa del ciclo del nitrógeno, que se origina por la acción de los nitrosomas, bacterias arobias y los nitrobacter. (3)

2.2.2.5. Fósforo total

Elemento indispensable para que los microorganismos de las aguas se desarrollen y resulte en el proceso de depuración biológica.

El contenido del fosforo puede encontrarse en suspensión y disuelto en vertidos tales como fosas sépticas, detergentes (vertidos urbanos), abonos, piensos compuestos (vertidos de la industria agroalimentaria)

Una acción importante de los fosfatos es la influencia en el transporte y retención de los metales en el agua, debido al fenómeno de complejación.

2.2.2.6. pH

En los vertidos industriales, urbanos y en la misma naturaleza encontramos bases y ácidos que alteran el pH de las aguas.

Los valores mas adecuados para los microorganismos neutrófilos se encuentran en las aguas urbanas obteniendo un aproximado de 7.

Los valores altos o bajos del pH traducen una aparición de vertidos industriales, por lo tanto, sirve como indicador. Es por ello por lo que se requiere controlar los valores para garantizar procesos biológicos, debiéndose mantener entre valores de 6,2 y 8,5, para que no se generen problemas de inhibición.

2.2.2.7. Cloruros

El ión cloruro está presente siempre en las aguas urbanas, siendo los valores incorporados por habitante muy constantes. Se reconoce que el 75% de la

población vive de cara al mar, este parámetro es detectado para verificar la introducción de aguas de mar dentro de la red de saneamiento.

Otro aspecto importante en relación con este ion es el alza de salinización de las aguas que pueden impedir la acción de los microorganismos en las depuradoras.

El valor a partir del cual se presentan problemas de inhibición del proceso puede fijarse según nuestra experiencia en 3.500 ppm.

Cabe señalar que se usa también para detectar una concentración con valores variados anormales en las áreas urbanas.

2.2.2.8. Grasas

El poder tensoactivo que impiden la captación del oxígeno origina problemas por la existencia de grasas e hidrocarburos en las aguas o genera películas envolventes de los flóculos biológicos impidiendo su respiración y aligerándolos, llevándolos a flotación, entorpeciendo así la decantación secundaria.

Otros problemas para destacar son los impactos visuales y la generación de suciedad en todos los elementos puestos en contacto con las aguas.

Este parámetro es también un indicador de vertidos industriales, dado que la producción por habitante, en un vertido urbano, es muy constante.

Debe destacarse que uno de los mayores problemas que llevan al mal funcionamiento de las pequeñas depuradoras es el contenido de grasas, debido a pretratamientos insuficientes. (3)

2.2.3. Caracterización de las aguas residuales

2.2.3.1. Aguas blancas

Constituidas por aguas pluviales, generadoras de grandes intermitentes de caudal.

Con el constante avance y desarrollo subterráneo urbano (centros comerciales y de ocio, aparcamientos, vías de comunicación deprimidas y subterráneas, galerías de servicios, entre otros.), las aguas del drenaje han ido cobrando importancia, por estar relacionadas con la contaminación efectuada por fugas en el alcantarillado.

Se integran, por tanto, como componentes de la suciedad de las aguas blancas:

- Elementos de la contaminación atmosférica: deposición húmeda de las lluvias ácidas.
- Restos de la actividad humana y asociada: papeles, colillas, excrementos de animales (perros, gatos, ...), restos de la recogida y evacuación de basuras, etc.
- Residuos del tráfico: aceites, grasas, hidrocarburos, compuestos fenólicos y de plomo, etc.
- Arenas, residuos vegetales y biocidas (insecticidas, herbicidas, abonos, etc.) de zonas ajardinadas.
- Contaminación aportada por las aguas de drenaje: aguas salobres, fugas de alcantarillado, etc.

Sumando a estos elementos, la primera ola pluvial arrasa los depósitos acumulados en las conducciones, es por ello por lo que su vertido trae más cargas elevadas que las aguas negras.

En la Tabla 2 se refleja las características de estas aguas en cuanto a contaminación orgánica.

Tabla 2. Contaminación de las aguas blancas

Características	Contaminación (mg/l)
DBO5	25
DQO	65
SS	230
SSV	40
N en (NH3)	0.2
N en (NO2)	0.05
N en (NO3)	0.5
N (orgánico)	1.4
PO4 (total)	1.15
PO (soluble)	0.46

2.2.3.2. Aguas negras

Los elementos químicos conforman la gran parte de las aguas negras o también denominadas urbanas, encontrándose allí microorganismos, urea, albúmina, proteínas, ácidos acético y láctico; bases jabonosas y almidones; aceites: animales, vegetales y minerales; hidrocarburos; gases: sulfhídrico, metano, etc.; sales: bicarbonatos, sulfatos, fosfatos, nitritos, nitratos, etc.

En la tabla 3 se encuentran las características detalladas y suficientes para delimitar un vertido urbano, aquí resaltarán valores de aguas residuales con concentración fuerte, media o ligera. (3)

2.2.3.3. Aguas industriales

Existen vertidos urbanos que son tóxicos o inhibidores que en ciertas proporciones alteran procesos enzimáticos de microorganismos o hasta su muerte.

La cantidad que es vertida obliga a una investigación exhaustiva para cada industria propiamente. Cabe resalta que no puede existir una similitud entre los vertidos de las distintas actividades realizadas actualmente como lo son la química, petroquímica, forestal, agrícola, mineral, entre otros.

Sin embargo, si el contenido tiene niveles altos de solidos en suspensión o de materia orgánica, se puede evaluar con el mismo criterio que es analizada la definición de aguas residuales de origen doméstico.

Pero se requiere analizar aquellas sustancias que al ser vertidas puedan impedir el tratamiento biológico o a materiales de la red del alcantarillado u otros factores que contactan las aguas residuales, por lo tanto, las industrias antes de verter requieren efectuar una corrección de parámetros.

Son varios los índices inorgánicos y orgánicos que se originan de la actividad industrial, definidos en:

- Ácidos que pueden arremeter el material o inhibir los procesos.
- Básicos que pueden reprimir los procesos biológicos.
- Productos petrolíferos y grasas poco degradables.
- Detergentes que retrasan la sedimentación, forman espumas e impiden la reaireación.
- Metales pesados: Cu, Cr, As, Cd, Pb, Hg, B, etc., tóxicos para los microorganismos que intervienen en los procesos biológicos.
- Fenoles, cianuros, inhibidores y tóxicos.

- Productos radioactivos.

Es importante destacar la toma de muestras en cuanto a la variación del caudal y carga contaminante en el valor absoluto (3), los resultados arrojados por los laboratorios deben representar el agua que se desea definir.

Tabla 3. Características de las aguas residuales urbanas

Parámetro	Contaminación Fuerte	Contaminación Media	Contaminación Ligera
Sólidos totales	1000	500	200
Volátiles	700	350	120
Fijos	300	150	80
Sólidos en suspensión	500	300	100
Volátiles	400	250	70
Fijos	100	50	30
Sólidos sedimentables	250	180	40
Volátiles	100	72	16
Fijos	150	108	24
Sólidos disueltos	500	200	100
Volátiles	300	100	50
Fijos	200	100	50
DBO5 a 20°C	300	200	100
DQO	800	450	160
O2 disuelto	0	0.1	0.2
Nitrógeno total (N)	86	50	25
Orgánico (N)	35	20	10
Amoníaco libre N-NH4	50	30	15
Nitritos N-NO2	0.10	0.05	0.00
Nitratos N-NO3	0.40	0.20	0.10
Fósforo total (P)	17	7	2
Cloruros	175	100	15
pH	6.9	6.9	6.9
Grasas	40	20	0
Valores en mg con excepción del pH			

Tabla 4. Consumo de agua y contaminación de algunos tipos de industria

Tipo de producción	Unidad (ud)	Consumo de agua	Sólidos en suspensión kg/ud	DBO ₅	
		(m ³ /ud)		kg/ud	Habitantes equivalentes/ud
Azúcar:	1 t remolacha				
Lavado		10-20		6,0-22,0	120-400
Difusión		5-10	100,0-750,0	1,2-2,7	22-50
Prensado		1,5-2,0		2,2	40
Residuos		4,0-5,0		0,4-0,5	8-10
Otros vertidos		1,5		3,3-3,8	60-70
Mataderos	1 ud bovino = 25 cerdos = 500 kg.	0,3-40	0,6-26,0	4,0-11,0	70-200
Centrales lecheras:	1 m ³ leche				
Refrigeración		2-4			
Desechos		0,5-5			
Mantequilla				1,5-2,0	28-37
Mantequilla y leche				2,0-3,0	37-55
Queso				3,0-4,0	55-75
Cafeína sin valorar suero	1 m ³ leche	4-9		40,0	200
Leche condensada	1 t leche condensada	2		10,0	
Cerveceras:	1 m ³ cerveza				
Refrigeración		18,5			
Limpieza botellas		5,0	0,6	0,4	
Lavado telas filtrantes		1,4	2,0	0,6	
Limpieza fábrica		0,5	8,2-9,7	1,1-24,2	
Extracción de carbón	1 t carbón	1-10	0,03-0,30		
Industria minera metálica	1 m ³ mineral lavado	16			560
Extracción de sal	1 t	1		6,0	
Refinería	1 t petróleo bruto	0,1-0,2	6,0		

Tabla 5. Consumo de agua y contaminación de algunos tipos de industria (continuación)

Tipo de producción	Unidad (ud)	Consumo de agua	Sólidos en suspensión kg/ud	DBO ₅	
		(m ³ /ud)		kg/ud	Habitantes equivalentes/ud
Producción de gas	1 t carbón	1,2-1,5	16,0	16,0	300
Centrales eléctricas	1 empleado	0,5-10 ⁶			3
Colores y barnices	1 empleado	110 l/d			20
Farmacéutica y antibióticos	1 m ³ solución nutritiva	1,7	5,0	10,0	
Jabones	1 t jabón	15		50,0	1.000
Goma sintética	1 t goma	500		250,0	
Material plástico	1 t producto termin.	100		2,0-3,0	
Curtidos	1 t cuero	40-60	6,0	50-2.000	1.000-4.000
Fábrica de cola	1 t cola	300-1.200		50,0	1.000
Cocción de seda	1 t seda	30-70	37,0	70,0	1.000-3.000
Tintes y estampados	1 t mercancía	20-160		10,0-200,0	200-3.500
Lavandería a mano	1 t ropa	30-60			
Lavandería a máquina	1 t ropa	5		20,0	350-500
Contrachapado fibra dur.	1 t madera	8	100,0	70,0	1.300
Papelería	1 t papel	125-2.000	20,0	14,0	100-300
Construcción maquinaria	1 empleado	40 l/d			1-10
Trabajo metal	1 empleado	60 l/d			1-10
Trabajo carne animal					
desechos	1 t carne bruta	0,9-1,1	1,0	1,8-4,6	33-85
refrigeración	1 t carne bruta	30-40			
Productos alimentarios	1 t cereales	1,5-8,0	10,0	27,0	500
Frutas y conservas	1 t conserva	4-14	0,5-35,0	27,0	500

2.2.3.4. Efectos de la contaminación

Los parámetros fundamentales para contemplar en las aguas urbanas pueden reducirse a:

- Partículas en suspensión
- Contenido orgánico
- Contenido de microorganismos
- Contenido de nutrientes

Las aguas industriales incorporarán a los parámetros anteriores los específicos de la actividad industrial. Los efectos de estos tipos de contaminación pueden sintetizarse en la Tabla 5.: (3)

Tabla 6. Efectos de los distintos tipos de contaminación (3)

Principales categorías de contaminación		Categorías generales de efectos causados			
		Daños a los recursos vivos	Peligros para la salud humana	Impedimentos para riego e industria	Reducción de los lugares de distracción
Desagüe de aguas residuales domésticas (incluyendo los desperdicios de la elaboración de alimentos)	Microbiana directa	-	xx	-	x
	Microbiana indirecta	-	xx	x	-
	Eutrofización y procesos afines	xx	x	x	xx
Productos de desechos industriales	Metales pesados	x	xx	x	-
	Petroquímicos	-	xx	x	x
	Aceites, etc.	-	-	x	xx
	Plaguicidas	x	xx	-	-
	Detergentes	xx	-	-	x
Actividad agrícola	Calor	xx	-	x	x
	Abonos	x	xx	-	-
	Pesticidas Plaguicidas	x	xx	-	-
x Categoría general de efectos más frecuentemente asociados con esta clase de contaminación. xx La categoría más importante de los efectos del tipo concreto de contaminación.					

2.2.4. Reutilización de aguas residuales

La reutilización de aguas residuales reviste mayor importancia a medida que transcurre el tiempo, dado que día a día aumentan en nuestra sociedad las necesidades en cantidad y calidad. Todas las leyes de Aguas hacen referencia a la reutilización de aguas residuales depuradas.

El gran desarrollo tecnológico de los sistemas de tratamiento de depuración, todavía no implantados como sería deseable, hace que las aguas residuales

se reutilicen solo en agricultura, con fines recreativos, industria, acuicultura y recarga de acuíferos.

2.2.4.1. Reutilización agrícola y forestal

- Los vegetales utilizan directamente para su crecimiento los nutrientes contenidos en las aguas residuales.
- Mejora las condiciones agrícolas de los suelos, preservando su estructura.
- Aumenta la fertilización de los cultivos.
- Disminuyen los organismos patógenos de los suelos.

Algunas experiencias de reutilización de aguas residuales urbanas en regadío, con indicación de los cultivos utilizados y de los tratamientos previos aplicados, se muestran las Tablas 7 y 8.

Tabla 7. Reutilización de aguas residuales urbanas para regadío en España

LOCALIDAD	CULTIVOS	TRATAMIENTOS
Calvia (Palma de Mallorca)	Almendro, Patata, Olivar, Cereales y hortalizas	Convencional
Campo de Cartagena (Murcia)	Almendro, Cebada, Melón, Avellana y Alfalfa	Lagunaje
Guardamar de Segura (Alicante)	Almendro, Alcachofa, Limonero y Naranja	Lagunaje
Camarma de Esteruelas (Madrid)	Cebada, Trigo y Vid	Biodiscos

FUENTE: Sierra, Peñalver y Rambla (6)

Tabla 8. Reutilización mundial de aguas residuales urbanas en regadío

LOCALIDAD	CULTIVOS	TRATAMIENTOS
Mezquital (México)	Cereales, Alfalfa	Efluentes Brutos
Bikaner (India)	Trigo, Hortalizas	Efluentes Brutos
Lima (Perú)	Vegetales crudos	Efluentes Brutos
Debrecen (Hungria)	Patata, Maíz, Alfalfa	Decantación
St. Charles (USA)	Bosques	Lagunaje
Fontana (USA)	Frutales, Vid	Primario
Madera (USA)	Algodón, Cereales	Decantación + Filtración
Modesto (USA)	Alfalfa, Maíz, Avena	Decantación + Lagunaje
MusKegon (USA)	Cereales	Lagunaje + Decanta. + Desinfec.
Pomona (USA)	Cítricos, Vid, Alfalfa	Cloración
Fresno (USA)	Algodón, cereales	Secundario
Camarillo (USA)	Fresa, Tomate, limón	Secundario + Cloración
Visalia (USA)	Algodón, Maíz	Secundario + Filtr. + Cloración
Monterrey (USA)	Cultivos crudos	Terciario

FUENTE: Sierra, Peñalver y Rambla (6)

2.2.4.2. Reutilización con fines recreativos

- Se aplica a parques urbanos, campos deportivos y otras zonas verdes recreativas.
- Existe un “Modelo de las Normas de Calidad del Estado de California para el riego de zonas verdes urbanas”, con efluentes que han sido sometidos a tratamiento secundario + filtro de arenas + cloración.

Algunas experiencias de reutilización de aguas residuales urbanas con indicación de los tratamientos previos aplicados se recogen en la Tabla 8 para el riego de parques públicos y de otras zonas verdes urbanas, y en la Tabla 9 para el riego de campos deportivos.

Tabla 9. Reutilización de aguas residuales urbanas para riego de parques y zonas verdes urbanas

LOCALIDAD	USO	TRATAMIENTOS
Grau du Roi (Francia)	Césped	Tanques estabilización
México	Parques públicos	Secundario
San Luis Obispo (USA)	Jardines	Decantación + Filtra. +Cloración
Pomona (USA)	Cementerios	Convencional + Cloración
San Francisco (USA)	Parques de recreo	Secundario + Desinfección
Visalia (USA)	Jardines	Secundario + Filtra. + Clorac.
Livermore (USA)	Jardines	Secund. +Coagula+Filtra+De sinf.
Emiratos Arabes	Parques públicos	Terciario
Omán	Zonas verdes	Terciario
Arabia Saudita	Zonas verdes	Terciario
Irvine (USA)	Jardines	Terciario

FUENTE: Sierra, Peñalver y Rambla (6)

Tabla 10. Reutilización de aguas residuales urbanas para riego de campos deportivos

LOCALIDAD	USO	TRATAMIENTOS
Túnez	Campos de golf	Lodos activos
Lubbock (USA)	Lagos de recreo	Lechos bacterianos
San Luis Obispo (USA)	Golf y Lago	Decantación + Filtración + Cloración
Pennsylvania (USA)	Zonas de recreo	Secundario + Desinfección
Mas Nou (España)	Campos de golf	Secundario + Desinfección
Livermore (USA)	Campos de golf	Secund+Coagula. +Filtra. + Desinf.
Omán	Campos de golf	Terciario
Arabia Saudita	Campos de golf	Terciario

FUENTE: Sierra, Peñalver y Rambla (6)

2.2.4.3. Reutilización industrial

- En la industria, la utilización de las aguas residuales es más excepcional.
- Se usan cuando no se disponen de otras fuentes de abastecimiento alternativas.

Sus aplicaciones pueden ser para:

- Refrigeración (Es el más empleado, principalmente en el sector eléctrico, siderurgia, petroquímica, industria automovilística, cementeras, incineración de residuos, plantas nucleares).
- Lavado de materias primas (Incluso instalaciones).
- Sistemas contra incendios.

2.2.4.4. Reutilización en acuicultura

La mineralización de la materia orgánica vertida en el agua suministra gran cantidad de nutrientes, que favorecen, en una primera fase, un gran desarrollo de las algas; a partir de este momento, y gracias a la fotosíntesis y al consiguiente aporte de oxígeno, se desarrollan otros grupos de organismos (macrófitos acuáticos, zooplancton y la ictiofauna). Por tanto, hay transformación de Materia Orgánica en Biomasa:

- Algas (pienso, abono y fuente de combustible)
- Plantas acuáticas superiores (carrizos, jacintos de agua, espinaca de agua, castaña de agua, abrojo de agua y el loto)
- Zooplancton (alimento para piscicultura y acuarios; ciliados, rotíferos, copépodos y dafnias)
- Crustáceos (camarones, cangrejos, ostras)

- Peces (Tabla 10) (harina de pienso; carpas, tencas, barbos; salmónidos, doradas y lubinas)

Tabla 11. Reutilización de aguas residuales urbanas para riego de campos deportivos

LOCALIDAD	ESPECIES	TRATAMIENTOS
Calcuta (India)	Carpas, Tilapias	Efluentes brutos
Cikoneng (Indonesia)	Carpas, Tilapias	Brutos + Río + Excretas humanas
Munich (Alemania)	Carpas	Aireadas + Agua de río
Michigan (USA)	Algas, Macrófitas	Secundario

FUENTE: OMS (7)

2.2.5. Métodos electroquímicos de tratamiento de aguas residuales

La búsqueda de nuevas estrategias para contrarrestar la contaminación ambiental ha llevado a los especialistas tener en cuenta métodos electroquímicos para alterar y trasladar los contaminantes de efluentes.

Los métodos electroquímicos de tratamiento de aguas residuales como la electroflotación, electrodecantación y la electrocoagulación (8), implica usar un par de electrodo metálicos y una celda electrolítica para hacer circular una corriente eléctrica. (9) Aquellos sistemas electroquímicos pequeños son confiables y emplea electrones para ejecutar el tratamiento, utilizando instrumentación sofisticada, compacta y sencilla de obtener, resultando de probabilidad de una cómoda división y con el tiempo puedan reemplazar a procesos refinados, ya que requiere contenedores de poca capacidad. Cabe señalar que los beneficios de compatibilidad, ambientales, seguridad, facilidad de automatización de procesos y menores costos son una gran ventaja. Estos

métodos han sido examinados por contados autores enfocándose en las variables que pueden alterar el mejoramiento del desempeño de estas aplicaciones. (10) La electrocoagulación es un método de tratamiento de agua residual con contenidos variados (tintes textiles, metales pesados, nitratos, arsénico, etc.) del cual se tiene mayor interés en emplear.

Además, hace posible potabilizar agua. (10)

2.2.5.1. Fundamentos de la Electrocoagulación

Método en el que se ejecuta la coagulación. (11)

Es un proceso complejo que involucra fenómenos físicos y mecanismos químicos que traen consigo electrodos consumibles para reemplazar iones en aguas residuales implicando tres etapas consecutivas.

- Formación de los coagulantes por oxidación electrolítica del electrodo de sacrificio.
- Perturbación de partículas suspendidas, contaminantes, y rompimiento de la emulsión.
- Incorporación de las fases perturbadoras para formar flocs. (10)

El mecanismo de perturbación de partículas suspendidas, contaminantes, y del rompimiento de emulsión se describe como:

- ✓ Concentración de la doble capa difusiva alrededor de las especies cargadas por la correlación de los iones generados por la oxidación del ánodo de sacrificio.
- ✓ Neutralización de las cargas de las especies iónicas existentes en el agua residual originada por lo iones coagulantes producidos por disolución

electroquímica del ánodo de sacrificio. Estos minimizan la repulsión electrostática entre partículas lo que conlleva la coagulación para resultar en una carga neta igual a cero.

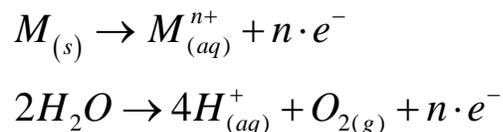
- ✓ Los flocs originados de la coagulación trazan una capa de lodos que atrapa y dirige las partículas coloidales que permanecen en el edio acuoso. (10)

Las siguientes reacciones fisicoquímicas tienen lugar en una celda de electrocoagulación (10):

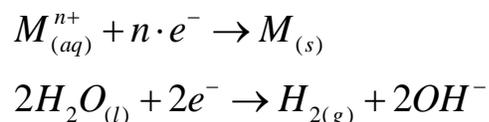
- Disminución catódica de las impurezas presentes en el agua residual.
- Descarga y coagulación de las partículas coloidales.
- Migración electroforética de iones en solución.
- Electroflotación de las partículas coaguladas ocasionada por las burbujas de hidrógeno y oxígeno producidas por los electrodos.
- Rebaja de los iones metálicos en el cátodo.
- Otros procesos electroquímicos y químicos.

El ánodo se oxida mientras el cátodo se reduce cuando un potencial es aplicado por una fuente de energía externa. La reacción electroquímica con el metal (M) como ánodo se puede resumir como se muestra a continuación: (10)

En el ánodo:



En el cátodo:



En el ánodo metálico, fabricado habitualmente de hierro o aluminio, se llevan a cabo dos reacciones de separación. En primera instancia el ánodo se diluye y elabora de forma consecutiva hidróxidos poliméricos metálicos que son eficaces agentes coagulantes. La coagulación sucede cuando los cationes combinados con las partículas negativas son transportados cerca del ánodo por movimiento electroforético.

También se origina una reacción paralela denominada electrolisis resultando en burbujas pequeñas de oxígeno en el ánodo e hidrogeno en el cátodo. Estas captan las partículas floculadas y las hace flotar hasta la superficie, es por ello por lo que el proceso de electrocoagulación está asociado de manera intrínseca a la electroflotación. Los contaminantes presentes en aguas residuales son tratados por adición física y por reacción química hasta obtener la erosión del electrodo, para ser trasladado más adelante por electroflotación o por sedimentación y filtración. El triunfo de un proceso de electrocoagulación está delimitado por el tamaño de burbuja y la mezcla adecuada de éstas con el agua residual. Las pequeñas burbujas abastecen mayor área superficial para que las partículas se adhieran en el lodo acuoso, dando como resultado así una separación eficiente. (10)

En un proceso de electrocoagulación el electrodo es usualmente conectado a una fuente de corriente directa. La cantidad de metal disuelto o depositado depende de la cantidad de electricidad que pase a través de la solución electrolítica. Una relación simple entre la densidad de corriente y la cantidad de sustancia disuelta se puede derivar de la ley de Faraday:

$$w = \frac{i \cdot t \cdot M}{n \cdot F}$$

Donde:

w = Cantidad de material de electrodo disuelto (gr de Metal cm^{-2}).

I = Densidad de corriente (A cm^{-2}).

T = Tiempo (s).

M : Peso molecular del electrodo concerniente.

N = Número de electrones en la reacción de óxido reducción.

F = Constante de Faraday ($96,500 \text{ C mol}^{-1}$). (10)

Se espera que la cantidad calculada de material disuelto concuerde con los resultados experimentales. Se puede introducir un error significativo en este cálculo si no se tiene en cuenta la geometría del electrodo y las condiciones óptimas de operación del electrocoagulador. (10)

2.2.5.2. Potencial en una celda de electrocoagulación

El potencial medido es la suma de tres componentes:

$$\eta_{AP} = \eta_K + \eta_{Mf} + \eta_{IR}$$

Donde:

η_{AP} : Sobrepotencial aplicado (V).

η_K : Sobrepotencial cinético (V).

η_{Mf} : Sobrepotencial de concentración (V).

η_{IR} : Sobrepotencial causado por la resistencia de la solución (V).

El sobrepotencial causado por la resistencia de la solución está relacionado con la distancia entre los electrodos (d en cm.), el área superficial del cátodo (A en m^2), la conductividad específica de la solución (k en $mS\ m^{-1}$) y la corriente (I en A), por medio de la siguiente ecuación:

$$\eta_{IR} = \frac{I \cdot d}{A \cdot k}$$

Este sobrepotencial puede ser fácilmente minimizado decreciendo la distancia entre electrodos e incrementando el área de sección transversal de los electrodos y la conductividad específica de la solución.

El sobrepotencial de concentración también conocido como sobrepotencial de difusión o de transferencia de masa, es causado por la diferencia de concentración de las especies electroactivas entre la solución y la superficie del electrodo debido a la reacción del electrodo. El sobrepotencial de concentración es despreciable cuando la constante de velocidad de reacción es mucho menor que el coeficiente de transferencia de masa. El sobrepotencial de transporte de masa puede ser reducido incrementando el flujo de los iones metálicos transportados desde la superficie del ánodo hasta la solución aumentando la turbulencia de la solución. (10)

El sobrepotencial cinético también llamado potencial de activación es causado por la barrera de la energía de activación a las reacciones de transferencia de electrones. El sobrepotencial de activación es particularmente alto por la generación de gases en los electrodos. Ambos, el sobrepotencial cinético y de concentración, incrementan al aumentar la corriente. De cualquier manera, el

efecto de estos cambios debe ser investigado para tipos específicos de especies químicas y físicas en soluciones acuosas. (10)

2.2.5.3. Tipos de reactores para electrocoagulación

Se pueden clasificar como muestra en la Figura 4.

La mayor cantidad de aplicaciones de la electrocoagulación son en continuo y trabajan en condiciones de estado estable o pseudo estable. La aplicación de la electrocoagulación en batch opera típicamente con un volumen constante de agua por ciclo de tratamiento y tiene una desventaja frente a los reactores en continuo desde el punto de vista de operación y diseño, ya que las condiciones dentro del tanque cambian con el tiempo, es decir, tiene un comportamiento dinámico. Una diferencia importante entre los reactores se debe a si en el reactor se lleva a cabo o no el proceso de flotación. (11)

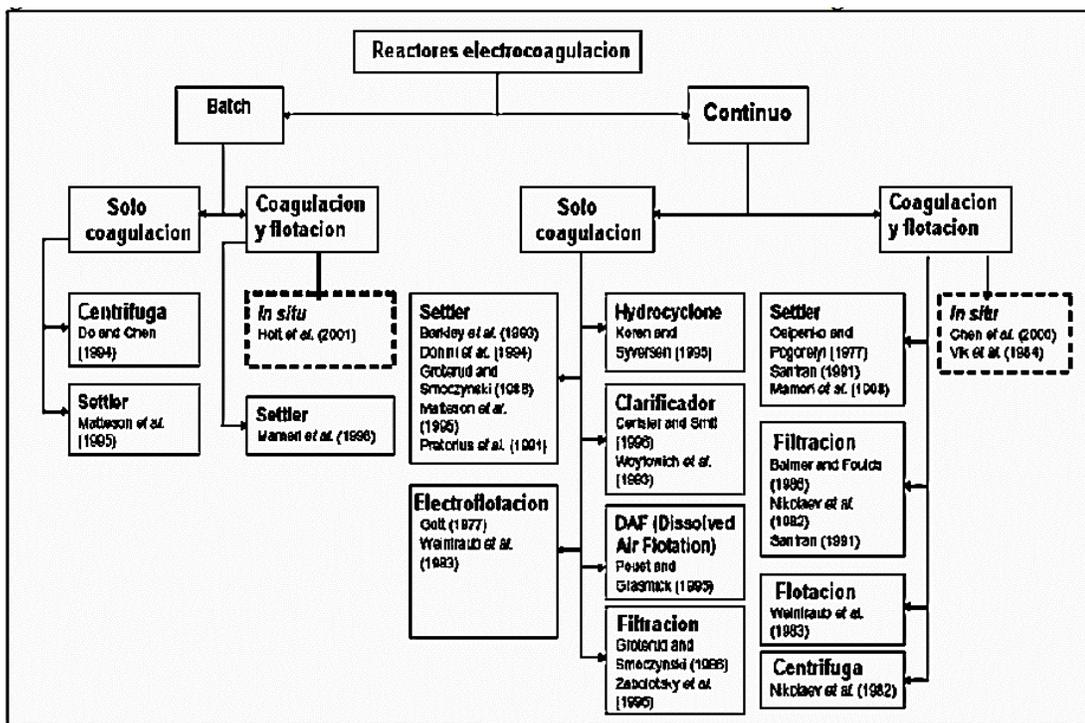


Figura 4. Clasificación de sistemas de reactores de electrocoagulación (11)

2.2.5.4. Ventajas y desventajas del proceso de electrocoagulación

Técnica eficaz cuya relación efectividad/ costo es buena. Debemos señalar también que como no se usan productos químicos en este proceso no resulta en contaminación secundaria. Con esta técnica se removerán aquellas partículas coloidales pequeñas de manera competente en comparación con otras técnicas convencionales (10)

Podemos señalar algunas ventajas de este proceso enlistado en la tabla 11

Tabla 11. Ventajas de proceso de electrocoagulación (9)

<p>1) Las burbujas producidas durante la electrocoagulación tienen mayor estabilidad que las generadas en los tratamientos de efluentes con flotación de aire comprimido y de flujo de aire disuelto, por lo que conservan su gran superficie de contacto y por tanto, aumenta la eficiencia de la remoción.</p>	<p>5) Sus costos de operación son relativamente bajos si se realiza un apropiado diseño del reactor, selección de los materiales para electrodos, y una optimización de los parámetros de funcionamiento. Éste proceso requiere poca corriente eléctrica y bajos costos de mantenimiento.</p>
<p>2) Éste tratamiento electroquímico provoca una mejor y rápida ruptura de las emulsiones, comparado con los equipos convencionales para separación de aceites.</p>	<p>6) El material separado por electrocoagulación puede ser reprocesado como subproducto lo cual permite que el efluente tratado pueda ser reutilizado.</p>
<p>3) La cantidad de lodos generados son menores que para otros métodos tradicionales, ya que se efectúa de manera simultánea flotación y coagulación.</p>	<p>7) Los equipos para electrocoagulación son compactos y fáciles de instalar, factores que son muy apreciables cuando no se dispone de espacio suficiente.</p>
<p>4) Permite la reducción de una amplia variedad de contaminantes, como: metales pesados, grasas y aceites, materia orgánica, fosfatos y cianuros.</p>	<p>8) Este proceso es sencillo de automatizar debido a que el control de dosificación se realiza mediante el ajuste de corriente.</p>

Una de las desventajas de la electrocoagulación se encuentra requerimientos como el reemplazo periódico del electrodo de sacrificio, y que el agua tenga una conductividad mínima que varía según el diseño del reactor lo que limita su uso en aguas con baja cantidad de sólidos disueltos. En el caso de la remoción de componentes orgánicos se pueden formar compuestos orgánicos tóxicos al emplear el método de electrocoagulación. También como una desventaja se encuentra la formación de una película de óxido impermeable en el cátodo que interfiere con el buen desempeño de la celda, este efecto se puede disminuir cambiando la polaridad de la celda. Los costos de operación de la celda de electrocoagulación pueden ser altos donde los costos de la electricidad sean altos. (10)

Este sistema para el tratamiento de efluentes líquidos tiene una gran desventaja con respecto a otros tratamientos convencionales, ya que no tiene ninguna incidencia en la remoción de la DBO ocasionada por los compuestos orgánicos solubles y solamente remueve un porcentaje de la DBO asociada con los sólidos suspendidos. Por lo tanto, si el objetivo del tratamiento es remover los compuestos orgánicos que ejercen una demanda bioquímica del oxígeno disuelto en las corrientes receptoras, el proceso de electrocoagulación resulta ser inadecuado. (12) Además cuando la concentración de los metales en el efluente a tratar es baja, el tratamiento de electrocoagulación resulta ser inadecuado, sin embargo, a concentraciones altas se logran importantes remociones. (9)

La literatura demuestra que no hay un diseño que predomine hasta ahora, además las publicaciones realizadas se basan en operaciones en batch, cabe

resaltar la poca asesoría para realizar diseños preliminares, pero teniendo en cuenta que el éxito depende de los electrodos y el arreglo empleado, y varía de acuerdo al tipo de material y geometría de los electrodos. (11)

Tabla 12. Soluciones a las dificultades operativas de un sistema de electrocoagulación. (9)

Dificultad operativa	Solución
1) El mayor problema operativo proviene de la inutilización de los ánodos. Esto sucede, porque los hidróxidos insolubles pueden aglomerarse en la superficie del ánodo impidiendo el proceso de electrodisolución.	Para evitar éste problema se pueden utilizar electrodos móviles o sistemas de generación de turbulencia (agitadores mecánicos, difusores de gas, etc.) o cambiar su polaridad, periódicamente y de esta forma el hidrógeno desprendido favorece la separación de las capas adheridas a los electrodos.
2) Los principales problemas de esta tecnología aparecen si la concentración del ión a eliminar en el agua residual es baja, ya que aparecen limitaciones en el transporte de materia y disminuye la eficacia del proceso ya que los procesos electroquímicos depende de la conductividad del residuo líquido en que se realizan.	Cuando las aguas residuales no tienen suficiente concentración de sales, es necesario añadirlas ya que originan burbujas de gas de menores tamaños y también incrementan la conductividad del agua residual que se traduce en bajos consumos de energía y contribuye a un mejor rendimiento de los electrodos.

2.2.5.5. Aplicaciones de la electrocoagulación

Tiene una larga historia como tecnología de tratamiento de aguas, se menciona también que fue descubierta en los últimos cien años aproximadamente. En estos tiempos se ha renovado un interés por las plantas de tratamiento continuo de aguas para aplicaciones industriales, teniendo como base la tecnología de electrocoagulación por su efectividad para la remoción de altos niveles de contaminantes, su bajo costo y su simplicidad de diseño y operación. (11)

Hasta ahora las aplicaciones y estudios declarados en artículos sobre la electrocoagulación se ubican en un solo contaminante y la viabilidad de esta.

(11) Es un método efectivo para desestabilizar partículas finas separadas en aguas, para tratar los compuestos orgánicos complejos existentes en el agua, aquellos que se oxidan en el ánodo y se dividen en sustancias simples y no tóxicas. (13) Debemos añadir la aplicación exitosa para tratar agua potable, aguas residuales de procesadores de alimentos, industria cervecera, urbanas, de restaurante, industria textil, además de aguas que contienen arsénico, iones fluoruro, surfactantes, metales pesados, aceites, tintes textiles desechos poliméricos, partículas suspendidas, suspensiones acuosas de partículas ultrafinas, nitrato, residuos fenólicos, fósforo, flúor, etc. (14)

La optimización de esta técnica es un proceso empírico, comprende procesos químicos y físicos complejos que contiene fenómenos de interfase y de superficie. Por motivo que sus fenómenos no son totalmente entendidos, el diseño de los reactores se va prohibiendo para obtener un resultado óptimo de estos, pero limitado (10)

Pero se reportan algunos efectos de los factores controlables y variables, siendo estos resultados en el proceso de electrocoagulación que deben tenerse en cuenta a la hora de realizar un el diseño de equipos o para la operación de estos.

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Tratamiento de aguas

Consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que buscan eliminar los contaminantes existentes en el agua efluente del uso doméstico.

(18)

La solución más extensa para el control de la contaminación causada por aguas residuales es tratarlas en plantas donde se realiza la mayor parte del proceso de separación de estos contaminantes, teniendo como cuerpo receptor a la naturaleza. Por lo cual, el nivel del tratamiento necesario en esta función es la de auto purificación natural, principalmente del caudal del cuerpo receptor, de su contenido en oxígeno, y de su "habilidad" para reoxigenarse. Por lo tanto, elaborar efluente reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o fango (también llamado biosólido o lodo) ventajoso para su distribución o reutilización es el principal objetivo del tratamiento de las aguas residuales. (18)

Las aguas residuales generadas en residencias, instituciones y locales comerciales e industriales pueden ser tratadas en su sitio de origen o pueden ser almacenadas y llevadas por una red de tuberías a una planta de tratamiento municipal. Usualmente las aguas residuales de las redes domésticas están sujetas a regulaciones y normas. A menudo ciertos contaminantes de origen industrial presentes en las aguas residuales requieren procesos de tratamiento especializado. (18)

Para el tratamiento de aguas residuales inicia en la separación física de sólidos grandes como basura se utiliza el sistema de rejillas, aunque pueden ser triturados para posteriormente separar sólidos densos como la arena, seguido de una sedimentación primaria que separe el resto de sólidos suspendidos.

Para suprimir metales disueltos como el plomo y principalmente el fósforo se emplean reacciones de precipitación. Posteriormente, continúa la conversión progresiva de la materia biológica disuelta en una masa biológica sólida usando bacterias adecuadas, usualmente existente en estas aguas. Cuando la masa biológica es removida o separada por un proceso denominado sedimentación secundaria, el agua tratada resultante puede percibir procesos adicionales denominados tratamiento terciario como filtración, desinfección, etc. El efluente final puede ser liberado o reintroducido nuevamente en una masa de agua natural. Los sólidos biológicos segregados experimentan un tratamiento y neutralización adicional antes de la descarga o reutilización apropiada. (18)

2.3.2. Electrocoagulación

Es un proceso que emplea la electricidad para suprimir contaminantes suspendidos, disueltos o emulsificados en el agua. La técnica consiste en incitar corriente eléctrica en las aguas residuales por medio de placas metálicas paralelas de diversos materiales, como el hierro y el aluminio. La corriente eléctrica provee la fuerza automotriz que origina las reacciones químicas que perturba las formas de los contaminantes suspendidos o emulsificados. De esta manera los contaminantes presentes en el medio acuoso, elaborando partículas sólidas que son menos coloidales y solubles que en estado de equilibrio, cuando esto sucede, los contaminantes forman elementos hidrofóbicos que se precipitan para posteriormente flotar, siendo estas removidas únicamente por un método secundario de separación

En este proceso hay un origen de coagulantes in situ por disolución de iones de aluminio o hierros de los electrodos de estos. La generación de iones metálicos da lugar una liberación de burbujas de hidrogeno gaseoso en el ánodo y cátodo. Las que aportan un beneficio a la flotación de las partículas floculadas, las que se retiran posteriormente.

Es utilizada en el removimiento de contaminantes de diferentes aguas residuales allegados de la industria de galvanoplastia, electro – plateado metálico, fábricas de envasados, industria del papel (desperdicios de molinos de papel), peleterías, molinos de acero, efluentes con contenido de cromo, plomo o mercurio y efluentes con contenido de aceites como los generados por talleres de maquinaria, refinerías, talleres de reparación de autos, transporte, almacenamiento y distribución de aceites, fluentes de la industria alimentaria, lavanderías e industria textil, usada para consumo humano y residuales domésticas.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo, nivel y diseño de la investigación

3.1.1. Tipo de investigación

El Tipo de la investigación desarrollada es Aplicada

3.3.2. Nivel de investigación

El nivel de estudio es Descriptiva – Correlacional.

Descriptiva: Se evalúan los parámetros de diseño del proceso de tratamiento de agua por electrocoagulación, tomando en cuenta la conductividad, pH, y temperatura.

Correlacional: Se pretende saber cómo se relacionan estas variables en el proceso de electrocoagulación para tratamiento de aguas.

3.3.3. Diseño

El diseño de la investigación es Experimental.

3.4. Población y muestra de investigación.

3.2.1 Población

La población está constituida por los procesos de tratamiento de aguas.

3.2.2 Muestra

La muestra está conformada por el agua tratada mediante la electrocoagulación.

3.5. Variables e indicadores

3.3.3. Variable independiente

V1 = Evaluación de los parámetros de diseño.

3.3.4. Variable dependiente

V2 = Tratamiento de agua por electrocoagulación.

3.4 Técnicas de recolección de información

Las técnicas que se emplearon son las marchas analíticas para la determinación de los parámetros de diseño del proceso de tratamiento de agua por electrocoagulación.

3.5 Técnicas de procesamiento y análisis de resultados

Las técnicas utilizadas fundamentalmente fueron las técnicas deductivas-inductivas y las heurísticas.

3.6 Métodos y procedimientos

3.6.1. Reactivos

Se utilizaron los siguientes reactivos:

- Ácido sulfúrico 0,02 N
- Nitrato de plata 0,01 N
- Cromato de potasio al 5% p/v
- EDTA disódico 0,01 M

- Buffer pH =10 (Cloruro de amonio – Hidróxido de amonio)
- Hidróxido de sodio
- Carbonato de sodio anhidro
- Cloruro de Sodio q.p.
- Carbonato de calcio q.p.
- Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$
- Hidróxido de sodio 0,05 N
- Indicadores: Fenofaleína, anaranjado de metilo, negro de eriocromo T, calcón carboxílico.

3.6.2. Materiales

- Materiales de vidrio de laboratorio
- pH meter 370 pH
- Conductímetro
- Aparato de prueba de jarras
- Turbidímetro
- Cronómetro
- Digital Multimeter
- Agitador magnético
- Fuente de Corriente DC
- Celda electroquímica

3.6.3. Equipos

- Rectificador de Corriente
- Voltímetro
- Amperímetro
- Celda Electrolytica

Celda de electrocoagulación.

Se diseño tomando en cuenta una distribución volumétrica que contiene tres regiones: una superior para el almacenamiento de los lodos de flotación o lodos menos densos y espumas, denominada zona de flotación, una región media de reacciones electroquímicas, denominada zona de reacción en donde se hallan los electrodos y una región inferior, denominada zona de sedimentación dónde se almacenan los lodos de precipitación o más densos. Esto se puede observar en la Figura 5. (16)

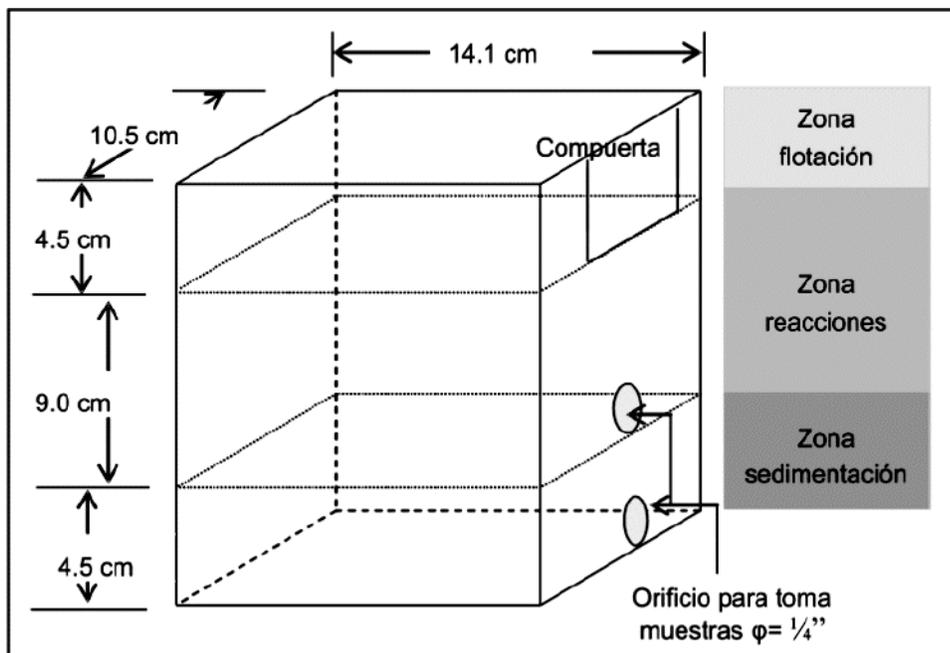


Figura 5. La celda de electrocoagulación (16)

La zona de flotación y la de sedimentación equivalen cada una a $\frac{1}{4}$ del volumen total de la celda (2.7 litros), y la zona de reacción equivale a $\frac{2}{4}$ partes. La celda fue provista de una compuerta para evacuar la espuma producida por las burbujas de hidrógeno generado en las reacciones electrolíticas, además de dos llaves para tomar las muestras a ser analizadas, una de esas llaves está ubicada en la zona de reacciones y la otra en la zona de sedimentación. (16)

En las Figuras 6 y 7 se muestran los detalles de la compuerta para espumas y la ubicación de los orificios para la toma de las muestras.

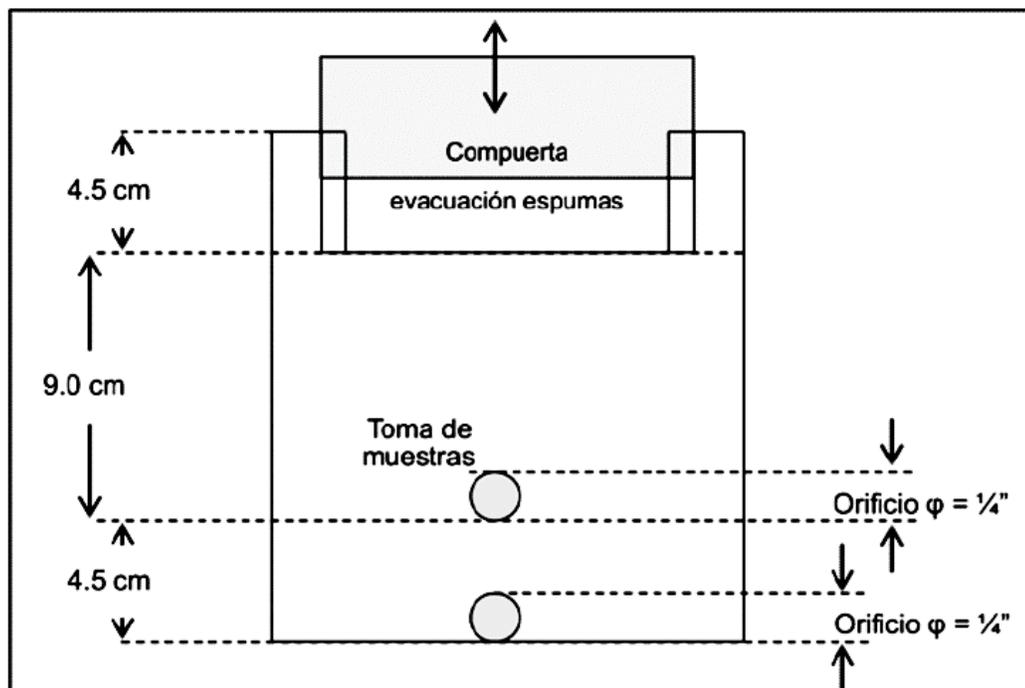


Figura 6. Detalle cara toma de muestras y evacuación de lodos (16).

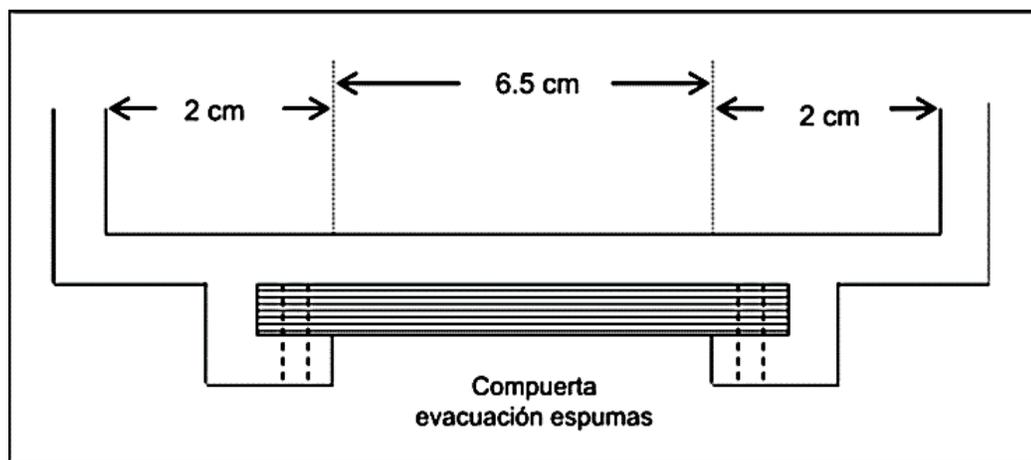


Figura 7. Vista superior del sistema de evacuación de lodos

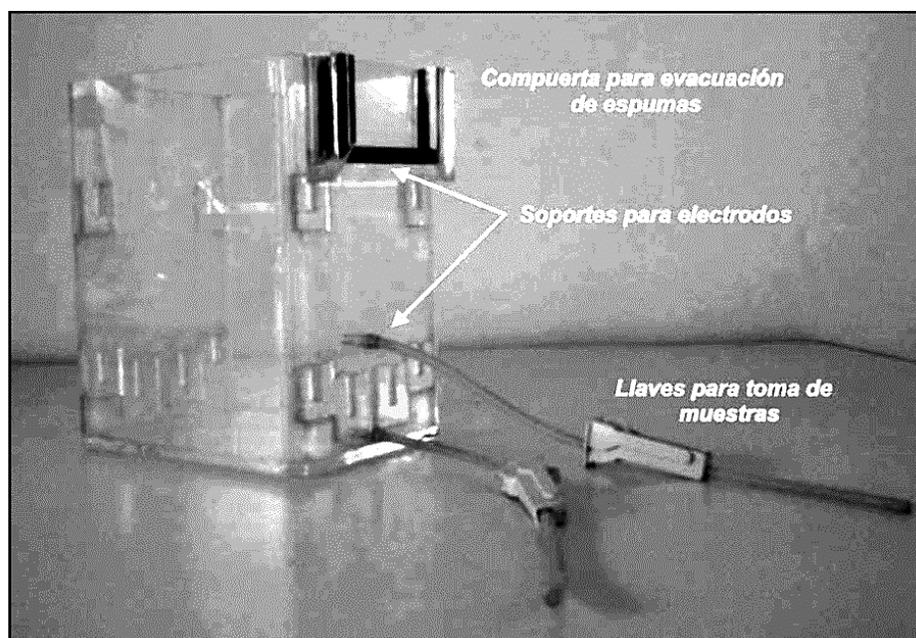


Figura 8. Celda electroquímica (16)

3.6.4. Instalación de equipos

En primer lugar, se encendió el inversor que convierte la corriente alterna a corriente continua, almacenada en las baterías las cuales fueron alimentadas con energía generada por el aerogenerador.

Luego se hizo el acomodamiento de los electrodos en la celda electrolítica de una manera que se encuentren distanciados en paralelo y espaciados a 1 cm de entre las varias combinaciones de electrodos, (Aluminio - Fierro).

Se añadieron 1800 mL de muestra a tratar en la celda.

Por último, se conectaron los electrodos al rectificador ya instalado.

3.6.5. Proceso de electrocoagulación

El agua para tratar se transporta del reactor donde sigue un camino “serpenteante” a través de las placas de acero a las que se les aplica una corriente que provoca que el ánodo genere iones ferrosos en el agua. La polaridad en las placas se invierte periódicamente lo que mantiene limpia la superficie e iguala la velocidad de corrosión.

Al aplicar la corriente, los ánodos se disuelven lentamente generando iones ferrosos en el agua, El hierro ferroso reacciona químicamente con los contaminantes o bien actúa como coagulante, durante la reacción hay una elevación del pH y el hierro se convierte en hidróxido de hierro y otros compuestos, lo que resulta en un efecto de coprecipitación.

Se encendió el rectificador de corriente para realizar el proceso de electrocoagulación, a las condiciones establecidas en el diseño experimental; para la primera combinación de $t = 20$ min y $J = 32.72$ A/m².

Una vez terminado el tiempo establecido (20 min), para la electrocoagulación, se procedió al apagado del equipo.

Se pasó a retirar los electrodos con los que se trabajó, y seguidamente se retiró con ayuda de unas paletas las espumas que se extendieron en toda la superficie.

Una vez retirada la capa de espuma se dejó en reposo 20 min. para que los sólidos suspendidos sedimenten.

Se repitió el proceso para cada una de las 3 combinaciones faltantes.

3.6.6. Metodología para los parámetros fisicoquímicos.

- **Demanda química de oxígeno (DQO).** La muestra de agua se oxida con una solución sulfúrica caliente de dicromato potásico y sulfato de plata como catalizador. Los cloruros son enmascarados con sulfato de mercurio. A continuación, se determina fotométricamente la concentración de los iones $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ amarillos no consumidos.
- **Oxígeno disuelto**, se midió por el procedimiento de luminiscencia para oxígeno disuelto en soluciones acuosas. Utilizando un sensor LANGE LDOTM/sc 100.
- **Fósforo total**, En solución sulfúrica los iones de ortofosfato forman con los iones molibdato ácido molibdenofosfórico, y éste último con ácido ascórbico se reduce al azul de fosfomolibdeno que se determina fotométricamente.
- **Sulfatos**, los iones sulfato forman con los iones de bario sulfato bórico difícilmente soluble. La turbidez que así se produce se mide en el fotómetro.

- Sólidos en suspensión. Los sólidos en suspensión se determinan por filtración a través de una membrana de 0,45 μ m, y posterior medición gravimétrica del residuo después de secarlo a 103 – 105 °C durante 60 minutos.
- Alcalinidad, se determinó mediante titulación, de acuerdo con el Standard Methods.
- Dureza, se determinó mediante titulación con EDTA, de acuerdo con el Standard Methods.
- Turbidez. Se determina por nefelometría midiendo la relación entre la luz incidente sobre la muestra y la dispersada a un ángulo de 90° con respecto a ésta.
- pH. Se basa en medir el potencial eléctrico creado en la membrana de un electrodo de vidrio, el cual es función de la actividad de los iones hidrógeno a ambos lados de la membrana.
- Conductividad. La determinación de la conductividad se realiza mediante un equipo llamado conductímetro, que tiene una fuente de corriente alterna, un puente de Wheatstone y una célula de conductividad. Además, el equipo suele disponer de una sonda de temperatura que permite la compensación automática.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados, análisis y discusión

4.1.1. Eliminación de nitratos y sulfatos

Se presenta los resultados en la siguiente tabla.

N° 1	N° 2	N° 3	N° 4
Voltaje V 12	Voltaje V 12	Voltaje V 36	Voltaje V 3
I/S A/m² 42	I/S A/m² 35	I/S A/m² 31	I/S A/m² 1
Elevación de la temperatura en 0,8°C, 0,13°C/m	Efecto reductos de nitratos poco significativo	Efecto reductos de nitratos en un 67%	Efecto reductos de nitratos poco significativo
Sin efecto apreciable sobre sulfatos y nitratos	Efecto reductor de sulfatos en un 10%	Efecto reductor de sulfatos en un 53%	Efecto reductor de sulfatos en un 11%
Alcalinización, pasa el pH de 6,9 a 8,88	Elevación de la temperatura en 0,9°C, 0,18°C/m	Elevación de la temperatura en 9,4°C, 1,53°C/m	Elevación de la temperatura en 0,2°C, 0,03°C/m
Descenso de la conductividad	Alcalinización, pasa el pH de 6,78 a 8,44	Alcalinización, pasa el pH de 6,15 a 10,47	Acidificación, pasa el pH de 6,42 a 5,81
	Descenso de la conductividad en un 12%	Descenso de la conductividad en un 24%	Descenso de la conductividad en un 17%

Tabla 13. Prueba de eliminación de nitratos y sulfatos

En esta tabla se muestra que la eliminación de nitratos (67%) y sulfatos (53%), es mayor cuando los voltajes e intensidad de corriente son altos, (40 V., 31 A/m²).

También se puede apreciar que a mayor voltaje elevados se eleva la temperatura de forma significativa.

Otra observación es que el pH sufre un incremento apreciable, ocurriendo un efecto contrario cuando el voltaje y la intensidad se mantiene en valores bajos, del orden de 3 V, 1 A/m².

También se observa que la propiedad de conductividad desciende a valores de entre el 12% y el 24%.

4.1.2. Eliminación en fosfatos del fósforo

Con respecto a este ítem, se presentan los resultados consignados en la siguiente tabla

N° 6	N° 7
Voltaje V 35	Voltaje V 12
I/S A/m ² desde 12 hasta 2	I/S A/m ² desde 0,8 hasta 0,0
Reducción de fosfatos del 52%, con casi la misma reducción en el primer minuto, periodo en el que pasan de 12,24 a 6,86 los A/m ² .	Reducción de fosfatos nula.
La temperatura se eleva en 0,5°C, 0,083°C/m.	La temperatura se eleva en 0,1°C, 0,016°C/m
La alcalinización es ligera, pasando el pH de 8,10 a 8,32.	La acidificación es ligera, pasando el pH de 8,20 a 7,99
Sin modificación apreciable en conductividad.	Sin modificación apreciable en conductividad

Tabla 14. Prueba de eliminación de fósforo en fosfatos

En la tabla se puede observar que la eliminación de fósforo en fosfatos es del 52% y se hace más significativa a un voltaje de 35 V y a la intensidad de corriente inferior a 12 A/m².

Se observa que ocurre un apreciable aumento de la temperatura a voltajes elevados.

Por otro lado, se comprueba que el pH aumenta significativamente, ocurriendo el efecto contrario cuando el voltaje y la intensidad de corriente toman valores bajos, para el caso de 12 V, desde 0,8 hasta 0,0 A/m².

4.1.3. Eliminación de sulfatos, nitratos, fósforo, DQO, ionización del Al

Se presentan los siguientes resultados

N° 8	N° 9	N° 10	N° 11	N° 12	N° 13	N° 14
Voltaje V 25	Voltaje V 12	Voltaje V 16	Voltaje V 50	Voltaje V 100	Voltaje V 150	Voltaje V 200
I/S A/m ² 42	I/S A/m ² 19	I/S A/m ² 104	I/S A/m ² 110	I/S A/m ² 165	I/S A/m ² 230	I/S A/m ² 320
Sin reducción de sulfatos	Sin reducción de sulfatos	Sin reducción de sulfatos	Sin reducción de sulfatos			
Reducción poco significativa de nitratos	Reducción poco significativa de nitratos	Reducción poco significativa de nitratos	Reducción poco significativa de nitratos			
Reducción de fosfatos escasamente definida.	Reducción de fosfatos escasamente definida.	La temperatura se eleva en 2,6°C, 0,34°C/m	La temperatura se eleva en 8,3°C, 8,48°C/m	La temperatura se eleva en 7,65°C, 8,40°C/m	La alcalinización ligera.	La alcalinización ligera.
La temperatura se eleva en 1,7°C, 0,28°C/m	La temperatura se eleva en 1,7°C, 0,28°C/m	La alcalinización ligera, pasando el pH de 7,84 a 8,02	La alcalinización ligera, pasando el pH de 7,84 a 8,03	Descenso de la conductividad	Alcalinización, pasa el pH de 6,78 a 8,44	Alcalinización, pasa el pH de 6,15 a 10,47
La alcalinización ligera, pasando el pH de 7,45 a 8,02	La alcalinización ligera, pasando el pH de 7,28 a 7,56	Sin reducción en DQO	Sin reducción en DQO	Reducción en DQO del 35% en 2 minutos	Sin reducción en DQO	Reducción en DQO del 55%
Sin reducción en DQO	Sin reducción en DQO	Con reducción apreciable en conductividad, descenso de un 10%.	Con reducción apreciable en conductividad, descenso de un 10%.	Con reducción apreciable en conductividad, descenso de un 7%.	Sin reducción apreciable en conductividad.	Con reducción apreciable en conductividad, descenso de un 10%.
Con reducción apreciable en conductividad, descenso de un 13%.	Con reducción apreciable en conductividad, descenso de un 10%.	Ligero incremento del aluminio.	Ligero incremento del aluminio.	Ligero incremento del aluminio.	Ligero incremento del aluminio.	Ligero incremento del aluminio.

Tabla 15. Eliminación de sulfatos, nitratos, fósforo, DQO, incremento Al.

En esta tabla se pueden apreciar lo siguiente:

Que la eliminación de sulfatos, nitratos y fosforo es aproximadamente nula, en condiciones de variar el voltaje de 12 a 200 V y la intensidad de corriente entre 19 y 320 A/m².

Que se produce un aumento apreciable de la temperatura a voltajes elevados.

Que a los voltajes de entre 12 y 200 V, y la intensidad de corriente entre 19 y 320 A/m², la alcalinidad sufre una pequeña variación.

Por otro lado, la DQO se reduce entre el 35% y el 55% que corresponde a voltajes de 100 y 200 V, y a intensidades de corriente de 200 y 320 A/m².

Se observa que la conductividad se reduce entre un 7% y un 13%.

Y por último se puede verificar una leve ionización del aluminio.

4.1.4. Eliminación de microorganismos

Con respecto a los microorganismos se han obtenido los resultados mostrados en la siguiente tabla:

N° 10	N° 11	N° 12	N° 13	N° 14
Voltaje V 16	Voltaje V 50	Voltaje V 100	Voltaje V 150	Voltaje V 200
I/S A/m ² 104	I/S A/m ² 110	I/S A/m ² 165	I/S A/m ² 230	I/S A/m ² 320
Reducción en coliformes totales del 57%	Reducción en coliformes totales del 100% en 6 minutos	Reducción en coliformes totales del 82% en 2 minutos	Reducción en coliformes totales del 94% en los primeros 15 segundos, con tendencia a ir aumentando	Reducción en coliformes totales del 72% en 45 seg, siendo el máximo de 86% en 30 segundos.
Reducción de E. Coli del 67%	Reducción de E. Coli del 100%	Reducción de E. Coli del 83%		
	Generación de flotantes importante			

Tabla 16. Eliminación de microorganismos.

Para el tratamiento de aguas forma parte muy importante la eliminación de microorganismos. En este caso se observa que se han eliminado

completamente los coliformes totales y la E.coli, observándose que los valores óptimos se han obtenido a 50 V, y 104 de I/S A/m².

4.1.5. Separación de placas

Se sometió a agua a electrocoagulación con separación entre placas de 10, 8, 6 y 4 cm, consiguiéndose los resultados que a continuación se presentan en las tablas y gráficos siguientes:

Separación de placas de 10 cm			S _{placas} = 0,0625	
V	I	I/m ²	Temp.	Cond.
5	0,030	0,48	14,4	101,0
10	0,092	1,472	14,5	100,6
15	0,148	2,368	14,4	100,1
20	0,210	3,36	14,5	99,9
25	0,275	4,4	14,5	99,6
30	0,340	5,44	14,5	99,2
35	0,401	6,416	14,5	99,0
40	0,475	7,6	14,5	98,7
45	0,531	8,496	14,5	98,2
50	0,597	9,552	14,6	98,1
55	0,659	10,544	14,6	97,6
60	0,722	11,552	14,6	97,5
65	0,789	12,624	14,6	97,1
70	0,855	13,68	14,7	96,8
75	0,925	14,8	14,7	97,1
80	0,988	15,808	14,7	97,0
85	1,111	17,776	14,9	97,6
90	1,188	19,008	15,0	98,1
95	1,260	20,16	15,0	98,0
100	1,336	21,376	15,1	97,1
110	1,475	23,6	15,3	97,3
120	1,611	25,776	15,4	97,0
130	1,752	28,032	15,5	97,0
140	1,899	30,384	15,6	97,3
150	2,040	32,64	15,8	97,7
175	2,409	38,544	15,9	98,6
200	2,765	44,24	16,1	98,8
225	3,140	50,24	16,4	99,4

Tabla 17. Separación de placas de 10 cm.



Figura 9. Gráfico de separación de placas de 10 cm.

Separación de placas de 8 cm			$S_{\text{placas}} = 0,0625$	
V	I	I/m ²	Temp.	Cond.
5	0,052	0,832	18,2	103,7
10	0,150	2,4	18,2	103,5
15	0,200	3,2	18,3	103,3
25	0,378	6,048	18,3	103,1
40	0,626	10,016	18,3	102,7
55	0,872	13,952	18,3	101,1
70	1,123	17,968	18,4	102,2
85	1,388	22,208	18,4	103,1
100	1,632	26,112	18,5	102,5
120	1,983	31,728	18,7	103,5
140	2,323	37,168	18,8	103,7
160	2,676	42,816	19,1	102,8
180	3,035	48,56	19,3	101,2
200	3,403	54,448	19,7	101,7
220	3,773	60,368	20,1	101,6

Tabla 18. Separación de placas de 8 cm.

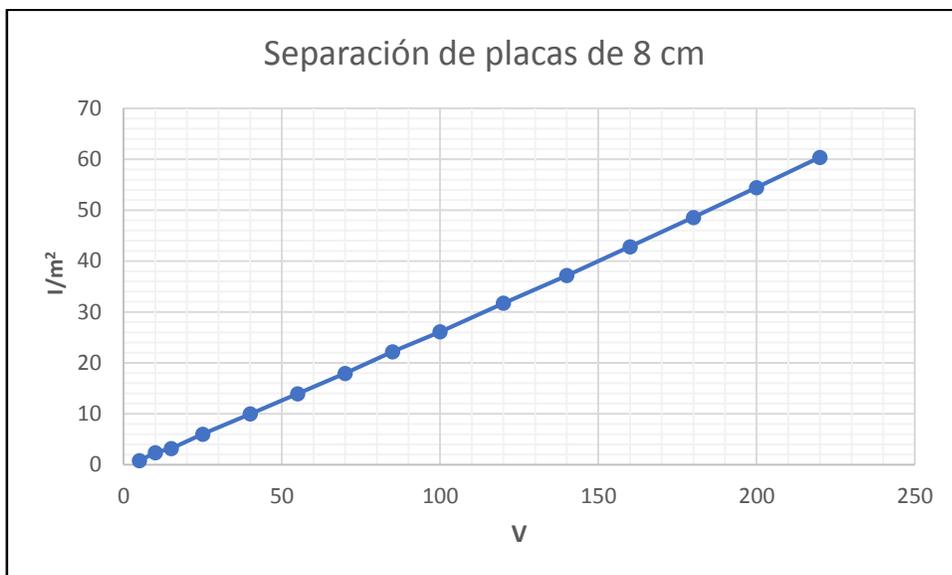


Figura 10. Gráfico de separación de placas de 8 cm.

Separación de placas de 6 cm			$S_{\text{placas}} = 0,0625$	
V	I	I/m ²	Temp.	Cond.
5	0,07	1,12	19,4	102,3
10	0,169	2,704	19,4	100,8
15	0,264	4,224	19,4	99,6
25	0,459	7,344	19,5	98,9
40	0,754	12,064	19,5	98,2
55	1,045	16,72	19,5	97,6
70	1,262	20,192	19,5	98,2
85	1,652	26,432	19,6	98,0
100	1,955	31,28	19,8	97,8
120	2,345	37,52	19,9	98,5
140	2,764	44,224	20,3	97,8
160	3,180	50,88	20,6	97,4
180	3,626	58,016	21,1	97,5
200	4,078	65,248	22,1	99,1

Tabla 19. Separación de placas de 6 cm.



Figura 11. Gráfico de separación de placas de 6 cm.

Separación de placas de 6 cm			$S_{placas} = 0,0625$	
V	I	I/m²	Temp.	Cond.
5	0,156	2,496	21,0	101,7
10	0,554	8,864	21,1	99,8
15	0,821	13,136	21,1	99,1
20	1,174	18,784	22,0	94,1
25	1,467	23,472	21,2	97,7
30	1,727	27,632	22,0	93,6
40	2,396	38,336	21,2	96,9
50	2,934	46,944	22,1	91,8
55	3,315	53,04	21,4	96,5
65	3,872	61,952	21,7	95,6

Tabla 20. Separación de placas de 4 cm.



Figura 12. Gráfico de separación de placas de 4 cm.

Se observa en los gráficos que la densidad de corriente se reduce al agrandar la separación entre placas.

Se puede observar que la densidad de corriente crece al crecer el voltaje, y también crece al reducirse la separación de las placas.

En cada caso al aumentar el voltaje, la conductividad se levemente disminuye.

En todos los casos de separación de placas, se observa que la temperatura aumenta al aumentar el voltaje y también aumenta al reducir la separación de placas.

4.1.6. Influencia de los parámetros pH y conductividad

El parámetro del pH, ejerce un papel preponderante en los procesos de la electrocoagulación. Se ha encontrado que el rango de valores entre los cuales el pH favorece el proceso se encuentra entre 5 – 9. Se ha observado mediante

las pruebas realizadas que el parámetro pH del agua, posterior al tratamiento mediante la electrocoagulación, siempre sufre un ligero aumento. Esto puede ser consecuencia de capacidad tampón de la electrocoagulación, debido a que un equiparamiento, entre la producción y consumo de oxhidrilos (OH^-), que imposibilitan los cambios súbitos del parámetro pH. Esto se observa que ocurre cuando el pH se acerca al valor de 7.

El parámetro de la conductividad eléctrica, que mide en buena cuenta el contenido de iones en una solución, se redujo levemente en todas las pruebas. Con respecto a la temperatura, se observó que sufre un aumento al crecer el voltaje y el tiempo de retención, y de esta manera también aumenta la eficacia de la eliminación de agentes contaminantes. Además, también si aumenta la temperatura, los flóculos adquieren una consistencia más esponjosa, lo que origina un volumen de decantación muy grande aproximadamente a los 30 minutos, obteniéndose una buena clarificación.

CONCLUSIONES

1. La eliminación de nitratos (67%) y sulfatos (53%), es mayor cuando los voltajes e intensidad de corriente son altos, (40 V., 31 A/m²). También se puede apreciar que a mayor voltaje elevados se eleva la temperatura de forma significativa.
2. El pH sufre un incremento apreciable, ocurriendo un efecto contrario cuando el voltaje y la intensidad se mantiene en valores bajos, del orden de 3 V, 1 A/m². También se observa que la propiedad de conductividad desciende a valores de entre el 12% y el 24%.
3. Se puede observar que la eliminación de fosforo en fosfatos es del 52% y se hace más significativa a un voltaje de 35 V y a la intensidad de corriente inferior a 12 A/m².
4. Se observa que ocurre un apreciable aumento de la temperatura a voltajes elevados. Por otro lado, se comprueba que el pH aumenta significativamente, ocurriendo el efecto contrario cuando el voltaje y la intensidad de corriente toman valores bajos, para el caso de 12 V, desde 0,8 hasta 0,0 A/m².
5. Para el tratamiento de aguas forma parte muy importante la eliminación de microorganismos. En este caso se observa que se han eliminado completamente los coliformes totales y la E.coli, observándose que los valores óptimos se han obtenido a 50 V, y 104 de I/S A/m².
6. . El parámetro del pH, ejerce un papel preponderante en los procesos de la electrocoagulación. Se ha encontrado que el rango de valores entre los cuales el pH favorece el proceso se encuentra entre 5 – 9. Se ha observado mediante las pruebas realizadas que el parámetro pH del agua, posterior al tratamiento

mediante la electrocoagulación, siempre sufre un ligero aumento. Esto puede ser consecuencia de capacidad tampón de la electrocoagulación, debido a que un equiparamiento, entre la producción y consumo de oxhidrilos (OH⁻), que imposibilitan los cambios súbitos del parámetro pH. Esto se observa que ocurre cuando el pH se acerca al valor de 7.

7. El parámetro de la conductividad eléctrica, que mide en buena cuenta el contenido de iones en una solución, se redujo levemente en todas las pruebas.
8. Con respecto a la temperatura, se observó que sufre un aumento al crecer el voltaje y el tiempo de retención, y de esta manera también aumenta la eficacia de la eliminación de agentes contaminantes. Además, también si aumenta la temperatura, los flóculos adquieren una consistencia más esponjosa, lo que origina un volumen de decantación muy grande aproximadamente a los 30 minutos, obteniéndose una buena clarificación.

RECOMENDACIONES

Se considera un proceso idóneo, cuando el efluente industrial posee especies cargadas eléctricamente, como sales minerales tipo nitratos, fosfatos, sulfatos, y cloruros, entre otras. Su optimización se consigue mediante el control de las sales incrustantes, utilizando un software que calcula la adición de productos antiincrustantes en tiempo real.

BIBLIOGRAFÍA

1. Cerón García J., Moreno López M. y Olías M. CONTAMINACIÓN Y TRATAMIENTO DE AGUAS - MÓDULO III - MÁSTER UNIVERSITARIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL. 2a Edición, 2005. Universidad de Huelva.
2. Ramalho, R. S. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. Ed. Reverté S. A.
3. Hernández Muñoz, A., Hernández Lehmann, A. y Galán Martínez, P. MANUAL DE DEPURACIÓN URALITA. 3a. Edición. Thomson. Paraninfo. 2004. Madrid.
4. Metcalf & Eddy. Ingeniería de aguas residuales. México, 1996.
5. Ramírez González Luz Angélica. Tesis de Licenciatura. CIDETEQ. 2002.
6. Sierra, J., Peñalver, L., Rambla, A. Ministerio de Fomento. 1989. España.
7. Organización Mundial de la Salud (O.M.S.) Informe Técnico.2010.
8. DANESHVAR, N; DJAFARZADEH, N. and OLADEGARAGOZE, A. Decoloración de soluciones básicas de tinte por electrocoagulación: una investigación del efecto de los parámetros operativ. En: Journal of Hazardous Materials. Vol. 129, No. 1-3 (feb. 2006)
9. MERCADO MARTÍNEZ, Iván Darío. La electrocoagulación, una nueva alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Medellín, 2005. 72 p. Proyecto de grado (Especialista en Ingeniería Ambiental). Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingenierías. Especialización en Ingeniería Ambiental.
10. MOLLAH, Mohammad et al. Fundamentos, perspectivas actuales y futuras de la electrocoagulación. En: Journal of Hazardous Materials. Vol. 114, No. 1-3 (oct. 2004); p. 199-210.

11. BARTON, Geoffrey W.; HOLT, Peter K. and MITCHELL, Cynthia A. El futuro de la electrocoagulación como tecnología de tratamiento de agua localizada. En: Chemosphere. Vol. 59, No. 3 (abr. 2005); p. 355-367.
12. HEUKELEKIAN, H. y HUNTER, Joseph. La composición de las fracciones de aguas residuales domésticas. En: Water Pollution Control Federation. Research Journal. Vol. 37, No. 8 (1965); p. 1142-1163
13. BAKLAN, V. Yu. and KOLESNIKOVA, I. P. Influencia del material del electrodo en la electrocoagulación. En: Journal of Aerosol Science. Vol. 27, Suplemento 1 (sep. 1996).
14. ARISTIZÁBAL A. BERMÚDEZ M. Estudio de la factibilidad de un sistema de electrocoagulación para tratamiento de aguas procedentes de lavanderías industriales con fines de reuso. Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Química. Medellín. 2007.
15. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua (CIDTA) de la Universidad de Salamanca. (2011). Electrodiálisis: aplicaciones del proceso.
16. Arango Ruiz, Alvaro y Garcés Giraldo, Luis Fernando. Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. REVISTA Universidad EAFIT Vol. 43. No. 147. 2007.
17. <https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/984/251%20Tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20industriales.pdf?sequence=1>.
18. https://es.wikipedia.org/wiki/Tratamiento_de_aguas_residuales
19. <https://www.redalyc.org/pdf/695/69520109.pdf>