

**UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS**  
**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**UNIVERSIDAD ALAS  
PERUANAS**

**TESIS**

**RECUPERACIÓN DE FÓSFORO DEL LACTOSUERO  
ÁCIDO RESIDUAL MEDIANTE EL PROCESO DE  
ELECTROCOAGULACIÓN A NIVEL DE LABORATORIO  
DISTRITO DE YANACANCHA - JUNÍN**

PRESENTADO POR LA BACHILLER:

Cinthia CAMARGO MONTES.

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AMBIENTAL  
HUANCAYO-PERÚ

2015

**RECUPERACIÓN DE FÓSFORO DEL LACTOSUERO  
ÁCIDO RESIDUAL MEDIANTE EL PROCESO DE  
ELECTROCOAGULACIÓN A NIVEL DE LABORATORIO  
DISTRITO DE YANACANCHA - JUNÍN**

## DEDICATORIA

### ***A mi padre Camilo.***

*Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.*

### ***A mi madre Flora.***

*Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.*

### ***A mis familiares.***

*A mis hermanos Olinda, Carlos, Vanessa y Hans que nunca titubearon para ayudarme y apoyarme en todo momento.*

*Gracias por darme una carrera para mi futuro, todo esto te lo debo a ustedes.*

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio., además de su infinita bondad y amor.

De manera especial y sincera a mi asesor de tesis Ing. Henry Ochoa León por aceptarme para realizar esta tesis bajo su dirección.

A la universidad Alas Peruanas que me dio la bienvenida al mundo, como tal las oportunidades que me ha brindado son incomparables, y antes de todo esto pensaba que fuera posible algún día si quiera me topara con una de ellas. .

Al Ing. José Valer, coordinador de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Alas Peruanas-Filial Huancayo, por permitirme el uso del laboratorio, por las observaciones y recomendaciones realizadas.

A los miembros del Jurado de esta tesis Mg. Carmencita Lavado y Mg, Orlando Vilca por sus valorables sugerencias y propuestas, que contribuyeron al mejoramiento y ordenamiento del presente trabajo.

A toda mi familia, en especial a mis padres, por ser el pilar central en mi vida, porque sin sus esfuerzos, trabajo y apoyo constate, no lo habría logrado.

A mis hermanos por su tiempo, sus consejos, apoyo incondicional y cariño, los quiero mucho.

Con absoluta sinceridad, mi agradecimiento a todos los que hice mención ya que con su aporte hicieron posible esta presentación.

## INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
INDICE DE CONTENIDOS .....	v
ÍNDICE DE ABREVIATURAS. ....	ix
INDICE DE TABLAS .....	xii
INDICE DE FIGURAS .....	xiii
RESUMEN .....	xv
ABSTRACT .....	xvii
INTRODUCCIÓN .....	xix
CAPÍTULO I .....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Caracterización de la Realidad Problemática .....	1
1.2. Formulación del Problema .....	3
1.2.1. Problema General .....	3
1.2.2. Problemas Específicos .....	3
1.3. Objetivos .....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos .....	3
1.4. Justificación .....	4
1.5. Importancia .....	4
1.6. Limitaciones .....	6
CAPÍTULO II .....	7

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	7
2.1. Marco Referencial .....	7
2.1.1. Antecedentes de la Investigación .....	7
2.1.2. Referencias Históricas.....	11
2.2. Marco Legal .....	12
2.3. Marco Conceptual.....	16
2.4. Marco Teórico.....	20
2.4.1. El Agua.....	20
2.4.2. La Industria Láctea y sus Residuos.....	23
2.4.3. Electroquímica.....	30
2.4.4. Electrocoagulación.....	35
2.4.5. Activación y Estabilización de Electroodos.....	44
2.4.6. Mecanismos y Reacciones del Proceso de EC.....	46
2.4.7. Reacciones Involucradas en la EC.....	47
2.4.8. Reactores para el Proceso de EC.....	49
2.4.9. Características Generales del Fósforo.....	56
CAPÍTULO III .....	61
3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO.....	61
3.1. Metodología.....	61
3.1.1. Diseño, Construcción y Montaje del Sistema de EC Para el Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Láctea.....	61
3.1.2. Pruebas Experimentales .....	69
3.1.3. Tipo de la Investigación.....	73
3.1.4. Nivel de la Investigación.....	73

3.2.	Diseño de la Investigación.....	73
3.3.	Hipótesis de la Investigación.....	74
3.3.1.	Hipótesis General.....	74
3.3.2.	Hipótesis Específicas.....	75
3.4.	Variables.....	75
3.4.1.	Variable Independiente.....	75
3.4.2.	Variable Dependiente.....	75
3.5.	Cobertura del Estudio.....	75
3.5.1.	Universo.....	75
3.5.2.	Población.....	75
3.5.3.	Muestra.....	76
3.5.4.	Muestreo.....	76
3.6.	Técnicas e Instrumentos.....	76
3.6.1.	Técnicas de la Investigación.....	76
3.6.2.	Instrumentos de la Investigación.....	76
3.7.	Procesamiento estadístico de la información.....	76
3.7.1.	Estadísticos.....	76
3.7.2.	Representación.....	77
3.7.3.	Técnica de comprobación de la hipótesis.....	77
CAPITULO IV.....		78
4.	ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	78
4.1.	Resultados.....	78
4.1.1.	Parámetros Evaluados en las Pruebas Experimentales.....	78

4.1.2. Promedios de Resultados Evaluados en las Pruebas Experimentales.....	84
4.2. Discusión de Resultados.....	86
4.3. Contrastación de Hipótesis.....	93
CONCLUSIONES.....	99
RECOMENDACIONES.....	100
BIBLIOGRAFÍA.....	101
ANEXOS.....	106



## ÍNDICE DE ABREVIATURAS.

ANA	: Autoridad Nacional del Agua.
MINAM	: Ministerio del Ambiente.
MINAGRI	: Ministerio de Agricultura.
URSS	: Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas.
ECA	: Estándar de Calidad Ambiental.
LMP	: Límite Máximo Permisible.
DBO5	: Demanda bioquímica de oxígeno total.
DQO	: Demanda química de oxígeno total.
SDT	: Sólidos Disueltos Totales.
SS	: Sólidos Suspendidos.
SST	: Sólidos Suspendidos Totales.
ST	: Sólidos Totales.
$P_{total}$	: Fósforo total presente en un efluente.
Riles	: Residuos industriales líquidos.
EC	: Electrocoagulación.
EF	: Electroflotación.
TRH	: Tiempo de Retención Hidráulico.
ED	: Electrodialisis.
EDI	: Electrodiesionización.
EDR	: Electrodialisis reversa.
V	: Voltaje.
A	: Amperaje.
I	: Intensidad.
$E^{\circ}$	: Potencial normal de reducción de electrodo.
Pz	: Potencia z.
H	: Hora.
cm	: Centímetros.
mm	: Milímetros.

mS	: Milisiemens.
cm <sup>-1</sup>	: Centímetros recíproco.
Ppm	: Partes por millón.
mg/L	: Miligramo por litro.
L	: Litros.
CA	: Corriente alterna.
CD	: Corriente directa.
CE	: Conductividad eléctrica.
Kps	: Constante del producto de solubilidad.
pH	: Potencial hidrógeno.
H <sub>2</sub> O	: Agua.
Fe	: Hierro.
Mn	: Manganeso.
Al	: Aluminio.
RuO <sub>2</sub>	: Óxido de Rutenio.
Ru <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Trióxido de rutenio.
NO <sup>3-</sup>	: Nitratos.
NO <sup>2-</sup>	: Nitritos.
OD	: Oxígeno disuelto.
Ca	: Calcio.
P	: Fósforo.
NH <sub>4</sub> MgPO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O	: Estruvita.
Mg	: Magnesio.
Zn	: Zinc.
Fe	: Hierro.
Cu	: Cobre.
CO <sub>2</sub>	: Dióxido de carbono.
NaCl	: Cloruro de sodio.
CaCl <sub>2</sub>	: Cloruro de calcio.
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	: Bicarbonato.

$\text{SO}_4^{-2}$	: Anión sulfato.
$\text{Ca}^{+2}$	: Ion calcio.
$\text{Mg}^{+2}$	: Ion de magnesio.
$\text{Cl}^-$	: Cloruro.
$\text{Br}^-$	: Bromuro.
$\text{F}^-$	: Fluoruro.
$\text{ClO}_4^-$	: Perclorato.
$\text{OH}^-$	: Hidróxido.
$\text{SO}_4^{2-}$	: Sulfato.
$\text{Al}^{+3}$	: Anión aluminio.
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	: Hidróxido ferroso.
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	: Hidróxido férrico.
$\text{PO}_4^{3-}$	: Fosfatos.
$\mu$	: Conductividad de una disolución.
$\Delta b$	: Distancia entre electrodos, cm, m.
$\eta$	: Sobrepotencial del electrodo.
$\eta_a$	: Sobrepotencial anódico.
$\eta_c$	: Sobrepotencial catódico.
$\mu\text{S/cm}$	: MicroSiemens por centímetro.

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Agua. ....	15
Tabla 2.2. Contaminantes de importancia en el tratamiento de las aguas residuales.....	21
Tabla 2.3. Valores promedios de los residuales acuosos de la industria láctea ...	26
Tabla 2.4. Origen y principales características de los lactosueros de la elaboración de quesos .....	29
Tabla 2.5. Composición promedio de los lactosueros dulces y ácidos derivados de la elaboración de quesos .....	29
Figura 3.1. Lactosuero inicial. ....	70
Figura 3.2. A 1 hora del tratamiento.....	71
Tabla 3.3. Diseño de la Investigación .....	73
Tabla 3.4. Diseño Factorial Codificada y Real .....	74
Tabla 4.1. Resultados de Remoción de Fosfato con pH 8 .....	78
Tabla 4.2. Resultados de Remoción de Fosfato con pH 8 - Replica .....	79
Tabla 4.3. Resultados de Remoción de Fosfato con pH 7 .....	80
Tabla 4.4. Resultados de Remoción de Fosfato con pH 7 - Replica .....	80
Tabla 4.5. Resultados de Remoción de Fosfato con pH 4,5 .....	81
Tabla 4.6. Resultados de Remoción de Fosfato con pH 4,5 - Replica .....	82
Tabla 4.7. Resultados de Remoción de Fosfato con pH 8 y DQO .....	83
Tabla 4.8. Resultados Promedio de Remoción de Fosfato con pH 8 % y de Recuperación.....	84
Tabla 4.9. Resultados Promedio de Remoción de Fosfato con pH 7 % y de Recuperación.....	84
Tabla 4.10. Resultados Promedio de Remoción de Fosfato con pH 4,5 y % de Recuperación.....	85
Tabla 4.11. Características del Lactosuero Acido .....	87
Tabla 4.12. Composición Promedio de los Lactosueros Dulces y Ácidos Derivados de la Elaboración de Quesos .....	87

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Aportaciones de la electroquímica al desarrollo sustentable .....	31
Figura 2.2. Celda galvánica.....	32
Figura 2.3. Celda Electrolítica .....	32
Figura 2.4. Esquema de una celda de electrocoagulación.....	35
Figura 2.5. Sistema de electrocoagulación con ánodo de aluminio y cátodo de hierro.....	36
Figura 2.6. Reactor con Electrodo Monopolares Conectados en Paralelo. ....	51
Figura 2.7. Reactor con Electrodo Monopolares Conectados en Serie.....	52
Figura 2.8. Reactor con Electrodo Bipolares Conectados en Paralelo.....	53
Figura 2.9. Reactores por el tipo de flujo. ....	54
Figura 2.10. Reactores Filtro Prensa .....	54
Figura 2.11. Reactor de electrodo cilíndrico rotativo .....	55
Figura 2.12. Reactor de lecho fluidizado.....	56
Figura 3.1. Dimensiones de la celda para electrocoagulación .....	62
Figura 3.2. Detalle cara toma de muestras y evacuación de lodos.....	63
Figura 3.3. Vista superior del sistema de evacuación de lodos .....	63
Figura 3.4. Celda electroquímica .....	64
Figura 3.5. Electrodo de sacrificio. ....	65
Figura 3.6. Disposición de los electrodo en la celda .....	66
Figura 3.7. Fuente de poder.....	68
Figura 3.8. Cocodrilos.....	68
Figura 3.9. Equipo de electrocoagulación.....	68
Figura 3.10. A 2 horas de tratamiento.....	71
Figura 3.11. Formación de lodos.....	72
Figura 3.12. A 3 horas de tratamiento.....	72
Figura 3.13. Efluente inicial y final.....	72
Figura 4.1. Remoción de Fosforo con pH 8 .....	79
Figura 4.2. Remoción de Fosforo con pH 7. ....	81

Figura 4.3. Remoción de Fósforo con pH 4.5 .....	82
Figura 4.4. Reducción de DQO (mg/L).....	83
Figura 4.5. Variación de Remoción de Fosfato .....	85
Figura 4.6. Porcentaje de Recuperación de Fósforo.....	86
Figura 4.7. Sistema de Electrocoagulación.....	88
Figura 4.8 Variación de la Intensidad de Corriente .....	89
Figura 4.9 fosfato en fase acuosa y floculada .....	90
Figura 4.10 Remoción de fosfato (mg/L).....	91
Figura 4.11 Reducción de DQO (mg/L).....	92
Figura 4.12 % de Recuperación de Fósforo.....	92
Figura 4.13 Tukey Simultaneous 95% CIs .....	95
Figura 4.14 Interval Plot of pH 8; pH 7; pH 4,5. ....	95
Figura 4.15 Tukey Simultaneous 95% CIs .....	97
Figura 4.16 Interval Plot of Tiempo 1 Ho; Tiempo 2 Ho; Tiempo 3 Ho; Tiempo 4 Ho .....	98

## RESUMEN

El lactosuero ácido residual, derivado de la producción de quesos, si no es destinado para otros usos, es vertido, generando una fuerte contaminación ambiental. En la mayoría de los casos, estos efluentes no son tratados y simplemente son lanzados a ríos o suelos, donde se contribuye a la eutrofización por los altos contenidos de nitrógeno y fósforo. Éste fue tomado del distrito de Yanacancha, provincia Chupaca, departamento Junín.

El fósforo es un recurso no renovable que constituye un macronutriente para el desarrollo de la vida y la producción agrícola y para el cual la naturaleza no cuenta con ningún elemento sustitutivo (USGS, 2005). Según el estudio elaborado por EcoSanRes (2005), el consumo anual de  $P_2O_5$  en el año 2050 será de 70 millones de toneladas, esta cifra implica que con este consumo, en unos 60–70 años la mitad de las reservas actuales de fósforo económicamente viables se habrán consumido. Estimaciones realizadas por otros autores (Steen, 1998; Florida Institute of Phosphate Research, 1999; Jasinki y col., 1999) muestran predicciones similares.

El objetivo de la investigación fue principalmente determinar la recuperación de fósforo mediante el proceso de electrocoagulación del lactosuero ácido residual.

El método usado fue la electrocoagulación utilizando electrodos de aluminio y hierro en una celda tipo batch de 1.5 litros de capacidad.

Se caracterizó el lactosuero ácido residual del distrito de Yanacancha obteniendo los siguientes resultados: cantidad de fósforo inicial que posee el lactosuero ácido residual es de 242,26 mg/L, pH 4,5, sólidos totales 6452,26 mg/L, calcio 147,1 mg/L, cloruros 92,4 mg/L y DQO 824,5 mg/L.

En el proceso de electrocoagulación se monitoreo la intensidad de corriente para cada prueba experimental.

Las pruebas realizadas en laboratorio nos permiten concluir que las mejores condiciones para obtener una alta eficiencia de recuperación de fósforo, en función del tiempo y en las diferentes soluciones de pH se realiza en las tres

primeras horas luego se mantiene constante, obteniendo así un 83,3% de recuperación de fosfato en 3 horas y un 84,24 % en 4 Horas.

El resultado de la EC permitió la remoción del fósforo en un 84%, pasando de la fase acuosa a la fase floculada y de esta manera puede ser recuperado por precipitación en forma de estruvita y ser utilizado como fertilizante, mientras que de la fase acuosa el 16% puede permanecer en el agua y dichas aguas, ya reducidas en DQO, puedan ser empleadas directamente para riego agrícola (agua enriquecida en este nutriente P).

**Palabras clave:** Fósforo, electrocoagulación, lactosuero.



## ABSTRACT

Residual acid whey, derived from the production of cheese, if it is not intended for other uses, is poured, generating a heavy environmental pollution. In the majority of cases, these effluents are untreated and are simply thrown into rivers or soils, where it contributes to eutrophication by the high content of nitrogen and phosphorus. This was taken from the District of Yanacancha, Chupaca province, Junín Department.

Phosphorus is a non-renewable resource that constitutes a macronutrient for the development of life and agricultural production and for which nature does not have any replacement element (USGS, 2005). According to the study prepared by EcoSanRes (2005), the annual consumption of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in 2050 will be 70 million tonnes, this figure implies that with this consumption, in about 60-70 years half of the current phosphorus reserves economically viable is there will be consumed. Estimates made by other authors (Steen, 1998;) Florida Institute of Phosphate Research, 1999; Jasinki et al., 1999) show similar predictions.

The objective of the research was mainly to determine the recovery of phosphorus by the process of electrocoagulation of residual acid whey. The method used was electrocoagulation using aluminum or metal electrodes in a cell type batch of 1.5 litres capacity.

Residual acid whey of the District of Yanacancha obtaining the following results are characterized: amount of initial match which has residual acid whey is 242,26 mg/l, pH 4.5, 6452,26 total solid mg/L, calcium 147.1 mg/L, chloride 92.4 mg/L and cod EUR824.5 mg/L.

In the process of electrocoagulation is monitoring current for each experimental proof. Tests conducted in laboratory allow us to conclude that the best conditions to obtain a high recovery efficiency of phosphorus, in function of time and the different solutions of pH is in the three hours then stays constant, thus obtaining a 83.3% recovery of phosphate in 3 hours and 84,24% in 4 hours.

The result of the EC allowed the removal of phosphorus by 84%, passing from the aqueous stream phase and thus phase it can be recovered by precipitation in the form of struvite and be used as fertilizer, while that of the aqueous phase 16% can remain in the water and these waters, already reduced in cod, can be directly used for agricultural irrigation (water rich in this nutrient P).

**Key words:** phosphorus, electrocoagulation, whey.

## INTRODUCCIÓN

La industria láctea, genera de 0.2 a 10 L de agua por cada litro de leche tratada, sin tomar en cuenta la gran cantidad de lactosuero o suero lácteo, derivado de la producción de quesos (9 L/Kg de queso), ya que si no es destinado para otros usos, es vertido, generando una fuerte contaminación, debido a la elevada cantidad de materia orgánica, nitrógeno y fósforo. En la mayoría de los casos, estos efluentes no son tratados y simplemente son lanzados a ríos o suelos, donde se contribuye a la eutrofización por los altos contenidos de nitrógeno y fósforo. Tratar los efluentes derivados de la industria láctea es de gran importancia, no sólo para el ambiente, sino también para el aprovechamiento del recurso hídrico; ya que puede reciclarse y utilizarse como riego agrícola o para otros procesos industriales y en el mejor de los casos para la extracción o recuperación de fósforo.

El objetivo del presente proyecto de investigación es determinar la recuperación de fósforo mediante el proceso de electrocoagulación del lactosuero ácido residual del distrito de Yanacancha - Junín. Así como se propone determinar la influencia del pH, intensidad de la corriente y el tiempo de tratamiento del lactosuero ácido residual en el proceso de electrocoagulación y así calcular la eficiencia de la recuperación de fósforo.

En la actualidad, existen diversos métodos fisicoquímicos y biológicos que pueden utilizarse para el tratamiento de estos efluentes, sin embargo presentan ciertas desventajas como es el costo de reactivos, bajos porcentajes de remoción, grandes volúmenes de producción de lodos, en la coagulación química por ejemplo se puede inducir a una contaminación secundaria por el uso de diversas sales o en los biológicos, no se logra la eliminación total de nitrógeno y fósforo.

La electrocoagulación es un proceso electrolítico que ha sido ampliamente utilizado en el tratamiento de diversas aguas residuales: galvanoplastia, textil, rastros, con buenas eficiencias de remoción de carga orgánica, metales, etc. El

proceso de electrocoagulación (EC) puede ser una alternativa viable que permita reducir el contenido de fósforo y remover la carga orgánica.

Este proceso es muy conocido en el mundo pero poco utilizado en nuestro país y en nuestra región por tal razón el motivo de este trabajo de investigación para recuperar fósforo del lactosuero ácido residual mediante el proceso de electrocoagulación a nivel de laboratorio del distrito de Yanacancha de la provincia de Chupaca, siendo una tecnología limpia, sostenible y responsable para mantener el equilibrio del medio ambiente, la calidad del recurso hídrico para ser aprovechado en distintas actividades, recuperar la calidad de los suelos agrícolas y mejorar la calidad de vida de las personas.

## **CAPÍTULO I**

### **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1. Caracterización de la Realidad Problemática**

El agua es fundamental para la vida y es además un recurso natural no renovable, patrimonio común de la humanidad, por esto, es un deber hacer un buen uso de la misma. La necesidad de proveer de agua y que satisfaga las demandas de agua potable, de aguas de riego y agua para la industria, crea el reto de investigar y adaptar tecnologías que permitan la protección, conservación y recuperación del recurso hídrico. (Víctor E. Reyes Cruz, 2012).

Más de un 80% de los desechos peligrosos del mundo se producen en los países industrializados, mientras que en las naciones en vías de desarrollo un 70% de los residuos que se generan en las fábricas se vierten al agua sin ningún tipo de tratamiento previo, contaminando así los recursos hídricos disponibles. Estos datos aportan una idea de la importancia que tiene el tratamiento adecuado de los efluentes generados en las industrias, estos tratamientos deben satisfacer aspectos tales como ser adecuados para el propósito, tener una alta efectividad y ser de bajos costos, y adicionalmente traer ventajas ambientales.

Hoy en día existen una serie de tecnologías emergentes que están basadas en la electroquímica y que actualmente se presentan como alternativas que ofrecen ventajas competitivas frente a las tecnologías tradicionales. Se puede mencionar en este grupo la electrocoagulación que es una técnica utilizada para el tratamiento de diversas aguas residuales. En este proceso son removidos los contaminantes que se encuentran suspendidos, emulsionados o disueltos en el medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales. (Giraldo, 2009)

Efluentes líquidos de diferentes procesos industriales han sido tratados mediante electrocoagulación, obteniendo resultados alentadores en la remoción de contaminantes hecho que ha despertado el interés de la industria láctea por investigar e implementar esta tecnología en el tratamiento de sus aguas residuales y particularmente para el tratamiento de los residuos de quesería (suero lácteo).

A nivel nacional en las centrales lecheras se producen diariamente una considerable cantidad de aguas residuales, suelen oscilar entre 4 y 10 L de agua por cada litro de leche tratada, según el tipo de planta. De la producción de queso se obtiene como residuo el lactosuero, suero de quesería o suero lácteo. El lactosuero es definido como la sustancia líquida obtenida por separación del coágulo de leche en la elaboración de queso.

El lactosuero que se libera, corresponde a cerca del 83 % del volumen de leche utilizada como materia prima. Este residuo corresponde al efluente que más contaminación provoca en las plantas lecheras si no se tiene un aprovechamiento posterior, ya que contiene gran cantidad de lactosa y proteínas.

A nivel provincial, es preocupación los desechos del lactosuero ácido residual del distrito de Yanacancha, provincia Chupaca, departamento Junín ya que el lactosuero ácido principalmente es rico en fósforo, unas 10-12 veces más que el que puede estar presente como promedio en un residuo

acuoso por ello es aconsejable que estos sueros no sean vertidos de forma directa, pues provocarían un enorme incremento de la DQO, fósforo y un serio problema ambiental.

## **1.2. Formulación del Problema**

### **1.2.1. Problema General**

¿Cuánto de fósforo se recuperará mediante el proceso de electrocoagulación del lactosuero ácido residual?

### **1.2.2. Problemas Específicos**

- ¿Qué cantidad de fósforo poseerá el lactosuero ácido residual?
- ¿Cómo influirá el proceso de electrocoagulación en la recuperación de la concentración de fósforo del lactosuero ácido residual?
- ¿Cómo influirá el tiempo de retención hidráulica y el pH en la recuperación de fósforo?
- ¿Cuál será la eficiencia de la recuperación de fósforo en el proceso de electrocoagulación?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Determinar la recuperación de fósforo mediante el proceso de electrocoagulación del lactosuero ácido residual.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Determinar la cantidad de fósforo que posee el lactosuero ácido residual.
- Determinar el efecto del proceso de electrocoagulación en la recuperación de la concentración de fósforo del lactosuero ácido residual.

- Determinar el efecto del tiempo de retención hidráulica y el pH en la recuperación de fósforo.
- Calcular la eficiencia de la recuperación de fósforo en el proceso de electrocoagulación.

#### **1.4. Justificación**

Las aguas residuales de la industria láctea es uno de los contaminantes de agua de gran impacto en el medio ambiente. Las sustancias químicas que contienen dichas aguas provenientes de su producción están relacionadas con la presencia alta concentración de fósforo.

La descarga de aguas residuales contaminadas con alta concentración de fósforo al medio ambiente puede provocar un serio peligro para los seres humanos y las diferentes formas de vida acuática debido a su naturaleza tóxica. La presencia de altas concentraciones de fósforo se considera tóxica para algunas formas de vida acuática y la ingestión del fósforo en altas concentraciones puede causar consecuencias fatales en los humanos, afectando especialmente al sistema nervioso y al combinarse con otras sustancias forma compuestos altamente tóxicos, cancerígenos. Este trabajo se centra en la recuperación de fósforo de aguas residuales de una industria láctea mediante un proceso de electrocoagulación el cual resulta un método factible, rápido, sencillo, y medianamente económico que nos permite alcanzar altos porcentajes en la remoción de contaminantes presentes en el agua logrando así el cumplimiento de la normativa ambiental vigente en el país y mantener el equilibrio del medio ambiente mejorando la calidad de vida de las personas.

#### **1.5. Importancia**

La importancia de la investigación se realiza teniendo en cuenta los problemas de aguas contaminadas con residuos de la industria láctea, que provocan impactos negativos al ambiente y por consiguiente, a la salud



humana., siendo el lactosuero uno de los principales problemas de contaminación por su alta concentración de fósforo. Debido a la urgente necesidad de preservar el recurso hídrico, en esta investigación, se utilizó el proceso de electrocoagulación para el tratamiento de las aguas residuales generadas por la industria láctea con lo que se busca la reducción de los contaminantes como la DBO, DQO y la remoción de fósforo de estas aguas residuales lo cual es muy importante para ayudar a erradicar el impacto ambiental y mejorar la calidad de vida de la población. Para ello, se requiere de estrategias inmediatas para el abastecimiento y tratamiento de los efluentes de agua residuales. Lo que se conseguirá con la aplicación del proceso de electrocoagulación que mediante la utilización de ánodos y cátodos se forman reacciones de oxidación que atacaran a los contaminantes y disminuirán la concentración de fósforo en el agua con lo que se logrará la recuperación de fósforo de estas aguas residuales, para de esta manera contribuir con la minimización y descontaminación del agua por las industrias lácteas.

Con este trabajo se ha buscado recopilar la información más relevante y de actualidad que se tiene acerca de la aplicabilidad de la técnica de electrocoagulación en la remoción de agentes contaminantes en disoluciones acuosas, así como la potencialidad de ser aplicada en la reducción de las elevadísimas cargas orgánicas que presenta el suero derivado de la industria láctea en la elaboración de quesos. Se hace una revisión de la electrocoagulación, discutiendo los retos y oportunidades de esta tecnología, presentando su potencial de aplicación, además de sus ventajas y, finalmente, se plantean los mecanismos de reacción y el diseño y operación de los reactores. Desde esta perspectiva, la electrocoagulación se convierte en un proceso electroquímico que puede tener resultados exitosos en su aplicación optimizando los factores que lo conforman, alcanzando el reto de proteger, conservar y recuperar el recurso hídrico. Así cuando el también denominado lactosuero no es aprovechado

económicamente y se convierte en un residuo acuoso y vertido a los canales de aguas residuales, se magnifica el impacto ambiental por el incremento de la DQO. Aplicar nuevas técnicas de reducción de las cargas orgánicas con elevadas eficiencias en este tipo de residuos, es un reto de actualidad.

### **1.6.Limitaciones**

La limitación que se encontró para el trabajo de investigación será las caídas de tensión, y el recalentamiento de la fuente de poder, el amperaje es dependiente del voltaje y su relación con la resistencia el cual no se puede manipular.

## **CAPÍTULO II**

### **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

#### **2.1. Marco Referencial**

##### **2.1.1. Antecedentes de la Investigación**

SEGÚN LA INVESTIGACIÓN SOBRE EL DISEÑO DE UNA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA – COLOMBIA, REALIZADO POR ARANGO RUIZ, & GARCÉS GIRALDO, 2007: Los autores de este trabajo presentan una alternativa para el diseño de una celda de electrocoagulación.

La investigación permitió establecer la geometría tanto de la celda como de los electrodos, materiales y tipo de conexión, adicionalmente determinar los parámetros eléctricos de la fuente de voltaje. Algunos aspectos de diseño que tuvieron en cuenta estuvieron relacionados con la celda, los electrodos, los materiales de este, la geometría y la disposición de los electrodos que fueron fundamentales para que la aplicación de la electrocoagulación tenga resultados óptimos. Con base en la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales de una industria láctea, se diseñó un sistema de

electrocoagulación para estudiar el comportamiento de los diferentes parámetros involucrados en la remoción de contaminantes. La investigación permitió establecer la geometría tanto de la celda como de los electrodos, materiales y tipo de conexión, adicionalmente determinar los parámetros eléctricos de la fuente de voltaje.

SEGÚN LA INVESTIGACION SOBRE LA ELECTROCOAGULACION UNA ALTERNATIVA PARA LA DEPURACION DE LACTOSUERO RESIDUAL-MEXICO, REALIZADO POR PRIETO GARCIA, CALLEJAS HERNANDEZ, REYES CRUZ, & MARMOLEJO SANTILLAN, 2012; El objetivo de este trabajo ha sido recopilar la información más relevante y de actualidad que se tiene acerca de la aplicabilidad de la técnica de electrocoagulación en la remoción de agentes contaminantes en disoluciones acuosas, así como la potencialidad de ser aplicada en la reducción de las elevadísimas cargas orgánicas que presenta el suero derivado de la industria láctea en la elaboración de quesos. Se hace una revisión de la electrocoagulación, discutiendo los retos y oportunidades de esta tecnología, presentando su potencial de aplicación, además de sus ventajas y, finalmente, se plantean los mecanismos de reacción y el diseño y operación de los reactores. Desde esta perspectiva, la electrocoagulación se convierte en un proceso electroquímico que puede tener resultados exitosos en su aplicación optimizando los factores que lo conforman, alcanzando el reto de proteger, conservar y recuperar el recurso hídrico.

Así cuando el también denominado lactosuero no es aprovechado económicamente y se convierte en un residuo acuoso y vertido a los canales de aguas residuales, se magnifica el impacto ambiental por el incremento de la DQO. Aplicar nuevas técnicas de reducción de

las cargas orgánicas con elevadas eficiencias en este tipo de residuos, es un reto de actualidad.

SEGÚN LA INVESTIGACION SOBRE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE UN LACTOSUERO: POTENCIALIDAD DE RECUPERACIÓN DE FÓSFORO – MEXICO, REALIZADO POR REYES CRUZ, MARMOLEJO SANTILLÁN, A. MÉNDEZ, CALLEJAS HERNÁNDEZ, & PRIETO GARCÍA, 2009: El objetivo fue caracterizar un lactosuero de la planta de lácteos del municipio Santiago de Anaya en Hidalgo y valorar su recuperación de fósforo. Para ello, se realizó un muestreo compuesto: se determinó, según normas mexicanas, conductividad eléctrica, pH, potencial redox, potencial zeta, tamaños y distribución de partículas, demanda química de oxígeno, sólidos totales, volátiles y suspendidos, grasas, turbidez, proteínas, lactosa, ácido láctico y fósforo. Se aplicó un proceso de electrocoagulación con electrodos de Al y  $Ru_2O_3$  para remoción de carga orgánica. Los resultados promedios arrojaron que es un lactosuero ácido (pH=4,8), pZ de -4,02 mV, que presenta elevadas cargas orgánicas (DQO > 100 000 mg  $O_2/L$ ), entre las que destacan contenidos de lactosa (4,4 g/dL), ácido láctico (0,27 g/dL), grasas (0,83 g/dL) y proteínas (1,08 g/dL), así como  $PO_4^{3-}$  de 20,8 g/dL. Al término de 24 horas de electrocoagulación, se logró remover el 84 % de la DQO y recuperar 17,4 g/dL de  $PO_4^{3-}$  de la fase acuosa limpia y 0,07 g/kg del sólido floculado (lo que representa un total del 87 %).

SEGÚN LA INVESTIGACION SOBRE TRATAMIENTO DE SUERO DE QUESERÍA POR MÉTODO ELECTROQUÍMICO – PERU, REALIZADO POR ZÁRATE MALPICA, ANCHIRAICO COSQUILLO, SARA LAGOS TERREROS, & BUSTAMANTE CÁRDENAS, 2011:

Los autores de este trabajo presenta una alternativa para separar los compuestos orgánicos utilizando un método electroquímico.

El método que identificaron fue la electrocoagulación utilizando electrodos de aluminio y fierro en una celda electrolítica. Los resultados que obtuvieron de la experimentación en un reactor piloto de 2,5 litros, ha permitido demostrar que el método utilizado resulta ser muy efectivo en el proceso de electrocoagulación del suero de quesería para la eliminación de contaminantes. Los iones necesarios para la coagulación en un proceso químico son aportados por los electrodos tales como  $Al^3$  y  $Fe^3$  que provocan el efecto deseado de la coalescencia de las partículas, con ayuda de la electrólisis del agua que desprende hidrógeno y oxígeno.

Al caracterizar el suero se puede observar la presencia de: 556 mg/L de SS, 36,651 mg/L DBO, 80,140 mg/L DQO, 267 mg/L P y 1,070 mg/L de aceites y grasas. Lograron la separación de la materia orgánica del suero de quesería por el método de electrocoagulación a nivel de laboratorio; siendo 2 cm la distancia óptima entre electrodos, 6 voltios a un tiempo de 10 minutos para DBO5, DQO y aceites y grasas. Después del proceso de electrocoagulación es posible utilizar el agua en procesos industriales en la planta, evitando la contaminación ambiental.

SEGÚN LA INVESTIGACION SOBRE RECUPERACIÓN DE FÓSFORO A PARTIR DE UN SUERO LÁCTEO POR MEDIO DE ELECTROCOAGULACIÓN – MEXICO, REALIZADO POR CALLEJAS HERNÁNDEZ, PRIETO GARCÍA, REYES CRUZ, & MARMOLEJO SANTILLÁN, 2012: En este trabajo encontraron contenidos de  $PO_4^{3-}$  (2.08 g/L) que resultaron significativos, lo que hace interesante el trabajo de recuperar estos valores a partir de este residual. Para ello se propuso el método electroquímico de

electrocoagulación (EC), utilizando un arreglo de electrodos de Aluminio – Titanio|óxido de rutenio y aplicando un potencial de celda de 3.67 V. A partir de este proceso el fósforo pudo ser recuperado de los sobrenadantes y medido como fosfato según la norma mexicana NMX-AA-029-SCFI-2001. El resultado de la EC permitió la remoción del fósforo en un 84%, pasando de la fase acuosa a la fase floculada; lo cual indica que en esta misma proporción podrá ser recuperado por precipitación en forma de  $MgNH_4PO_4$  (estruvita) y ser utilizado como fertilizante. En su defecto, se queda en la fase acuosa (16%) y dichas aguas, ya reducidas en DQO, puedan ser empleadas directamente para riego agrícola (agua enriquecida en este nutriente P).

### **2.1.2. Referencias Históricas.**

Diferentes compuestos de fosforo son contaminantes ambientales presentes en el agua, suelo y efluentes industriales debido a que dicho metal es ampliamente utilizado en distintas actividades como en la industria láctea (APHA, 1992).

El fosforo (P) es considerado como un parámetro crítico en la calidad de aguas debido a su influencia en el proceso de eutrofización, (Brix H., 2001) de ahí la importancia de disponer de las técnicas analíticas y de muestreo adecuadas para la determinación de la concentración de las diferentes especies que pueden estar disueltas en el agua, adsorbidas sobre partículas o asociadas con organismos acuáticos (Gopal, 1999).

Las especies de fósforo más comunes en aguas naturales incluyen compuestos inorgánicos y orgánicos disueltos o suspendidos.

De acuerdo con (Lee JE, 2009) los polifosfatos en aguas naturales son hidrolizados lentamente a ortofosfato. Los compuestos orgánicos también pueden ser hidrolizados a través de reacciones químicas o

biológicas que se consideran factores claves en el ciclo normal del fósforo (Brix H., 2001).

Recientemente se ha analizado el uso de metodologías alternativas, como la recuperación de fósforo por Cristalización, (Doyle, 2002) así como también remoción conjunta de nitrógeno y fósforo. La remoción conjunta de nutrientes (BNR, siglas en ingles de biológica Nutriente renewal) es un proceso económicamente factible (Willem S, 2001).

Un gran número de procesos se han desarrollado y en la última década se han propuesto varios modelos bioquímicos (Comeao Y., 1987; Mino T., 1998), sin embargo estos no son completamente conocidos (Gujer W., 1995). En un proceso BNR típico el lodo activado se expone a condiciones anaeróbicas, anóxicas y aeróbicas. Por otro lado también se han utilizado materiales de bajo costo mediante el empleo de plantas (fitorremediación) (Quipuzco, 2002) implica una biotecnología capaz de degradar, acumular, extraer e inmovilizar entre los que se encuentra la Eichornia Crassipes( flor de bora), tratamientos con humedales que incluye a las espadañas y aneas (Typha spp.), (Marín, 2002) los juncos (Scirpus spp.) y los carrizos (Phragmites spp.) (Miranda, 2000). Por lo que es de gran interés otros materiales baratos para tratar de eliminar y/o reducir el fosforo de los suelos y aguas contaminadas con el mismo, (Quipuzco, 2002) del mismo modo nuevas tecnologías se viene implementando así como la de hidróxidos de doble capa (HDC) con interés de reciclar fósforo (Baez, 2015).

## **2.2. Marco Legal**

Las Normas de Calidad de Agua en el país son fijados por el Ministerio del Ambiente MINAM teniendo en cuenta que los límites que se establecen en cada caso, sean factibles de ser alcanzados con los recursos locales disponibles para tal fin.



La aprobación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el agua tiene el objetivo de establecer el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representan riesgos significativos para la salud de las personas ni para el ambiente. Los estándares aprobados son aplicables a los cuerpos de agua del territorio nacional en su estado natural y son obligatorios en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental.

Por ellos se establecieron estándares de calidad ambiental del agua, límites máximos permisibles y valores máximos admisibles las cuales presentare a continuación como medidas que fueron establecidas en normas ambientales:

- Decreto Supremo N°023-2009-MINAM, que aprueba las disposiciones para la implementación de los estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para agua.
- Decreto supremo N° 001-2010-ANA, que aprueba el reglamento de la ley N° 29338, Ley de Recurso Hídricos.
- Resolución Jefatural N° 202-2010-ANA, que aprueba la clasificación de cuerpos de aguas superficiales y marino-costeros.
- Resolución Jefatural N° 182-2011-ANA, que aprueba el Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales
- Ley de Recursos Hídricos N° 29338, en El Título III Uso de los Recursos Hídricos, se tiene los siguientes artículos relacionados con el uso de agua:
  - Artículo 35: Clases de usos de agua y orden de prioridad, reconoce las siguientes clases de uso de agua:
    1. Uso primario
    2. Uso poblacional

### 3. Uso productivo

- El Reglamento de la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos (Decreto Supremo N° 001-2010-AG) y su modificación D.S N° 024-2014-MINAGRI

Artículo 106.

2. sobre la Clasificación de los Cuerpos de Aguas, señala que la Autoridad Nacional del Agua clasifica los cuerpos de agua, tomando como base la implementación progresiva de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Agua (ECA- Agua), de acuerdo con los usos actuales y potenciales a que se destina el agua.

- Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, que aprueba los estándares Nacionales de Calidad de Agua.

Se aprobó los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, con el objetivo de establecer el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente.

Según el ECA – Agua la clasificación de los cuerpos de agua es el siguiente:

Categoría 1: Poblacional y Recreacional

Categoría 2: Actividades marino costeras

Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales

Categoría 4: Conservación del ambiente acuático

A continuación se detalla los niveles de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua de categoría 3.

Figura 2.1. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Agua.

<b>PARAMETROS PARA RIEGO DE VEGETALES DE TALLO BAJO Y TALLO ALTO</b>		
<b>PARAMETROS</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR</b>
<b>Fisicoquímicos</b>		
Bicarbonatos	mg/L	370
Calcio	mg/L	200
Carbonatos	mg/L	5
Cloruros	mg/L	100-700
Conductividad	µS/cm	<2000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	15
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	10
Fluoruros	mg/L	1
Fosfatos=P	mg/L	1
Nitratos (NO <sup>3</sup> – N)	mg/L	10
Nitritos (NO <sup>2</sup> – N)	mg/L	0,06
Oxígeno disuelto	mg/L	>4
pH	Unidad de pH	6.5 – 8.5
Sodio	mg/L	200
Sulfatos	mg/L	300
<b>Inorgánicos</b>		
Aluminio	mg/L	5
Arsénico	mg/L	0.05
Cadmio	mg/L	0.005
Cromo (6+)	mg/L	0.1
Hierro	mg/L	1
Plomo	mg/L	0.05

Manganeso	mg/L	0.2
Zinc	mg/L	2

Fuente: (MINAM, 2010)

### 2.3. Marco Conceptual.

- **Agua residual:** Se consideran aguas residuales a los líquidos que han sido utilizados en las actividades diarias de una ciudad (domésticas, comerciales, industriales y de servicios), generalmente estas contaminadas por sustancias orgánicas e inorgánicas.
- **Precipitación:** Es un proceso de obtención de un sólido a partir de una disolución. Puede realizarse por una reacción química, por evaporación del disolvente, por enfriamiento repentino de una disolución caliente, o por cambio de polaridad del disolvente. El sólido así obtenido se denomina precipitado y puede englobar impurezas.  
En general será necesario cristalizarlo y recristalizarlo.
- **Floculación:** Es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado. Es un paso del proceso de potabilización de aguas de origen superficial y del tratamiento de aguas servidas domésticas, industriales y de la minería.
- **Coagulación:** En una suspensión coloidal, no se puede conseguir, de forma efectiva, la separación de las partículas directamente por técnicas de separación sólido-líquido (decantación, flotación), como consecuencia del pequeño tamaño de las mismas, que se traduce en una muy pequeña velocidad de sedimentación.
- **Fosforilación:** La fosforilación es la adición de un grupo fosfato, o no fosfato molecular criogenizado inorgánico a cualquier otra molécula. Su papel predominante en la bioquímica lo convierte en un importante objeto de investigación sobre todo en la fosforilación de proteínas y de fructosa.

- **Desfosforilación:** Es el proceso esencial de remover grupos fosfato de un compuesto orgánico mediante hidrólisis. Su opuesto es la fosforilación.

Se encuentra en el movimiento de los músculos así como en muchas otras reacciones dentro del organismo, así como en reacciones en plantas.

- **Reacciones Redox:** Reacción redox es toda reacción química en la que uno o más electrones se transfieren entre los reactivos, provocando un cambio en sus estados de oxidación.

Para que exista una reacción de reducción-oxidación, en el sistema debe haber un elemento que ceda electrones, y otro que los acepte

- **Reacción de Oxidación:** La oxidación es una reacción química muy poderosa donde un elemento cede electrones, y por lo tanto aumenta su estado de oxidación. Se debe tener en cuenta que en realidad una oxidación o una reducción es un proceso por el cual cambia el estado de oxidación de un compuesto. Este cambio no significa necesariamente un intercambio de iones. Suponer esto -que es un error común- implica que todos los compuestos formados mediante un proceso redox son iónicos, puesto que es en éstos compuestos donde sí se da un enlace iónico, producto de la transferencia de electrones.

- **Reacción de Reducción:** Reducción es una reacción química por el cual un átomo o un ion ganan electrones. Implica la disminución de su estado de oxidación. Este proceso es contrario al de oxidación.

- **Tiempo:** El tiempo de residencia, indican algunos autores determina que a mayor valor, mayor es la cantidad de sólidos formados, debido a que se favorece tanto los procesos de electrodos como la floculación y precipitación de los sólidos. Se producen más gases, que al ascender, llevan las partículas de óxido a la superficie en forma de espuma y a su vez promueve el crecimiento de los flóculos y su posterior precipitación. Un pequeño cambio del tiempo representa una gran influencia en la

cantidad de sólidos obtenidos. Sin embargo estos mismos autores señalan que sus variaciones resultan estadísticamente menos significativas que las variaciones de pH, ya que éste, está muy vinculado a la constante del producto de solubilidad ( $K_{ps}$ ) la cual debe de disminuir al elevarse el mismo, lo que significa que los sólidos son más insolubles y por tanto se obtiene una mayor precipitación de los mismos en la medida que el pH aumenta.

- **Electroflotación:** La electroflotación es un proceso que utiliza aire para inducir la formación de pequeñas burbujas mediante la electrólisis del agua generando hidrógeno y oxígeno gaseosos. Este proceso puede ser alternado con la electrocoagulación para la remoción efectiva de las partículas floculadas.
- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** Es la cantidad de oxígeno requerido por un inóculo de bacterias para la descomposición de la materia orgánica en una muestra, durante 5 días a una temperatura de 20 °C (kg DBO). Puede ser expresado como unidad de concentración en agua (Kg DBO/m<sup>3</sup>), como cantidad de materia orgánica de un desecho o como cantidad de materia orgánica por equivalente habitante.
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Es la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación completa de la materia orgánica por agentes químicos altamente oxidantes, como el permanganato de potasio, en un ambiente ácido.
- **Ánodo:** Se denomina ánodo al electrodo positivo de una célula electrolítica hacia el que se dirigen los iones negativos dentro del electrolito, que por esto reciben el nombre de aniones.
- **Cátodo:** Se denomina cátodo al electrodo negativo de una célula electrolítica hacia el que se dirigen los iones positivos, que por esto reciben el nombre de cationes.

- **Potencial:** Como función de la energía libre del sistema), constituye la fuerza de empuje de una reacción electroquímica y por lo tanto representa el factor termodinámico.
- **Intensidad:** Es una medida de la cantidad de materia transformada en la unidad del tiempo y por tanto, representa factores cinéticos. Comúnmente representamos intensidad frente a potencial. Es decir, representamos la velocidad de una reacción (intensidad) como función de la fuerza de empuje (potencial Los potenciales a los cuales estos procesos ocurren están relacionados a los potenciales estándar  $E^\circ$ ) de las especies implicadas.

Si en disolución tenemos más de una especie que puede ser oxidada o reducida, el orden en que dichos procesos tiene lugar depende del valor de  $E^\circ$  y de la cinética de la reacción electrodica.

- **Conductividad:** La conductividad es una variable que se controla en muchos sectores, desde la industria química a la agricultura. Esta variable depende de la cantidad de sales disueltas presentes en un líquido y es inversamente proporcional a la resistividad del mismo, un aumento en la conductividad eléctrica genera un incremento en la densidad de corriente cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación.
- **pH:** El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidronio  $[H_3O]^+$  presentes en determinadas disoluciones.
- **Densidad de corriente:** como las variables eléctricas en el proceso de electrocoagulación son los parámetros que más influyen en la remoción del contaminante de un agua residual.
- **Turbiedad:** La turbidez es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión; mide la claridad del agua.

- **Influente:** Es el líquido a tratar que entra a un sistema de tratamiento, o alguno de sus elementos en particular.
- **Efluente:** Es el líquido que sale del sistema de tratamiento, o alguno de sus elementos en particular.
- **Ppm:** Partes por millón o miligramos por litro.
- **Ente Generador:** Persona física o jurídica, pública o privada, responsable del de aguas residuales, o de su vertido en un cuerpo receptor o alcantarillado sanitario.

## **2.4. Marco Teórico.**

### **2.4.1. El Agua**

El agua es una sustancia polar compuesta, donde las moléculas de agua se disponen alrededor de los iones positivos con la parte negativa de su molécula hacia ellos y en el caso de los iones negativos les enfrentan la parte positiva, siendo la distribución asimétrica de sus electrones la causa de su polaridad. Además el agua es caracterizada por ser líquida, inodora, insípida, en pequeña cantidad incolora y verdosa o azulada en grandes masas; sus temperaturas de transformación de un estado a otro han sido tomadas como puntos fijos, a pesar de que su punto de congelación y ebullición sean anormales, debido a las asociaciones moleculares, diferente a la mayoría de los líquidos, manifiesta extraordinarias propiedades físicas y químicas. (Universidad de Salamanca, 2014)

#### **2.4.1.1. Aguas Residuales**

Las aguas residuales provienen de su utilización en las diversas actividades domésticas e industriales del ser humano.

Si son de origen domestico presentan características diferenciadas con las aguas residuales provenientes de la actividad industrial, aunque en algunas ocasiones puntuales pueden ser semejantes. Esto ocasiona un problema ambiental, por lo cual es necesario



tratarlas con diversos procesos para evitar la contaminación de los cuerpos de agua. (Eddy., 2004)

#### **2.4.1.2. Contaminantes Importantes en Aguas Residuales.**

El agua residual contiene muchos contaminantes, para su determinación existen métodos de análisis cuantitativos los que sirven para hallar de la composición química del agua residual, así como análisis cualitativos para conocer las características físicas y biológicas.

En la tabla 2.2 resumimos estos contaminantes.

Figura 2.2. *Contaminantes de importancia en el tratamiento de las aguas residuales*

<b>Contaminantes</b>	<b>Razón de la importancia</b>
Sólidos en suspensión	Los sólidos en suspensión pueden dar lugar al depósito de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales, la materia orgánica biodegradable se mide, en la mayoría de las ocasiones, en función de la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y de la DQO (demanda química de oxígeno).
Patógeno	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua residual.

Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden provocar la contaminación del agua subterránea.
Contaminantes prioritarios	Son compuestos orgánicos o inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda conocida o sospechada. Muchos de estos compuestos se hallan presentes en el agua residual.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento, ejemplos típicos son los agentes tenso activos, los fenoles y los pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Los metales pesados son, frecuentemente, añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y puede ser

	necesarios eliminarlos si se pretende reutilizar el agua residual.
Sólido	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua y es posible que se deban eliminar si se va a reutilizar.

**Fuente:** (Eddy., 2004)

#### 2.4.2. La Industria Láctea y sus Residuos

Los procesos que se llevan a cabo en el sector lácteo son muy variados, tanto como los productos lácteos presentes en el mercado. Debido a su complejidad, no es posible generalizar sobre la contaminación generada, que será muy específica de acuerdo al tipo de producto.

En las centrales lecheras se producen diariamente una considerable cantidad de aguas residuales, que suelen oscilar entre 4 y 10 L de agua por cada litro de leche tratada, según el tipo de planta. La mayor parte de éstas proceden fundamentalmente de la limpieza de aparatos, máquinas y salas de tratamiento, por lo que contienen restos de productos lácteos y productos químicos (ácidos, álcalis, detergentes, desinfectantes y otros), aunque también se vierten aguas de refrigeración que, si no se recuperan de forma adecuada, pueden suponer hasta 2-3 veces la cantidad de leche que entra en la central.

Algunos procesos generadores de efluentes en la industria láctea son (Veisseyre, 1988)

- **Recepción de la Leche:** Se recibe en cisternas y se termiza a 65 °C para eliminar gran parte de los microorganismos, se

enfria a 4 °C y se transporta a los silos de almacenamiento. La limpieza de las cisternas genera residuos donde la cantidad de grasa es abundante, ya que el propio transporte de la leche provoca un desnatado parcial de la misma, que después es difícil de reemulsionar.

- **Estandarización de la Leche:** La leche es estandarizada en materia grasa, para ello se hace uso de desnatadores, de forma que se consiga el porcentaje de grasa adecuado aprovechándose la nata producida para la elaboración de mantequilla. En este proceso se suelen producir efluentes con alto contenido en materia grasa.
- **Tratamientos Térmicos:** *Pasterización*, proceso similar a la termización pero que emplea temperaturas de 75-85°C durante 15 segundos con enfriamiento rápido para la eliminación de microorganismos patógenos; *Esterilización*, mediante tratamiento UHT (ultrapasteurización). La leche es calentada a altas temperaturas (hasta 145 °C) durante un tiempo muy corto (2 a 5 segundos) con enfriamiento rápido. En los tratamientos térmicos se suelen producir depósitos de proteínas que quedan adheridos a las superficies de los intercambiadores de calor y que posteriormente deben ser arrastrados mediante el lavado químico. Estos tratamientos térmicos son comunes para la leche, mantequilla, algunos tipos de quesos, postres lácteos y otros.
- **Producción de Queso:** Se obtiene como residuo el lactosuero, suero de quesería o suero lácteo. Este residuo presenta ciertos factores de variabilidad, entre ellos se puede señalar la especie de donde proviene la leche, vacuno, ovino, caprino, o mezcla de éstas; el proceso tecnológico de fabricación del queso, con pasteurización o leche cruda; el corte de la cuajada (para

elaboración de quesos blandos, semiduros, o duros ); la cocción de la cuajada; el prensado; la estación del año en que se produce; las diluciones eventuales; los procesos tecnológicos a que puede someterse el lactosuero para la recuperación de proteínas ó lactosa; la evolución del producto en el curso del almacenamiento, entre otros. El proceso de salado también provoca la emisión de efluentes líquidos, aunque en este caso con escasa materia orgánica pero gran cantidad de sales.

- **Producción de Mantequilla:** Como en el caso de las queserías, el residuo más contaminante es el suero de mantequerías o mazada, rico en proteínas del suero y lactosa. Su aprovechamiento posterior suele limitarse a la alimentación de ganado.
- **Transporte de los Productos Lácteos Líquidos:** La limpieza de los circuitos (tuberías y bombas como medio de transporte) y equipos se suele realizar en varios pasos (Valencia & Ramirez, 2009): Empuje de los restos de leche y productos lácteos con agua. Lavado con sosa diluida (2-3%) a 80 °C para eliminar la materia grasa por saponificación. Las soluciones de sosa se recuperan en tanques de limpieza, perdiéndose pequeñas cantidades por los empujes. Con el tiempo, la sosa pierde su poder detergente y es necesario renovarla enviando a sumidero la solución diluida (<1%). Lavado con ácido, normalmente ácido nítrico al 1-2%, a 60 °C, que disuelve la materia orgánica principalmente de origen proteico. Al igual que la sosa, cuando está agotado se renueva y se elimina por sumidero. Empuje final con agua para eliminar todos los posibles restos de producto, de ácido o de sosa.

La mayor parte de las aguas residuales lácteas proceden de este tipo de lavados. El uso de ácido y sosa provoca que los vertidos tengan valores de pH muy extremos, que pueden oscilar desde 5 hasta 10.5. En ocasiones también se emplean detergentes y desinfectantes para determinados circuitos (ácido peracético, agua oxigenada, sales de amonio cuaternario, entre otros). La composición general de los efluentes acuosos varía notablemente en función de los productos que fabrique cada empresa láctea y de sus características de diseño. En la tabla 3 se pueden observar los valores promedios de vertidos acuosos de la industria láctea.

De acuerdo a la tabla las aguas residuales provenientes de la industria láctea son ricos en carga orgánica, sólidos, grasas, proteínas y carbohidratos, no así en contenido de fósforo, ya que aquí no se está considerando que el lactosuero vaya a sumidero directamente.

Figura 2.3. Valores promedios de los residuales acuosos de la industria láctea

Constituyente	Rango	Media
DBO5 (mg O2/L)	50-4800	885
DQO (mg O2/L)	75-7200	820
Sólidos en suspensión (mg/L)	4-5700	500
Sólidos totales (mg/L)	35-8500	400
pH	5.3-9.4	
Grasas (mg/L)	5-500	09
Proteínas (mg/L)	10-560	50

Carbohidratos (mg/L)	52-930	22
Fósforo (mg/L)	1-160	0

*Fuente:* (Veisseyre, 1988)

#### **2.4.2.1. Lactosuero.**

El lactosuero es definido como “la sustancia líquida obtenida por separación del coágulo de leche en la elaboración de queso” (Parra, 2009). Es un líquido translúcido verde obtenido de la leche después de la precipitación de la proteína (caseína)

El lactosuero que se libera, corresponde a cerca del 83% del volumen de leche utilizada como materia prima, el cual es exudado desde el interior de la cuajada de queso. Este residuo corresponde al efluente que más contaminación provoca en las queserías si no se tiene un aprovechamiento posterior, ya que contiene gran cantidad de lactosa y proteínas. Por ello es aconsejable que estos sueros no sean vertidos de forma directa al cauce o a la depuradora, pues provocarían un enorme incremento de la DBO y la DQO.

Algunas posibilidades de la utilización de este residuo han sido propuestas, pero las estadísticas indican que una importante porción de este residuo es descartada como efluente, el cual crea un serio problema ambiental (Aider *et al.*, 2009; Arteaga *et al.*, 2009; Miranda *et al.*, 2009), debido a que afecta física y químicamente la estructura del suelo. Lo anterior resulta en una disminución en el rendimiento de cultivos agrícolas y cuando se desecha en el agua, reduce la vida acuática al agotar el oxígeno disuelto (Aider, 2009) o provoca eutrofización de acuíferos.

El lactosuero es un residuo al que se debe dar una salida que no provoque contaminación. Por ello, en las plantas más modernas se deshidrata para obtener lactosuero en polvo, también puede

obtenerse proteína y lactosa en polvo; etc., productos con un alto valor añadido y de fácil venta (Koutinas, y otros, 2009) Para el criador de ganado porcino y bovino, este residuo constituye una materia prima en la alimentación bajo determinadas condiciones (composición, suministro y precios (Peters, 2005)

El suero lácteo es considerado un producto de alto valor nutritivo, específicamente por sus proteínas séricas, que son de muy buena calidad debido a que aportan aminoácidos esenciales que poseen un alto coeficiente de absorción.

Además, contiene lactosa y un perfil de minerales donde se destaca la presencia de potasio (K), lo que favorece la eliminación de líquidos y toxinas del organismo, dispone también de calcio (Ca), fósforo (P) y magnesio (Mg), y oligoelementos como zinc (Zn), hierro (Fe) y cobre (Cu), formando sales de gran biodisponibilidad para el organismo.

Dados los factores de variabilidad reseñados anteriormente se puede encontrar una gama de lactosueros que fluctúan entre dos tipos extremos: ácidos y dulces. Sus características principales se muestran en la tabla 2.4.

Un suero ácido se produce cuando el coágulo se forma por la adición de ácidos, presentando un pH próximo a 4,5. Esto es, al alcanzar el punto isoeléctrico de la caseína con anulación de las cargas eléctricas que las mantienen separadas, impidiendo la floculación. Lo que conlleva a una total desmineralización de la micela y a la destrucción de la estructura micelar (gel muy frágil).

Obteniéndose así, un suero muy mineralizado, pues contiene más del 80% de los minerales de la leche. En éste, el ácido láctico secuestra el Ca del complejo de paracaseinato cálcico, produciendo lactato cálcico. El P de la caseína se encuentra bajo la forma de



monoéster ortofosfórico de un aminoácido hidroxilado (Charles Alais, 1985)

Figura 2.4. Origen y principales características de los lactosueros de la elaboración de quesos

	<b>Lactosuero Acido</b>	<b>Lactosuero Dulce</b>
Origen	Proviene de la fabricación de quesos frescos y de su pasta blanda.	Proviene de la fabricación de quesos de pasta cocida y prensada.
Características	Una parte de la lactosa se ha transformado en ácido láctico y son ricos en Ca y P.	Pobres en ácido láctico y en calcio y fosforo.

**Fuente:** (Abaigar, 2009)

La composición del lactosuero en gramos por kg del producto bruto, se muestra en la tabla 2.5 (Abaigar, 2009).

Ambos tienen altos contenidos de lactosa, proteínas y grasa. Como se puede observar el lactosuero ácido principalmente, sí es rico en fósforo, unas 10-12 veces más que el que puede estar presente como promedio en los residuos acuosos lácteos, por lo cual se hace interesante la recuperación de éste como valor agregado.

Figura 2.5. Composición promedio de los lactosueros dulces y ácidos derivados de la elaboración de quesos

<b>Componentes</b>	<b>Lactosueros dulces (g/kg de lactosuero)</b>	<b>Lactosueros ácidos (g/kg de lactosuero)</b>
Materia seca (MS)	55-75	55-65
Lactosa	40-50	40-50

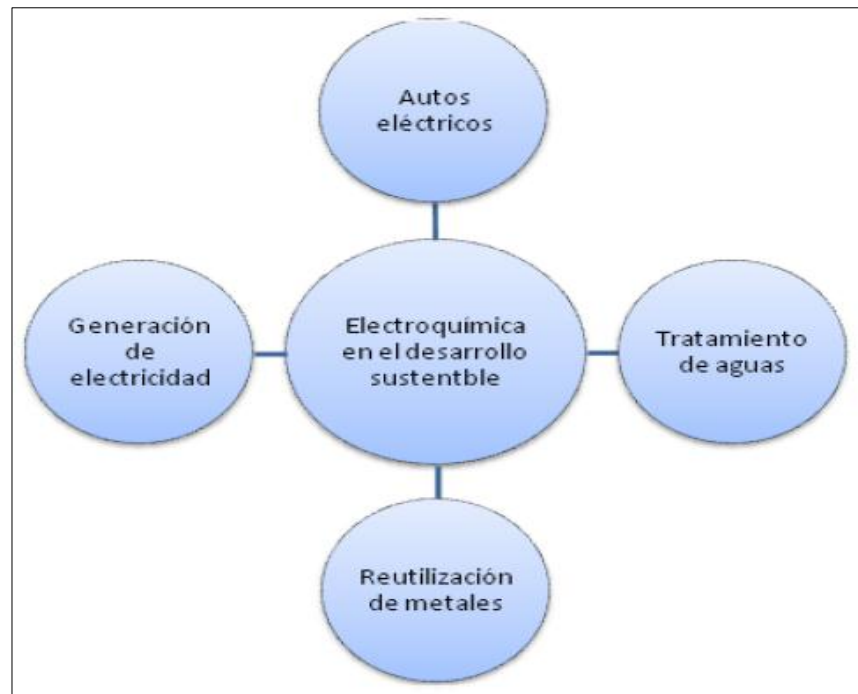
Grasa bruta (GB)	0-5	0-5
Proteína bruta (PB)	9-14	7-12
Cenizas	4-6	6-8
Calcio	0.4-0.6	1.2-1.4
Fósforo (Fosfato g/L)	0.4-0.7 (1.0-3.0)	0.5-0.8 (2.0-4.5)
Potasio	1.4-1.6	1.4-1.6
Cloruros	2.0-2.2	2.0-2.2
Ácido láctico	0-0.3	7-8
pH	> 6.0	< 4.5
Grados Dornic	< 20°	> 50 °

*Fuente:* (Abaigar, 2009)

### 2.4.3. Electroquímica.

Hoy en día es considerada como la principal ciencia para el desarrollo sustentable, porque a través de ella se están creando nuevas alternativas para la generación de electricidad, evitando la quema de combustibles fósiles y reducir el calentamiento global del planeta, se están desarrollando baterías para autos eléctricos y evitar la creciente contaminación del aire por  $CO_2$ , mediante métodos electroquímicos se están reciclando los metales para evitar su extracción y disminuir el daño a los ecosistemas, también, la electroquímica está tratando aguas residuales y purificando el agua, promoviendo su reutilización. (García, Electrocoagulación: una alternativa para depuración de lactosuero residual, 2012).

Figura 2.6. Aportaciones de la electroquímica al desarrollo sustentable



**Fuente:** (Víctor E. Reyes Cruz, 2012)

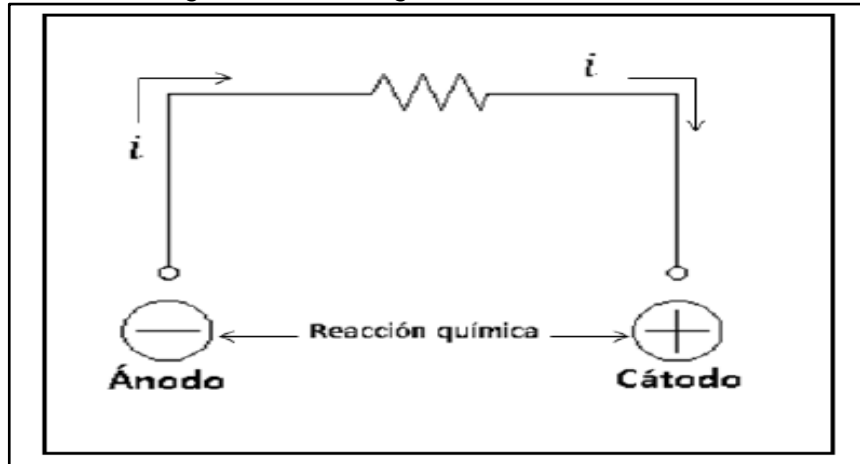
La electroquímica es una rama de la química que trata de producción de corriente eléctrica por medio de la transformación de sustancias químicas y las transformaciones químicas producidas por corriente eléctrica, dividiéndose en dos ramas; celdas galvánicas y electrolíticas.

#### 2.4.3.1. Tipos de Celdas.

##### a) Celdas galvánicas.

Son los dispositivos que generan una corriente eléctrica por medio de una reacción química efectuada en los electrodos (negativo: ánodo, positivo: cátodo), ejemplos de estos dispositivos son: pilas, baterías de los automóviles, celdas solares, entre otros. En la figura 2.2 se muestra el funcionamiento básico de una celda galvánica. (Krishnam Rajeshwar, 1997).

Figura 2.7. Celda galvánica.



Fuente: (Krishnam Rajeshwar, 1997)

### b) Celdas electrolíticas

Son equipos que generan una reacción química debido al suministro de una corriente eléctrica a través de electrodos (negativo: cátodo, positivo: ánodo), su uso más frecuente es el chapeado de oro, plata, cromado, y para la disociación soluciones ácidos, bases o sales, o ciertas sustancias en estado de fusión, la reacción química que generan estas celdas se llama electrolisis. En la figura 2.3 se muestran el funcionamiento básico de esta celda. (Krishnam Rajeshwar, 1997).

Figura 2.8. Celda Electrolítica



Fuente: (Krishnam Rajeshwar, 1997)

#### **2.4.3.2. Electrólisis.**

Cuando se aplica una corriente eléctrica a soluciones ácidos, bases o sales, o ciertas sustancias en estado de fusión, la conducción eléctrica se presenta acompañada por cambios de naturaleza física y química. Tal conducción se llama electrolítica y esta reacción se conoce con el nombre de electrolisis, la reacción se distingue por el hecho de que los productos de la reacción aparecen separados uno del otro suspendidos en una sola masa o en los electrodos, a través de los cuales la corriente eléctrica entra o sale del líquido o electrolito.

Con esto se determina que la electrocoagulación utiliza como funcionamiento la celda electrolítica y la reacción que produce es una electrolisis. (Huijuan Liu, 2010).

#### **2.4.3.3. Historia y Evolución de la Electrocoagulación.**

La electroquímica es una ciencia que nace a finales del siglo XVIII con los trabajos de Galvani y Volta, y ha tenido desarrollos y aplicaciones en múltiples áreas. Podemos mencionar su uso en el arranque de los motores de los automóviles, en procesos de síntesis química y métodos para la eliminación de la contaminación. La electrocoagulación ha sido una tecnología emergente desde 1906, con la primera patente concedida en Estados Unidos. Problemas de tipo financiero o de regulación de incentivos generaron tropiezos para que la industria adoptara esta técnica, pero se conocen desarrollos anteriores. Desde el siglo XIX, exactamente en 1888, se efectuó el primer ensayo reportado en Londres por Webster. Su proceso utilizaba ánodos de hierro soluble, con una caída de potencial de 1.8 vatios entre los electrodos, distantes una pulgada, y una corriente anódica de 0.6 Amp/pie<sup>2</sup>. (Barrera, 2014)

En 1893, Wolff electrolizó una solución concentrada de sal para producir cloro y soda cáustica, que utilizaba para esterilizar aguas negras en Brewster, NY.

En 1896 se usó en Louisville, Kentucky, una modificación del proceso de Webster para coagular agua cenagosa del río Ohio, proceso en el que se utilizaron ánodos de hierro y aluminio. En 1908 el proceso Webster se utilizó en Santa Mónica, con reducciones de 40% de materia orgánica.

En 1914 se utilizó en New York una modificación del proceso Webster llamado Landreth. En éste se añade cal para mejorar la conductividad del electrolito. En 1932 fue utilizada la electrocoagulación en Alemania, con eficiencias del 50% en reducción de la DBO de aguas residuales. La falla de estos procesos se dio por el alto costo de la energía y la necesidad de recambiar los electrodos.

En 1947, en URSS, se utilizó el proceso con electrodos de hierro para formar hidróxido ferroso, obteniendo remociones de 70% al 80% para la DBO. Unos años más tarde, en 1958, el profesor Mendía, de la Universidad de Nápoles, utilizó esta técnica para desinfectar las aguas negras de ciudades costeras. En este proceso se mezcló 25% al 30% en volumen de agua de mar antes de la electrólisis.

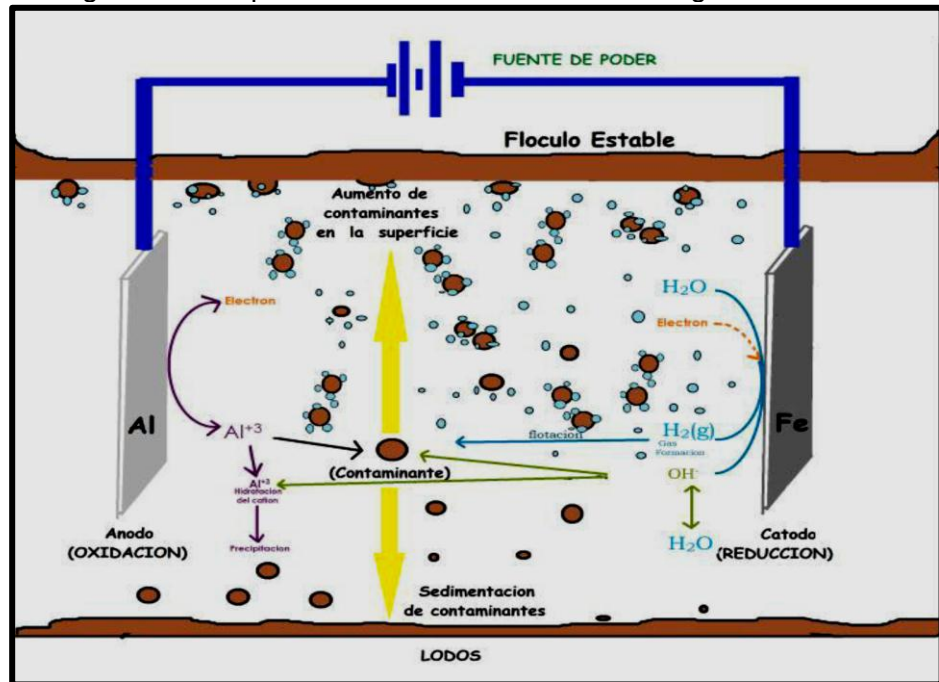
En Noruega, Föyn combinó 20% de agua de mar con las aguas residuales en la electrólisis para la remoción de fosfato, utilizando electrodos de carbón.

Aunque la eficiencia del proceso fue buena, hubo problemas de corrosión.

Durante las dos últimas décadas se han reportado trabajos en donde se utiliza el proceso para remover partículas dispersas de aceite, grasa y petróleo en el tratamiento de aguas residuales

provenientes de procesos de electroplateado, textiles y en procesos de potabilización del agua misma, entre otros (Barrera, 2014).

Figura 2.9. Esquema de una celda de electrocoagulación



Fuente: (Mollah, 2001)

#### 2.4.4. Electrocoagulación.

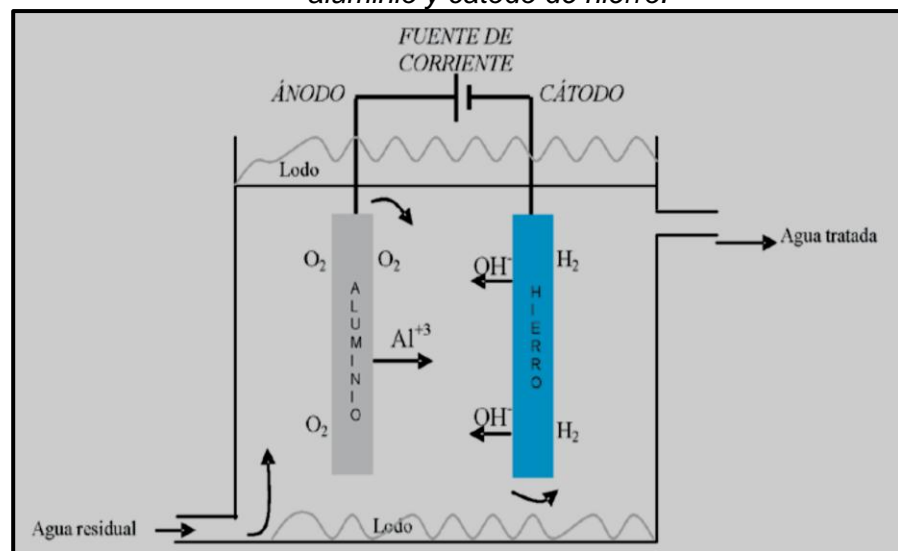
La electrocoagulación es una técnica utilizada para el tratamiento de las aguas residuales.

Los contaminantes de muy diversos efluentes son removidos aplicando el principio de coagulación, pero en este caso no se hace uso de un coagulante químico (cuya función es llevada a cabo por corriente eléctrica que es aplicada al medio líquido contaminado). Podemos entonces definir la electrocoagulación como un proceso en el cual son desestabilizadas las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados. (Barrera, 2014)

La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes.

Por lo general este estado estable produce partículas sólidas menos coloidales y menos emulsionadas o solubles. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundario. Los iones metálicos se liberan y dispersan en el medio líquido y tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados.

Figura 2.10. Sistema de electrocoagulación con ánodo de aluminio y cátodo de hierro.



Fuente: (Barrera, 2014)

#### 2.4.4.1. Partes Básicas que Integran el Sistema de EC:

Reactor electroquímico: es donde se llevan a cabo la EC.

Electrodos: ánodo y cátodo, a través de los cuales circula la corriente eléctrica para llevar a cabo la reacción química de la EC.

Fuente de alimentación de corriente directa: suministra la energía eléctrica para llevar a cabo la EC. (Diaz, 2014)



Entonces el proceso de EC se puede describir en tres etapas fundamentales:

- Formación de agentes coagulantes por la oxidación electrolítica del electrodo de sacrificio, debido al paso de la corriente eléctrica.
- Desestabilización de contaminantes partículas en suspensión y rupturas de emulsiones.
- Agregación de elementos desestabilizadores para la formación de flóculos.

#### **2.4.4.2. Retos y Oportunidades.**

A pesar de que la electrocoagulación es una tecnología que se conoce hace ya más de cien años, no se ha desarrollado una investigación sistemática que pueda predecir el proceso desde su comportamiento químico, reacciones y mecanismos, ni provea las herramientas suficientes para el diseño y operación de los reactores. Es importante aclarar que en las diferentes publicaciones que se han venido haciendo sobre el tema se encuentran una serie de diseños a escalas de laboratorio y piloto, pero no hay diseños de reactores prototipos en uso hoy en día. La literatura disponible básicamente se limita a comparar los trabajos reportados.

Esto se ha dado en parte por la reputación que ha adquirido la electrocoagulación como tecnología demandante de electricidad, la que puede ser costosa en muchos lugares obligando a que se abandonen sus estudios sin un análisis más detenido, y, por otra parte, a que esta tecnología se ha aplicado de manera empírica en muchos casos y como tratamiento puntual sobre un contaminante específico. (Barrera, 2014)

En los últimos años, y debido a la imperante necesidad de investigar, adaptar e implementar tecnologías eficientes en la remoción de contaminantes de diversas aguas residuales, se ha

vuelto a considerar la electrocoagulación como alternativa viable en el tratamiento de los efluentes líquidos, cobrando un importante interés científico e industrial, hecho éste que permitirá avanzar sobre los escollos que han dejado a esta tecnología rezagada durante varias décadas. Es así como nos enfrentamos al reto de investigar los parámetros que controlan el proceso de electrocoagulación de manera organizada y sistemática, de una forma que permita diseñar el proceso en su totalidad, desde su requerimiento de energía hasta su reactor para así optimizarlo, adaptarlo y aplicarlo, ubicando dicho proceso como una tecnología de punta que brinde sus ventajas en la protección y conservación del recurso hídrico (Barrera, 2014).

#### **2.4.4.3. Aplicaciones de la Electrocoagulación.**

Se ha aplicado la electrocoagulación para la remoción de diversas aguas residuales. En muchos casos se hace una combinación de esta técnica con flotación promovida también por electrólisis (electroflotación), cuya finalidad es aumentar la eficiencia de remoción del contaminante.

Esto se realiza en un proceso en la misma celda, o en celdas consecutivas.

Una de las aplicaciones más conocidas y populares de la electrocoagulación ha sido el tratamiento de aguas residuales de la industria de galvanoplastia y electroplateado metálico, proceso que busca remover la carga de metales solubles en las descargas de una industria por demás contaminante.

La industria metalúrgica, la de producción de cromo, las curtiembres y la industria de fertilizantes, utilizan en sus procesos cromo (+6), elemento de una alta toxicidad. Las descargas de cromo son muy reguladas a nivel mundial y para su remoción se utilizan métodos convencionales que incluyen adsorción, precipitación química y

degradación biológica, entre otros. La electrocoagulación combinada con electroflotación ha sido probada como alternativa para la remoción del cromo en esta agua residual. Este tratamiento ha permitido obtener aguas tratadas con concentraciones de cromo por debajo de 0.5 ppm. (Barrera, 2014)

La industria mecánica, las refinerías, los talleres de reparación automotriz, el transporte y la distribución y almacenamiento de aceites, producen aguas residuales con altos contenidos de elementos propiamente aceitosos y grasosos, que se caracterizan por presentar una gran estabilidad química de sus emulsiones aceite-agua. Esto representa una problemática ambiental importante. La electrocoagulación ha mostrado alta efectividad en desestabilizar dichas emulsiones y la consecuente remoción de los aceites y grasas. (Barrera, 2014)

La electrocoagulación también ha sido utilizada en el tratamiento de las aguas residuales de la industria alimentaria, estas aguas se caracterizan por altos contenidos de DBO y DQO además de altos porcentajes de grasas. Una investigación realizada con las aguas residuales de los restaurantes de Hong Kong, las cuales fueron tratadas por electrocoagulación y electroflotación, mostró remociones de 99 y 88 % en grasas y DQO respectivamente.

Una de las áreas de aplicación en las cuales se han desarrollado algunos avances importantes de esta tecnología y que incluso ha tenido mayor implementación de la misma, es el tratamiento de las aguas residuales de lavanderías, tintorerías e industria textil, obteniendo eficiencias importantes en la remoción de materia orgánica, turbiedad y color.

La electrocoagulación también ha sido probada en la potabilización de aguas. Es importante resaltar que el paso de la corriente eléctrica a través del agua a tratar tiene efecto desinfectante en

cuanto que destruye, en porcentajes por encima del 99%, los microorganismos presentes en el agua. En esta misma aplicación se ha venido estudiando la electrocoagulación con buenos resultados en el tratamiento de aguas para consumo humano contaminadas con arsénico, contaminación ésta que puede afectar la salud de la población mundial ya que puede ocurrir en cualquier región o país.

Otras posibles aplicaciones de la electrocoagulación están dadas en la remoción de nitratos en aguas superficiales y subterráneas contaminadas por nitratos lixiviados, procedentes de los fertilizantes artificiales usados en los cultivos.

Finalmente, la electrocoagulación también ha sido probada en el tratamiento de aguas cuyos contaminantes son materia orgánica, como DBO en aguas residuales domésticas y efluentes de la industria de los colorantes.

#### **2.4.4.4. Factores que Afectan el Proceso de EC**

Son muchos los factores que intervienen en el proceso de electrocoagulación y algunos de estos tienen mayor influencia sobre el proceso. A continuación se discuten aquellos que se relacionan más directamente con la efectividad del mismo. (Restrepo, 2006)

- **pH**

El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido, se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar.

El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas, cuyo efecto es atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. En contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede

decrecer y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso. Se ha determinado en algunos casos que la mayor eficiencia en la remoción de un contaminante se da dentro de un rango específico de pH, e incluso este rango puede ser amplio. En términos generales, las mejores remociones se han obtenido para valores de pH cercanos a 7. Ejemplos de esta situación se pueden ver en la remoción de arsénico en aguas de consumo, donde el mayor porcentaje de remoción de arsénico se da en pH entre 6 y 8, y las mejores remociones de turbiedad y DQO en las aguas de la industria textil a un pH de 7. Las reacciones que se dan durante el proceso de electrocoagulación le dan al medio acuoso capacidad buffer. Especialmente en aguas residuales alcalinas, esta propiedad previene grandes cambios de pH, con lo cual son menores las dosificaciones de sustancias químicas para regular el pH. (Restrepo, 2006)

- **Densidad de Corriente**

Como las variables eléctricas en el proceso de electrocoagulación son los parámetros que más influyen en la remoción del contaminante de un agua residual y están ligados a factores económicos, se debe prestar mayor atención a su estudio. La eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento en la densidad de corriente. Para algunas conductividades del medio acuoso el consumo de energía se incrementa proporcionalmente con los aumentos de conductividad, lo que conlleva a un consumo mayor de energía. Para altos consumos de energía se presentan pérdidas por la transformación de energía eléctrica en calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio acuoso. El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la

cantidad de iones de aluminio  $Al^{+3}$  o hierros  $Fe^{+2}$ , liberados por los respectivos electrodos. En general, un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante. Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficacia. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación, como pH y temperatura. La energía eléctrica que se suministra a la celda electroquímica puede ser mediante corriente alterna (CA) o bien como corriente directa (CD). Las características propias del paso de cada una de las corrientes a través del medio acuoso generan diferentes respuestas electroquímicas entre las placas y el agua residual tratada. Cuando se suministra corriente directa se produce en el cátodo una impermeabilización, lo que causa una menor eficiencia en la remoción. (Restrepo, 2006)

- **Conductividad**

Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. Cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación y adicionalmente el incremento de la conductividad, y manteniendo la densidad de corriente constante, se produce una disminución del voltaje aplicado. La adición de algunos electrólitos tales como NaCl o  $CaCl_2$  genera un aumento en la conductividad del agua residual. Además se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones como  $HCO_3^-$  y  $SO_4^{2-}$ , pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de  $Ca^{+2}$  y  $Mg^{+2}$  produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos que aumentaría el potencial entre éstos, decreciendo así la eficiencia de la corriente. Se recomienda, sin

embargo, que para un proceso de electrocoagulación normal se mantengan cantidades de  $\text{Cl}^-$  alrededor del 20%. (Restrepo, 2006)

- **Temperatura**

Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente se incrementa inicialmente hasta llegar a  $60^\circ \text{C}$ , punto donde se hace máxima para luego decrecer. El incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuida al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo (Restrepo, 2006).

#### **2.4.4.5. Ventajas y Desventajas de Proceso de EC.**

##### **a) Ventajas.**

Son muchas las ventajas de la electrocoagulación. Entre las más relevantes están:

- Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos convencionales usando polímeros.
- Requiere de equipos simples y de fácil operación.
- Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos.
- Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que involucra menor problemática de disposición de estos lodos.
- Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada.
- Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes.
- Purifica el agua y permite su reciclaje.

- El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación.
- Reduce la contaminación en los cuerpos de agua.
- El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos que aquellas tratadas con productos químicos, situación que disminuye los costos de tratamiento de estos efluentes en el caso de ser reusados.
- Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras.
- Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada, donde pueden ser removidos con mayor facilidad (Víctor E. Reyes Cruz, 2012).

**b) Desventajas.**

Las principales desventajas del proceso de electrocoagulación son:

- Es necesario reponer los electrodos de sacrificio.
- Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado.
- Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica sea alto.
- El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso (Víctor E. Reyes Cruz, 2012).

**2.4.5. Activación y Estabilización de Electroodos.**

Estabilización de electrodos, específicamente de electrodos de aluminio, ha sido ampliamente observada y reconocida como perjudicial para el rendimiento del reactor. Esta formación de una



inhibición de la capa, generalmente un óxido en la superficie del electrodo, será evitar metal disolución y transferencia de electrones, allí limitando además la solución de coagulante. Con el tiempo, el espesor de esta capa aumenta, reduciendo la eficacia del proceso de electrocoagulación. El uso de nuevos materiales, electrodos diferentes tipos y arreglos (Eric Lichtfouse, 2013) y más sofisticadas estrategias operativas de reactor (como revocación periódica de la polaridad de los electrodos) sin duda han dejado a reducciones significativas de pasividad de impacto. Además, la adición de aniones también se ralentizará la pasividad de los electrodos. El efecto positivo fue la siguiente:  $\text{Cl}^- > \text{Br}^- > \text{I}^- > \text{F}^- > \text{ClO}_4^- > \text{OH}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Especialmente, además de cierta cantidad de  $\text{Cl}^-$  en la solución acuosa inhiben el proceso de pasividad de electrodo en gran parte. También es necesario lavar periódicamente la superficie de las placas del electrodo. En general, hierro es utilizado en tratamiento de aguas residuales, que el aluminio se utiliza en el tratamiento de agua porque hay una cantidad definida de iones metálicos requeridos para retirar una determinada cantidad de contaminantes y el hierro es relativamente más barato. Las placas de aluminio también están encontrando uso en tratamiento de aguas residuales ya sea solo o en combinación con placas de hierro debido a la eficacia alta coagulación  $\text{Al}^{3+}$ . Cuando hay gran cantidad de iones  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$  en agua, el material del cátodo se recomienda ser acero inoxidable.

Aparte de enfoque técnico en cuantificar las interacciones entre las tecnologías de la Fundación y un enfoque económico sobre el costo relativo de la electrocoagulación, la investigación futura también debe examinar medios fiables de reducción de pasividad de los electrodos (Huijuan Liu, 2010).

#### **2.4.6. Mecanismos y Reacciones del Proceso de EC.**

Durante la electrólisis ocurren una serie de procesos físicos y químicos que permiten la remoción de los contaminantes. Estos procesos se pueden describir de la siguiente manera:

En los electrodos ocurren una serie de reacciones que proporcionan iones tanto positivos como negativos. El ánodo provee iones metálicos. A este electrodo se le conoce como electrodo de sacrificio, ya que la placa metálica que lo conforma se disuelve, mientras la placa que forma el cátodo permanece sin disolverse. (Holt, 2005)

Los iones producidos cumplen la función de desestabilizar las cargas que poseen las partículas contaminantes presentes en el agua. Cuando estas cargas se han neutralizado los sistemas que mantienen las partículas en suspensión desaparecen, permitiendo la formación de agregados de los contaminantes e iniciando así el proceso de coagulación.

Los iones que proveen los electrodos desencadenan un proceso de eliminación de contaminantes que se puede dar por dos vías: la primera por reacciones químicas y precipitación y la segunda procesos físicos de agregación de coloides, que dependiendo de su densidad pueden flotar o precipitar. (Huijuan Liu, 2010)

Las reacciones más importantes que pueden sufrir las partículas de contaminantes son: hidrólisis, electrólisis, reacciones de ionización y formación de radicales libres.

Estas reacciones cambian las propiedades del sistema agua-contaminantes, que conlleva a la eliminación de la carga contaminante del agua.

De acuerdo con la ley de Faraday, que rige el proceso de electrocoagulación, la cantidad de sustancias formadas en un electrodo es proporcional a la cantidad de cargas que pasan a través del sistema, y el número total de moles de sustancia formada en un

electrodo está relacionado estequiométricamente con la cantidad de electricidad puesta en el sistema.

A diferencia de la coagulación química, proceso en el cual el coagulante es adicionado al sistema como agente químico, en la electrocoagulación el coagulante es formado in situ mediante las reacciones dadas por la disolución de iones del metal que conforma el electrodo de sacrificio. Como se explicó anteriormente, la producción de iones metálicos se da en el ánodo y son los iones que, por oxidación electrolítica, dan origen a la sustancia química que hace las veces de coagulante.

Según es expuesto por Mohllah et al (Mollah, 2001) se considera que en el proceso de electrocoagulación intervienen tres etapas: inicialmente se forma el coagulante por oxidación electrolítica del metal del ánodo, luego se da la desestabilización de los contaminantes y emulsiones y, finalmente, se produce la formación de flóculos por agregación de partículas del contaminante o adsorción de éstas en el coagulante.

#### **2.4.7. Reacciones Involucradas en la EC.**

Los materiales más comúnmente utilizados como electrodos en la electrocoagulación son hierro y aluminio. Por esta razón se tratarán de manera especial las reacciones que se desarrollan manteniendo electrodos de estos dos metales en la celda. La bibliografía referenciada trata ampliamente estas reacciones, no sólo para hierro y aluminio, sino también aquellas reacciones que ocurren cuando los electrodos son de otros metales o materiales (Huijuan Liu, 2010).

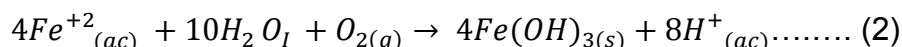
El proceso de electrocoagulación es afectado por diferentes factores. Entre los más importantes se encuentran la naturaleza y concentración de los contaminantes, el pH del agua residual y la

conductividad. Estos factores determinan y controlan las reacciones ocurridas en el sistema y la formación del coagulante.

Para el caso en el cual el hierro actúa como ánodo, se han propuesto dos mecanismos que explican la formación in situ de dos posibles coagulantes. Estos pueden ser hidróxido ferroso  $Fe(OH)_2$  o hidróxido férrico  $Fe(OH)_3$ .

**Mecanismo 1:** Formación del hidróxido férrico

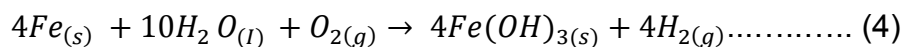
En el ánodo ocurren las siguientes reacciones de oxidación:



En el cátodo ocurre la reacción:

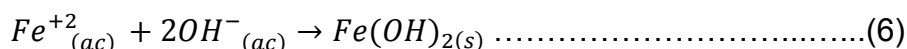


Reacción global:

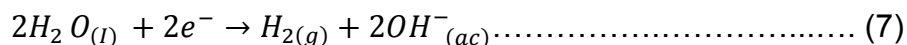


**Mecanismo dos:** Formación del hidróxido ferroso

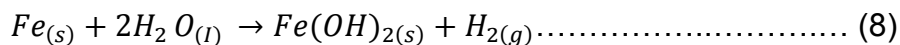
En el ánodo se dan las reacciones:



En el cátodo:



Reacción global:

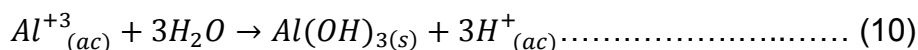


Luego de la formación de los hidróxidos de hierro los coloides se aglomeran, especialmente aquellos con carga negativa, y posteriormente otras partículas de contaminantes interactúan con

estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas.

Cuando el aluminio actúa como ánodo las reacciones son las siguientes.

En el ánodo:



En el cátodo:



Los iones  $Al^{+3}$  en combinación con los  $OH^{-}$  reaccionan para formar algunas especies monoméricas como:

$Al(OH)_2^{+}$ ,  $Al_2(OH)_2^{+}$ ,  $Al(OH)_2^{+}$ , y otras poliméricas, tales como  $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ ,  $Al_7(OH)_{17}^{4+}$ ,  $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ ,  $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$  y  $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$ .

Que por procesos de precipitación forman el  $Al(OH)_{3(s)}$ , como se muestra en la reacción de ánodo. El  $Al(OH)_{3(s)}$  es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que expone una gran área superficial con propiedades absorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes (Huijuan Liu, 2010).

#### 2.4.8. Reactores para el Proceso de EC.

Los reactores para la electrocoagulación pueden clasificarse en primera instancia como reactores tipo batch o reactores de sistema continuo. La selección de uno de estos tipos de reactor depende de las características del contaminante y de su concentración, así como de las cantidades de agua residual a tratar. (Restrepo, 2006)

Una segunda clasificación de los reactores está dada en función de la flotación. Una vez que el contaminante ha sufrido el proceso de

coagulación existen dos formas de separarlo del medio acuoso, a saber: flotación y sedimentación. Así pues, los reactores pueden diseñarse como reactores con sólo coagulación, o con coagulación y flotación. Son llamados reactores de sólo coagulación aquellos que no aprovechan la electrocoagulación para generar burbujas que separen los agregados (flóculos) del contaminante por flotación, mientras que los reactores en los que se aprovechan las burbujas generadas para realizar la flotación de los agregados del contaminante, reciben el nombre de reactores de coagulación y flotación. (Restrepo, 2006)

Seguidamente describiremos a más detalle cada tipo de reactor:

- **Tipo Bach**

El reactor tipo bach, encontramos que éste debe operar con un volumen determinado de agua residual para tratar en un ciclo. Tiene como desventaja que sus condiciones cambian con el tiempo, pero tiene también la ventaja de ser simple y de bajo costo para el tratamiento localizado de aguas. (Luis F. Garcés, 2007)

El reactor utilizado para realizar la electrocoagulación en una operación por bach, en su forma más simple, está formado por una celda electroquímica con un ánodo y un cátodo dispuestos en forma vertical y conectada a una fuente de energía externa. El material anódico se corroe eléctricamente debido a la oxidación, mientras que el cátodo permanece pasivo.

El diseño formado por un par de electrodos no es el más adecuado a la hora del proceso ya que para obtener una adecuada disolución del metal se requiere de electrodos de gran área superficial, es por esta razón que se utilizan celdas con electrodos monopolares en paralelo o conectados en serie.

El sistema para la electrocoagulación requiere de una fuente de corriente directa, un regulador de densidad de corriente y de un multímetro para leer los valores de corriente. En la figura 2.6 se muestran dos reactores para electrocoagulación con electrodos en paralelo (Mollah, 2001).

- **Monopolar**

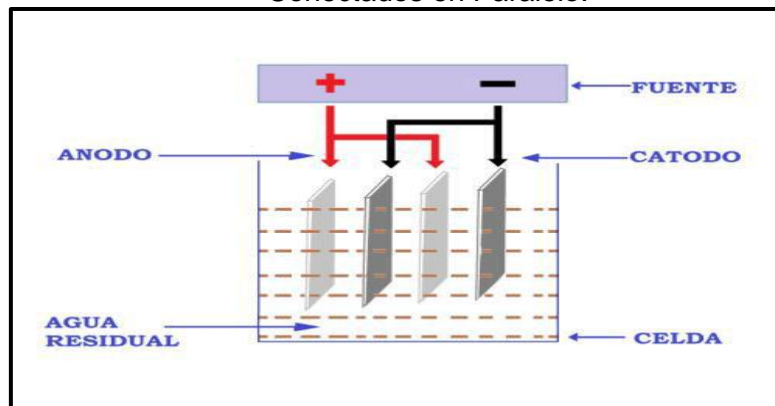
Los electrodos están conectados en paralelo y sometidos al mismo potencial, lo cual genera mayor gasto de energía.

- **En Paralelo**

En la disposición monopolar en paralelo la corriente eléctrica se reparte entre todos los electrodos en relación a la resistencia de las células individuales. (Mollah, 2001)

En la siguiente figura se aprecia la distribución de los electrodos.

Figura 2.11. Reactor con Electrodos Monopolares Conectados en Paralelo.



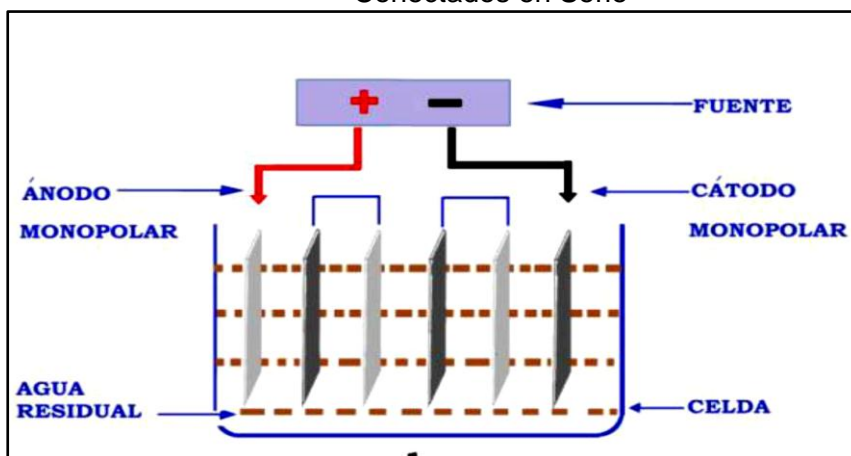
Fuente: (Mollah, 2001)

- **En Serie**

La disposición electrodos monopolares en serie se observa que cada par de electrodos de sacrificio " está conectado internamente uno con el otro, y no tiene interconexiones con los electrodos externo. Esta disposición de electrodos monopolares con celdas en serie es eléctricamente similar a una única célula

con muchos electrodos e interconexiones. En disposición en serie de electrodos, se requiere una diferencia de potencial más alto se requiere para una corriente dada porque las células conectadas en serie tienen una mayor resistencia. (Mollah, 2001)

Figura 2.12. Reactor con Electrodos Monopolares Conectados en Serie

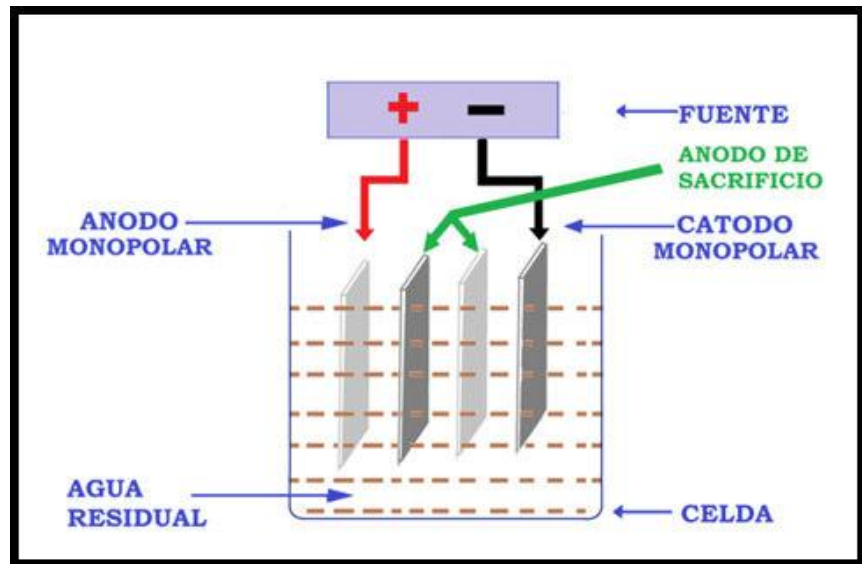


Fuente: (Mollah, 2001)

La configuración bipolar trabaja a menor intensidad y mayor voltaje que la monopolar. Las celdas bipolares tienen la ventaja de la sencillez de su disposición, ya que sólo es necesaria la conexión de dos electrodos (electrodos alimentadores), y por tanto el espacio entre los electrodos puede ser más pequeño. Sin embargo, el elevado potencial entre los electrodos alimentadores también origina que una parte de corriente fluya a través de la disolución causando un bypass de corriente a los electrodos bipolares y produciendo por tanto pérdidas de corriente, lo que debe ser tenido en cuenta a la hora de prever el efecto sobre la producción y el tiempo de vida de electrodos. (Mollah, 2001)



Figura 2.13. Reactor con Electrodo Bipolares Conectados en Paralelo.



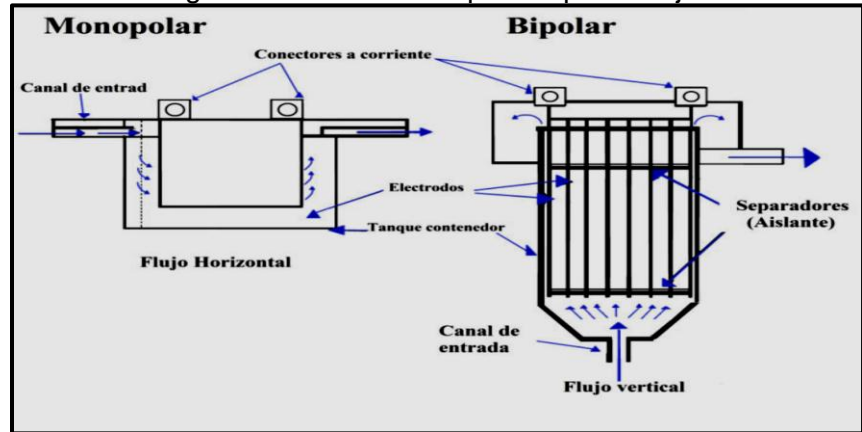
Fuente: (Mollah, 2001)

- **Reactores por el tipo de flujo**

Los reactores se pueden clasificar en unidades de flujo horizontal y vertical.

Esta disposición puede tener importancia cuando se pretende aprovechar el movimiento provocado por el oxígeno y el hidrógeno generados en los procesos anódicos y catódicos de oxidación y reducción del agua, respectivamente. Además, en función del modo de circulación del agua a tratar entre los electrodos, se pueden encontrar celdas de canales múltiples o bien de un sólo canal, tal y como se observa en la siguiente figura 2.9. La ventaja de las celdas de canales múltiples se encuentra en la sencillez de su disposición. Sin embargo debido al pequeño caudal de electrolito en cada uno de los canales, esta disposición puede favorecer el fenómeno de pasivación de los electrodos. (Chen, 2004)

Figura 2.14. Reactores por el tipo de flujo.

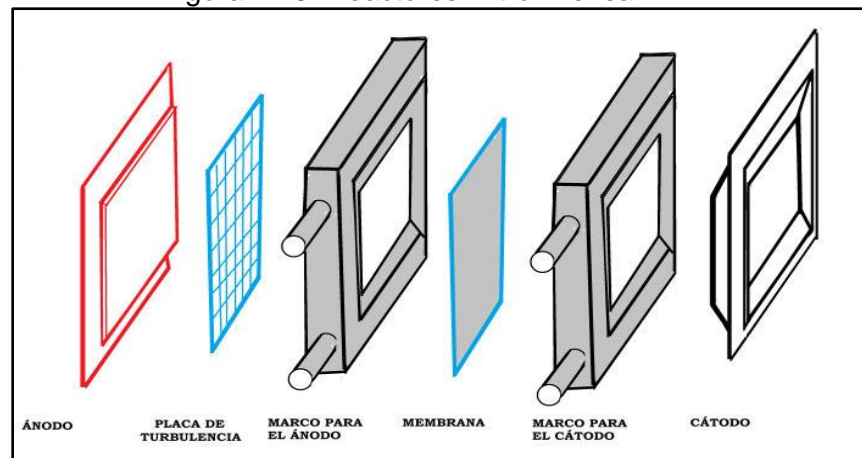


Fuente: (Chen, 2004)

- **Reactor filtro prensa**

Uno de ellos es el tipo filtro prensa, constituido por un par de marcos. Uno de ellos soporta el ánodo y el otro el cátodo en forma de placas, de manera que su acople forma una cámara como se muestra en la figura 2.10. El agua a ser tratada entra por la parte lateral a la cámara y es inducida a flujo turbulento, para incrementar la eficiencia del proceso. Este sistema hace que su operación y mantenimiento sean relativamente simples. (Restrepo, 2006)), (Chen, 2004)

Figura 2.15. Reactores Filtro Prensa

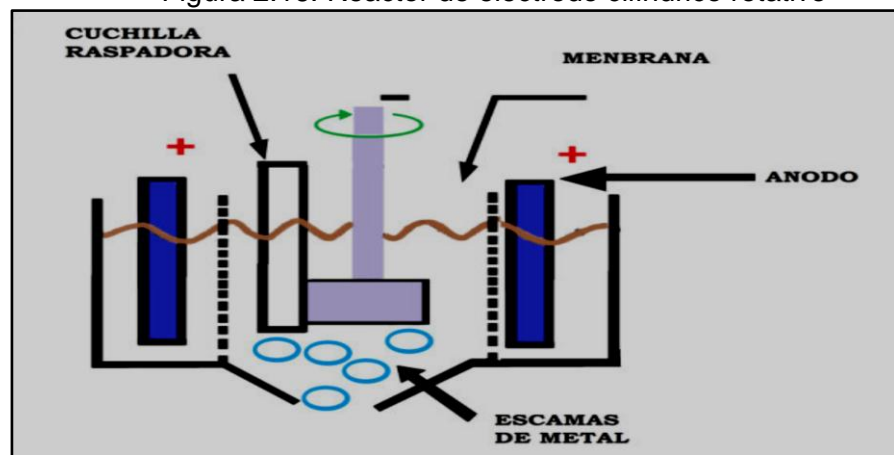


Fuente: (Chen, 2004)

- **Reactor de electrodo cilíndrico rotativo**

Para la remoción de metales se usa el reactor de electrodo cilíndrico rotativo en el cual el cátodo gira en el centro de la celda y el ánodo se encuentra fijo como se muestra en la siguiente figura. Esta disposición permite aumentar la transferencia de masa en los electrodos y remover partículas de metal del cátodo. (Chen, 2004).

Figura 2.16. Reactor de electrodo cilíndrico rotativo



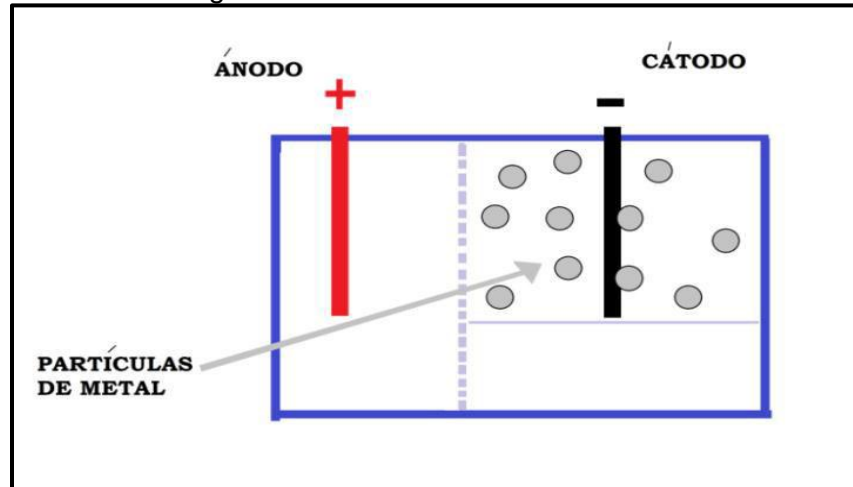
Fuente: (Chen, 2004)

- **Reactor de Lecho Fluidizado**

Finalmente, también es usado para la remoción de metales, un reactor de lecho fluidizado mostrado en la figura 12. Este permite aumentar el área específica superficial mejorando la eficiencia del proceso.

Los materiales usados en el ánodo deben ser dimensionalmente estables, por ejemplo como el acero que se utiliza en los reactores para la recuperación de metales. Los electrodos más modernos son fabricados de titanio con una pequeña capa de óxidos de metales nobles. Sin embargo, el material más comúnmente utilizado es el aluminio. El cátodo puede ser de metal, grafito, fibras de carbón, acero o titanio (Chen, 2004).

Figura 2.17. Reactor de lecho fluidizado.



Fuente: (Chen, 2004)

#### 2.4.9. Características Generales del Fósforo.

Símbolo P, número atómico 15, peso atómico 30.9738. El fósforo forma la base de gran número de compuestos, de los cuales los más importantes son los fosfatos. En todas las formas de vida, los fosfatos desempeñan un papel esencial en los procesos de transferencia de energía, como el metabolismo, la fotosíntesis, la función nerviosa y la acción muscular. Los ácidos nucleicos, que entre otras cosas forman el material hereditario (los cromosomas), son fosfatos, así como cierto número de coenzimas. Los esqueletos de los animales están formados por fosfato de calcio (Sharpe, 1993).

##### a) Compuestos del Fósforo.

Los fosfatos y compuestos de fósforo se encuentran en las aguas naturales en pequeñas concentraciones. Su origen es el lixiviado de los terrenos que atraviesa, o por contaminación orgánica. Actualmente existe una fuente contaminante de fósforo artificial, por el uso de los detergentes polifosfatados. Los fosfatos están directamente relacionados con la eutrofización de lagos y pantanos. En lo referente a las aguas de consumo humano, un contenido elevado modifica las características organolépticas y

dificulta la floculación - coagulación en las plantas de tratamiento. Es uno de los factores a tener en cuenta cuando hay un desarrollo exuberante de algas en una conducción de agua. La forma asimilable del fósforo es el ión fosfato, aunque en el agua a veces se encuentran compuestos fosforados en estado coloidal o en forma de fósforo elemento (Irdemez S., 2006).

- **Fosfato.**

Son las sales o los Ésteres del ácido fosfórico. Tienen en común un átomo de fósforo rodeado por cuatro átomos de Oxígeno en forma tetraédrica. Los fosfatos secundarios y terciarios son insolubles en agua, a excepción de los de Sodio, Potasio y amonio. (Cajiao, 2009)

- **Los ortofosfatos.**

Los fosfatos más comunes son los ortofosfatos. (Con el prefijo "orto" se suelen denominar los ácidos más hidratados). Contienen el anión  $\text{PO}_4^{3-}$ .

Los ortofosfatos se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza, sobre todo en forma de apatito y forman parte esencial de dientes y huesos.

También son compuestos indispensables en la formulación de los abonos minerales. Su ausencia limita el crecimiento de las plantas. Habitualmente en jardinería se utilizan Abonos ricos en fosfato para inducir y fortalecer la floración.

En la industria alimenticia los ortofosfatos, se utilizan por ejemplo en la elaboración de queso procesado. (Cajiao, 2009)

Un aporte suficiente de fósforo en forma de fosfato es esencial para el buen funcionamiento del cuerpo humano ya que interviene en los procesos bioquímicos más elementales. En experimentos con ratas y ratones no se han detectado

efectos tóxicos con dosis de hasta varios gramos por kilo de animal.

Los fosfatos forman una parte importante de la carga en las aguas residuales. Pueden ser eliminados por métodos fisicoquímicos precipitándolos con cloruro ferrico ( $\text{FeCl}_3$ ) o son retenidos en los fangos activos que se separan y luego pueden ser reconvertidos para abonos orgánicos (Cajiao, 2009).

**b) Papel Biológico.**

Los compuestos de fósforo intervienen en funciones vitales para los seres vivos, por lo que está considerado como un elemento químico esencial, aunque recientes experimentos apuntan que algunas formas de vida pudieran sustituirlo por arsénico. Forma parte de la molécula de Pi («fosfato inorgánico»), así como de las moléculas de ADN y ARN y de los fosfolípidos en las membranas lipídicas. Las células lo utilizan para almacenar y transportar la energía mediante el adenosín trifosfato. Además, la adición y eliminación de grupos fosfato a las proteínas, fosforilación y desfosforilación, respectivamente, es el mecanismo principal para regular la actividad de proteínas intracelulares, y de ese modo el metabolismo de las células eucariotas tales como los espermatozoides. (Irdemez S., 2006)

**c) Aplicaciones.**

El fósforo rojo se usa, junto al trisulfuro de tetrafósforo,  $\text{P}_4\text{S}_3$ , en la fabricación de fósforos de seguridad. El fósforo puede utilizarse para: pesticidas, pirotecnia, bombas incendiarias, bombas de humo, balas trazadoras, etc. El fósforo (sobre todo blanco y rojo) se emplea principalmente en la fabricación de ácido fosfórico, fosfatos y polifosfatos (detergentes). El pentaóxido de fósforo se utiliza como agente desecante. El hidruro de fósforo,  $\text{PH}_3$

(fosfina), es un gas enormemente venenoso. Se emplea en el dopado de semiconductores y en la fumigación de cereales. El trisulfuro de tetrafósforo constituye la masa incendiaria de las cerillas. Los fosfatos se usan en la producción de vidrios especiales, como los usados en las lámparas de sodio. El fosfato de calcio tratado con ácido sulfúrico origina superfosfato. tratado con ácido fosfórico origina superfosfato doble. Estos superfosfatos se utilizan ampliamente como fertilizantes. La ceniza de huesos, compuesta por fosfato de calcio, se ha usado para fabricar porcelana y producir fosfato monocálcico, que se utiliza en polvos de levadura panadera (Irdemez S., 2006).

**d) Contaminación por Fósforo.**

El fósforo blanco es la forma más peligrosa de fósforo que es conocida, provocando irritación de los ojos, la piel y el tracto respiratorio. Su inhalación puede originar edema pulmonar cuyos síntomas no aparecen hasta pasadas unas horas, produciéndose un agravamiento con el esfuerzo físico. Con altas concentraciones, a intervalos de exposición cortos, la sustancia puede tener efectos sobre el hígado y los riñones, llegando a producir la muerte. Una exposición repetida o prolongada al fósforo blanco, puede afectar a los huesos, provocando una degeneración ósea. Con respecto a su afección al medio ambiente, el incremento de la concentración de fósforo en las aguas superficiales provoca el crecimiento de organismos dependientes del fósforo, como son las algas. Estos organismos consumen grandes cantidades de oxígeno, provocando un déficit del mismo en los ríos, lagos y embalses. (Cajiao, 2009)

El fósforo proveniente de los residuos de la industria láctea el cual muchas veces es derramado a los cuerpos de agua sin ser aprovechado y sin darle un tratamiento previo, clasificándolo

como un fuerte contaminante provocando un problema ambiental (García, 2012).



## **CAPÍTULO III**

### **3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO**

#### **3.1. Metodología.**

##### **3.1.1. Diseño, Construcción y Montaje del Sistema de EC Para el Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Láctea.**

El sistema opera como reactor batch a escala prototipo, con capacidad para tratar dos litros de aguas residuales.

Consta de una celda electrolítica de dos litros en la cual están sumergidos los electrodos, estos electrodos son placas rectangulares metálicas de hierro y aluminio dispuestas en paralelo y conectadas a una fuente de voltaje de corriente directa que proporciona la corriente eléctrica requerida para la electrocoagulación.

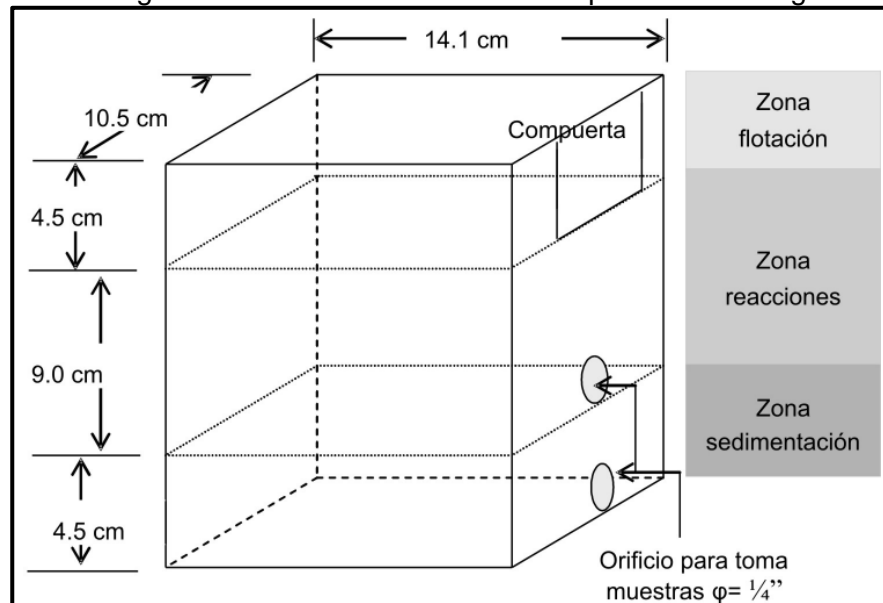
La fuente de voltaje posee controles de corriente y voltaje regulables e independientes. (Alvaro Arango Ruiz, 2007)

- **Celda de Electrocoagulación.**

La celda para electrocoagulación se diseñó considerando una distribución volumétrica que contempla tres regiones: una región

superior para el depósito de los lodos de flotación o lodos menos densos y las espumas, llamada zona de flotación, una región media de reacciones electroquímicas, llamada zona de reacción en donde se encuentran los electrodos y una región inferior, llamada zona de sedimentación dónde se depositan los lodos de precipitación o lodos más densos. Esto se puede observar en la figura 3.1.

Figura 3.1. Dimensiones de la celda para electrocoagulación



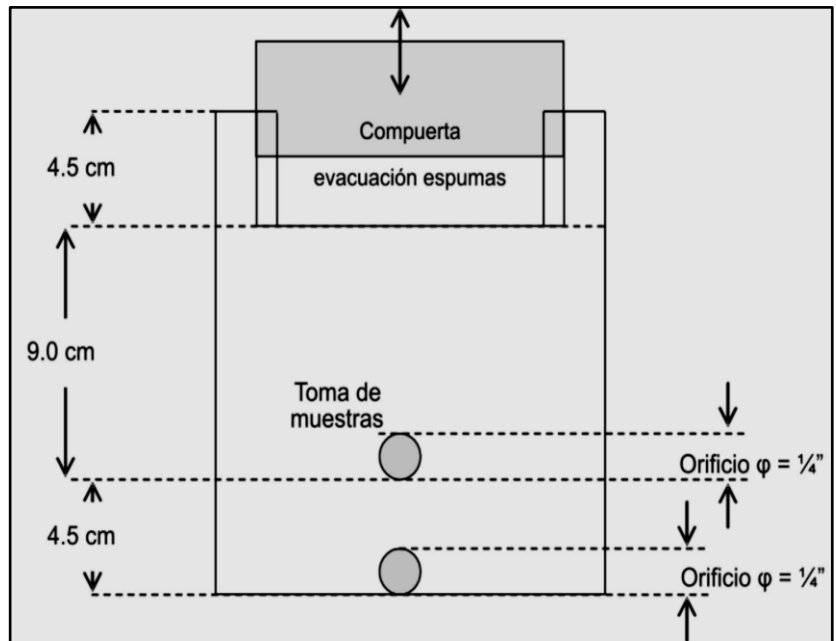
Fuente: (Alvaro Arango Ruiz, 2007)

La zona de flotación y la de sedimentación equivalen cada una a  $\frac{1}{4}$  del volumen total de la celda (2.7 L), 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.

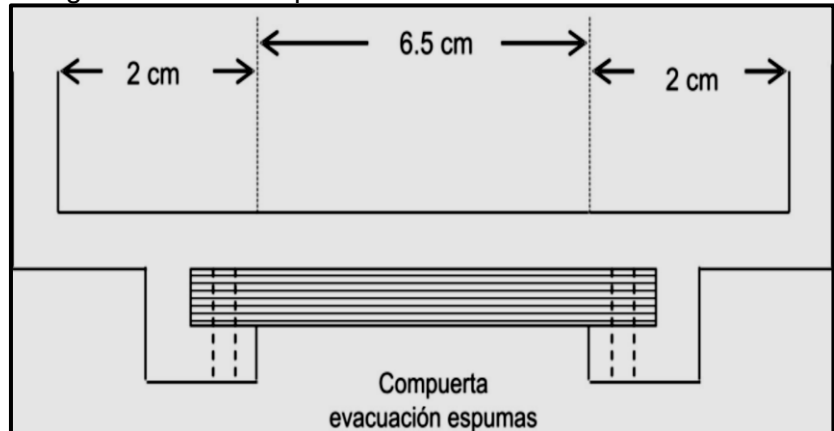
En las Figuras 3.2 y 3.3 se muestran los detalles de la compuerta para espumas y la ubicación de los orificios para la toma de las muestras y finalmente en la figura 3.4 se observa la celda terminada.

Figura 3.2. Detalle cara toma de muestras y evacuación de lodos



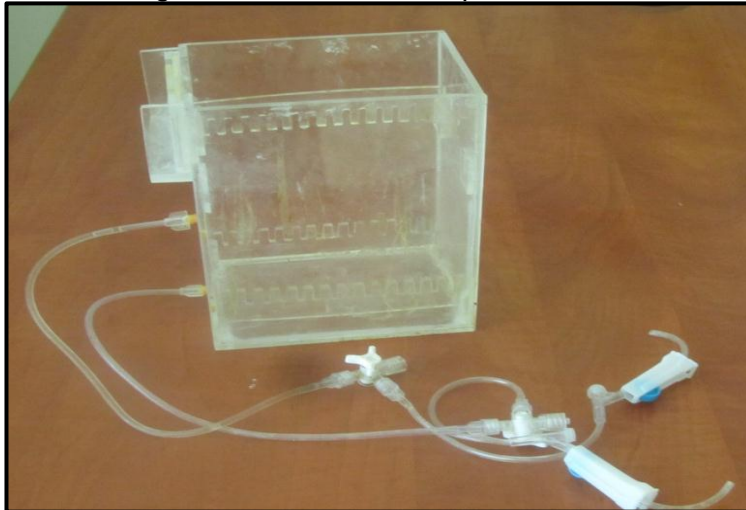
Fuente: (Alvaro Arango Ruiz, 2007)

Figura 3.3. Vista superior del sistema de evacuación de lodos



Fuente: (Alvaro Arango Ruiz, 2007)

Figura 3.4. Celda electroquímica



Fuente: Elaboración propia.

#### **3.1.1.1. Selección del Material de los Electroodos, Número de Electroodos y Dimensiones.**

Se probaron electrodos de hierro y aluminio por las siguientes razones:

- Disponibilidad de los metales.
- Son materiales relativamente baratos.
- Amplia información bibliográfica en la que se reportan buenas remociones de contaminantes con estos materiales en la electrocoagulación, adicionalmente son los metales más utilizados en el proceso (Kobyá, 2003 y Chen, 2002).

Los electrodos se diseñaron como placas rectangulares dispuestas en serie. Comercialmente estos metales se encuentran disponibles como láminas de 3 mm de espesor. Se estableció una distancia de 2 cm entre el arreglo de placas y cada una de las caras laterales de la celda, para permitir de esta forma el flujo del agua residual durante la electrólisis.

Una distancia de 1.25 cm entre la cara frontal y los electrodos, igualmente 1.25 cm entre estos y la cara posterior de la celda. (Alvaro Arango Ruiz, 2007)

El número de electrodos se determinó suponiendo una separación máxima entre electrodos de 14 mm más 3 mm del espesor de cada placa, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\text{Numero de electrodos} = \frac{(\text{ancho de la celda}) - 2 * (\text{dist. electrodos a cara lateral})}{(\text{dist. maxima entre electrodos} + \text{espesor de placa})}$$

Entonces:

$$\text{Numero de electrodos} = \frac{140 - 2 * 20}{(14 + 3)} = 5.88 \approx 6$$

Figura 3.5. *Electrodos de sacrificio.*



De esta forma se tienen tres placas de un metal conectadas al ánodo y las otras tres placas del otro metal conectadas al cátodo, todo esto formando un arreglo intercalado y en paralelo de electrodos como se puede observar en la figura 3.6. Adicionalmente los electrodos deben tener una altura igual a la altura de la zona de reacción en la celda, esto es 9 cm.

Figura 3.6. Disposición de los electrodos en la celda



### 3.1.1.2. Fuente de Voltaje.

Para el diseño de la fuente se establecieron los rangos de corriente eléctrica y voltaje de trabajo con base en una densidad de corriente de 10 a 20  $A/m^2$  rango promedio reportado en la bibliografía con buenos resultados en la remociones de contaminantes, adicionalmente teniendo en cuenta la conductividad de las aguas residuales a y con la ayuda de la Ecuación (14), que permite realizar un estimativo de estos parámetros eléctricos. (Alvaro Arango Ruiz, 2007)

El voltaje total requerido en la celda de electrocoagulación se calculó de acuerdo a la forma de conexión de los electrodos, de forma bipolar, en la cual el voltaje total que entrega la fuente se calcula.

En el caso de la conexión monopolar el voltaje total será igual al voltaje entre los electrodos ( $U_0$ ). En el caso de la conexión bipolar el voltaje se calcula como:

$$U = (N - 1) U_0 \dots\dots\dots (14)$$

Con:

$U_0$ : voltaje entre los electrodos

$N$ : número de electrodos.

$U$ : voltaje total.

Con estos valores como parámetros mínimos requeridos en la experimentación, se utilizó una fuente con corriente máxima de 20 A y voltaje de 30 V. Obteniendo de esta manera, un equipo con mayor posibilidad de movilidad por rangos más amplios de voltaje y amperaje.

La fuente tiene dos controles, uno para variar el voltaje y otro para variar la corriente eléctrica, la medición de la corriente eléctrica se realiza con un amperímetro digital cuya escala es de 0.1 A y el voltaje se mide en un voltímetro digital con escala de 0.1V, todo el equipo tiene conexión a 110 V ac monofásico. (Alvaro Arango Ruiz, 2007)

La fuente de poder utilizada en las pruebas definitivas nos permitió regular la cantidad de corriente suministrada a la celda para el proceso de electrocoagulación, esta tenía una capacidad de suministrar hasta 20 amperios y un voltaje de 0 a 30 V, los cuales se podrían monitorear con medidores digitales de amperaje y voltaje. La verificación de las lecturas de los medidores digitales de intensidad de corriente se utilizó una pinza amperimétrica, un voltímetro y un cronometro para mediciones de tiempo.

Para el suministro de corriente continua a los electrodos se utilizaron cables de uso eléctrico y cocodrilos para conectarlos a las placas de hierro y aluminio.

Figura 3.7. Fuente de poder.



Figura 3.8. Cocodrilos.



En la figura 3.9 se observan el equipo utilizado en laboratorio.

Figura 3.9. Equipo de electrocoagulación.





### 3.1.2. Pruebas Experimentales

El trabajo se desarrolló en el laboratorio de la Universidad Alas Peruanas–Filial Huancayo, utilizando un equipo de electrocoagulación el cual permitió controlar las variables independientes en la recuperación de fósforo.

Se inició con la modificación del pH del lactosuero ácido residual con agua destilada e hidróxido de sodio a una razón de pH 7 y pH 8, manteniendo una muestra con el pH inicial 4.5 y se procedió con la metodología siguiente:

El tratamiento experimental en el cual se dividieron las muestras en grupos, tal como se muestra en el diseño experimental ( $3^2 = 9$ , tres niveles, dos variables independientes) variando en este caso el pH y el tiempo de retención hidráulica.

En el primer tratamiento se tomó 1.5 L de la muestra de lactosuero y se inició el proceso de electrocoagulación tomando el pH inicial de 4.5, a tres tiempos de muestreo (1, 2 y 3 horas), en el cual se determinara el pH y tiempo óptimo de recuperación máxima de fósforo.

En el segundo tratamiento se tomó 1,5 L de la muestra de lactosuero, al cual se le modificó el pH a 7 con una solución de hidróxido de sodio a 0,1N y se inició el proceso de electrocoagulación tomando tres tiempos de muestreo (1, 2 y 3 horas), en el cual se determinara el pH y tiempo óptimo de recuperación máxima de fósforo.

En el tercer tratamiento se tomó 1,5 L de la muestra de lactosuero, al cual se le modificó el pH a 8 con una solución de hidróxido de sodio 0,1 N, y se inició el proceso de electrocoagulación tomando tres tiempos de muestreo (1, 2 y 3 horas), en el cual se determinara el pH y tiempo óptimo de recuperación máxima de fósforo.

Estos tratamientos se realizaron con una repetición para tener mayor precisión, lo cual nos permitirá una mejor discusión de resultados.

Se pasó a retirar los electrodos con los que se trabajó, y luego a retirar los compuestos electrocoagulados los cuales se extendieron en toda la superficie, utilizando una paleta.

Una vez retirado la capa electrocoagulada se dejó en reposo por un tiempo de 20 min. Para que los sólidos suspendidos se sedimenten o precipiten.

Terminada esta fase se procedió a la respectiva recolección de datos referido a la concentración de fosforo en el lactosuero acido residual, la cual se determinara mediante técnica de 4500-D  $\text{PO}_4$  Cloruro estanoso, además se determinará el pH y el tiempo de retención hidráulica óptimos para un mejor porcentaje de recuperación de fósforo mediante el proceso de electrocoagulación.

A continuación desde la figura 3.4 a la 3.13 podemos observar todo el proceso de tratamiento del efluente con el equipo de electrocoagulación, evidenciando el buen rendimiento en la remoción de contaminantes.

Figura 3.10. Lactosuero inicial.



Figura 3.11.A 1 hora del tratamiento

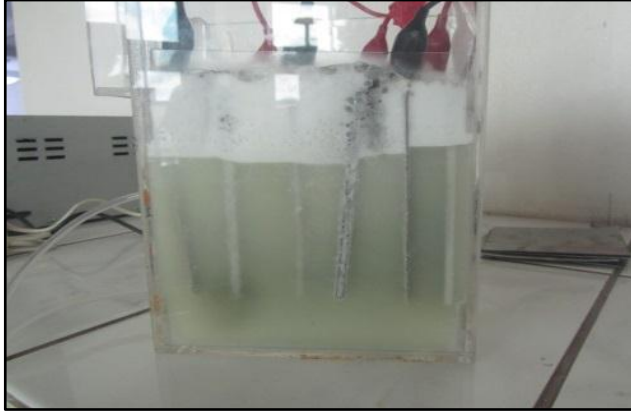


Figura 3.12. Formación de lodos



Figura 3.13. A 2 horas de tratamiento.

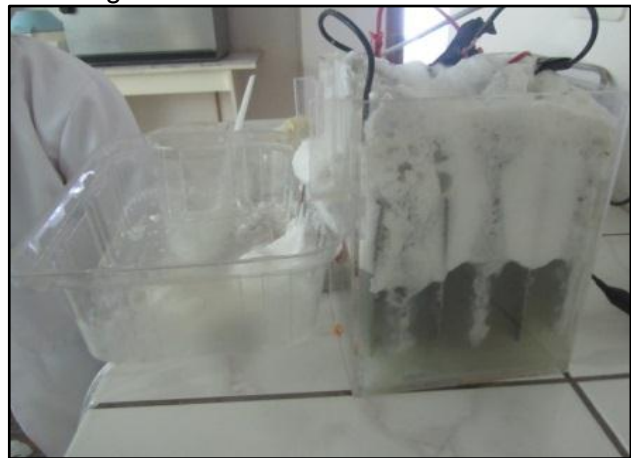


Figura 3.14. *Formación de lodos*

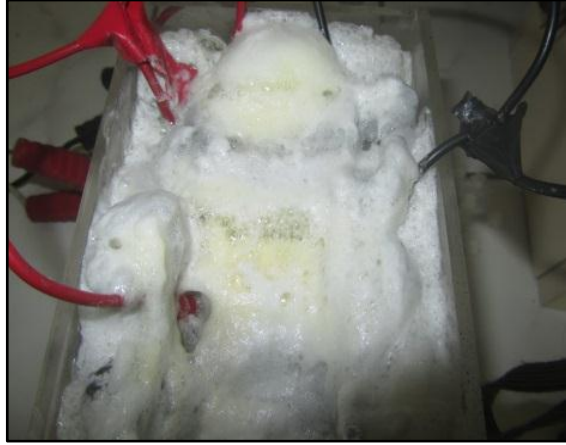


Figura 3.15. *A 3 horas de tratamiento*

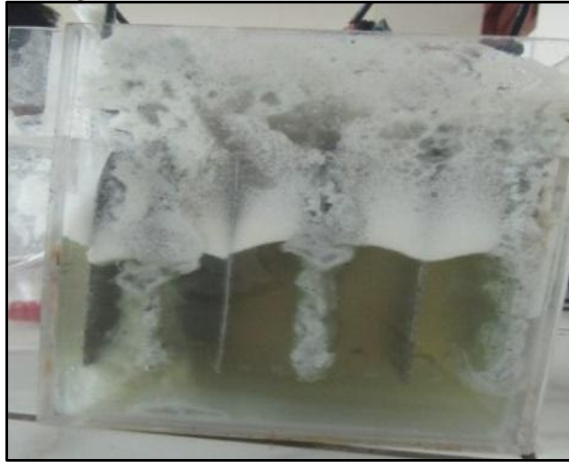


Figura 3.16. *Efluente inicial y final.*



### 3.1.3. Tipo de la Investigación

El tipo de investigación es experimental; para analizar el efecto producido por la acción o manipulación de las variables independientes (proceso de electrocoagulación) sobre la variable dependiente (recuperación de fósforo).

### 3.1.4. Nivel de la Investigación

De acuerdo a la naturaleza de la investigación reúne por su nivel las características de un estudio correlacional, donde se tiene por finalidad explicar el comportamiento de las variables independientes (proceso de electrocoagulación), encontrando relación causa-efecto.

Donde se requiere un control metodológico y estadístico.

### 3.2. Diseño de la Investigación.

El diseño experimental utilizado en la investigación es un diseño experimental de tipo factorial ( $3^2 = 9$  por dos indicadores nos da un total de 18 experimentos; donde existen 2 factores o variables independientes y 3 niveles de los factores), en el cual se estimaran los efectos de 2 factores experimentales que son el tiempo de retención hidráulica y el pH sobre la variable dependiente (recuperación de fósforo). Como se muestra en el diseño se tendrá 9 experimentos por cada tipo de indicador, los mismos que tendrán 1 repetición. Por lo que se tendrá un total de 36 experimentos.

Figura 3.17. Diseño de la Investigación

N° PRUEBAS	X1=Tiempo de retención hidráulica			X2= pH		
	BAJO	MEDIO	ALTO	BAJO	MEDIO	ALTO
1	1	0	0	1	0	0
2	0	1	0	1	0	0
3	0	0	1	1	0	0
4	1	0	0	0	1	0

5	0	1	0	0	1	0
6	0	0	1	0	1	0
7	1	0	0	0	0	1
8	0	1	0	0	0	1
9	0	0	1	0	0	1

Referencia: Elaboración propia.

En el siguiente cuadro podemos observar el diseño factorial real y con su respectiva codificación y el número de pruebas a realizar.

Figura 3.18 Diseño Factorial Codificada y Real

N° PRUEBAS	CODIFICADO		REAL	
	X1	X2	THR (hora)	pH
1	1+	1+	1	4.5
2	0	1+	2	4.5
3	1-	1+	3	4.5
4	1+	0	1	7
5	0	0	2	7
6	1-	0	3	7
7	1+	1-	1	8
8	0	1-	2	8
9	1-	1-	3	8

Referencia: Elaboración Propia

### 3.3. Hipótesis de la Investigación

#### 3.3.1. Hipótesis General

- Se recuperó fósforo mediante el proceso de electrocoagulación del lactosuero ácido residual.

### **3.3.2. Hipótesis Específicas**

- Se recuperará 84% de fósforo con el tratamiento de Electrocoagulación del lactosuero acido residual.
- El efecto del proceso de electrocoagulación es favorable en la recuperación de concentraciones de fósforo del lactosuero acido residual.
- El tiempo de retención hidráulica y el pH influyen en la recuperación de fósforo del lactosuero acido residual mediante el proceso de electrocoagulación.
- La eficiencia del proceso de electrocoagulación en la recuperación de fósforo es de un 84%.

### **3.4. Variables**

#### **3.4.1. Variable Independiente**

- Proceso de electrocoagulación.

#### **Indicadores.**

- Tiempo de retención hidráulica (Horas)
- Índice de acides (pH)

#### **3.4.2. Variable Dependiente**

- Recuperación de fósforo.

### **3.5. Cobertura del Estudio.**

#### **3.5.1. Universo.**

Lactosuero acido residual de los productos lácteos elaborados en el distrito de Yanacancha - Junín

#### **3.5.2. Población.**

Con un tamaño de muestra aproximado ( $n^\circ$ ) de 1,5 litros, valor de significancia ( $Z\alpha$ ) del 0,5367, y un error de tolerancia

de investigación o precisión del 10% y un nivel de confianza del 85,27%, se define que la población es infinita

### **3.5.3. Muestra.**

El lactosuero ácido residual de los productos lácteos elaborados en el distrito de Yanacancha, en razón de 54 L para todo el análisis experimental y 1,5 L por experimento.

### **3.5.4. Muestreo.**

Muestreo aleatorio simple, donde los elementos de la muestra se eligen al azar, directamente y en una sola etapa. El muestreo aleatorio simple se aplica fundamentalmente en poblaciones pequeñas y plenamente identificables donde cada individuo de la población tiene las mismas posibilidades de ser seleccionado en la muestra.

## **3.6. Técnicas e Instrumentos.**

### **3.6.1. Técnicas de la Investigación.**

Observación de procesos experimentales según la manipulación de las variables, trabajos de investigación realizados con características semejantes, revistas y libros de investigación.

### **3.6.2. Instrumentos de la Investigación.**

Los instrumentos de la investigación son los reportes de los procesos experimentados por el laboratorio correspondiente, los resúmenes de los trabajos de investigación, los reportes de campo.

## **3.7. Procesamiento estadístico de la información.**

### **3.7.1. Estadísticos.**



Se utilizó un software estadístico denominado Minitab, para los análisis de medidas de dispersión, correlación de Pearson.

### **3.7.2. Representación.**

Las representaciones de la parte experimental se dieron por medio de reportes de laboratorio y gráficas, las relaciones de variables mediante ecuaciones y los análisis estadísticos según el software estadístico desarrollado.

### **3.7.3. Técnica de comprobación de la hipótesis.**

Para el trabajo de investigación se utilizó el análisis de varianza mediante un Anova de Tukey.

## CAPITULO IV

### 4. ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1. Resultados.

##### 4.1.1. Parámetros Evaluados en las Pruebas Experimentales.

Figura 4.1. Resultados de Remoción de Fosfato con pH 8

Tiempo (Horas)	Voltaje (V)	I. Corriente (A)	pH	Po (mg/L)	Pf (mg/L)
1	5,0	14	8,1	242,22	167,18
2	5,4	12	7,9	242,22	98,54
3	5,2	14	8,1	242,22	42,70
4	5,0	14	8,0	242,22	39,25

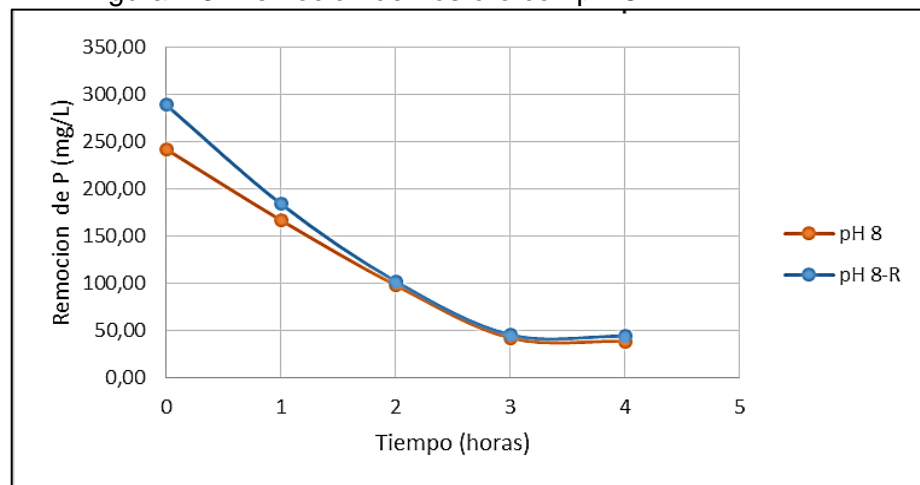
En la tabla 4.1 se encuentran los resultados del monitoreo de los parámetros de la primera prueba experimental, tiempo de 1 a 4 horas, voltaje promedio de 5,2 voltios, con una intensidad de corriente promedio de 13,5 amperios, pH promedio 8, concentración inicial de fosfato 242,22 mg/L y con un fosfato final de 39,25 mg/L.

Figura 4.2. Resultados de Remoción de Fosfato con pH 8 - Réplica

Tiempo (Horas)	Voltaje (V)	I. Corriente (A)	pH	Po (mg/L)	Pf (mg/L)
1	5,0	14	8,00	289,10	184,45
2	5,0	12	8,00	289,10	102,40
3	5,2	12	8,20	289,10	45,87
4	5,1	14	8,10	289,10	44,50

En la tabla 4.2 se encuentran los resultados del monitoreo de los parámetros de la réplica de la primera prueba experimental, tiempo de 1 a 4 horas, voltaje promedio de 5,1 voltios, con una intensidad de corriente promedio de 13 amperios, pH promedio 8,1 concentración inicial de fosfato 289,10 mg/L y con un fosfato final de 44,50 mg/L.

Figura 4.3. Remoción de Fósforo con pH 8



La figura 4.1 muestra la relación tiempo y remoción de fósforo donde se observan los resultados del primer tratamiento con su respectiva réplica, con un tiempo de 1 a 4 horas y un pH 8 donde la disminución de fosfato inicial es de 242,22 mg/L a 39,25 mg/L, no existiendo variaciones en los resultados por lo cual se obtendrá un promedio de cada punto experimental. Se muestran los resultados de pH, % de eficiencia en la remoción de fósforo, conforme se incrementa el tiempo de electrocoagulación, cuando se

impone un potencial de celda de 5,67 V y un pH 8,46. Este comportamiento concuerda con lo reportado en la literatura (Kumar y col., 2004; Ge y col., 2004).

Arango (2005) y Chen-G y col (2000, 2004) reportan que a pH cercanos a 7 se tiene la mejor remoción de carga orgánica.

Figura 4.4 Resultados de Remoción de Fosfato con pH 7

<b>Tiempo (Horas)</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>I. Corriente (A)</b>	<b>pH</b>	<b>Po (mg/L)</b>	<b>Pf (mg/L)</b>
1	5,0	12	7,0	227,65	177,18
2	5,2	13	7,0	227,65	115,82
3	5,1	14	7,1	227,65	93,44
4	5,0	17	6,9	227,65	87,61

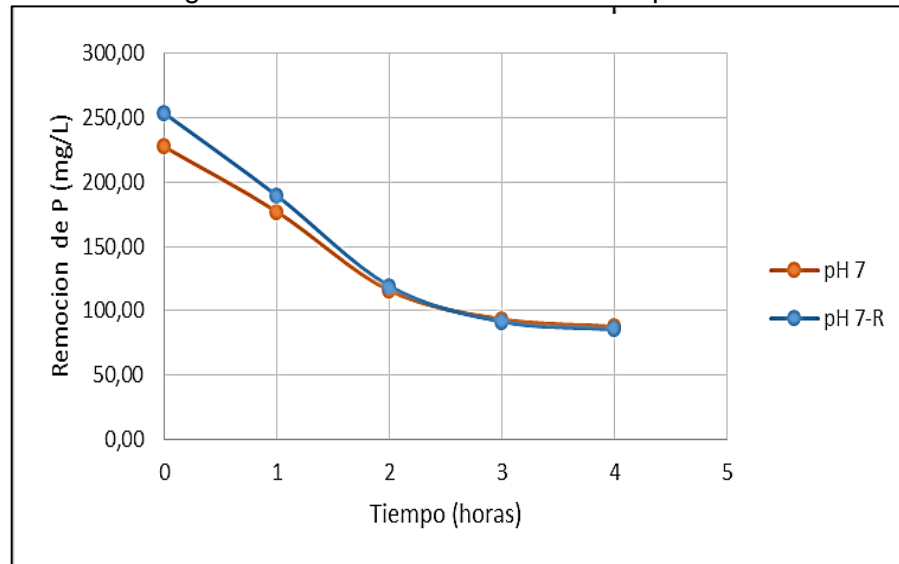
En la tabla 4.3 se encuentran los resultados del monitoreo de los parámetros de la segunda prueba experimental, tiempo de 1 a 4 horas, voltaje promedio de 5,1 voltios, con una intensidad de corriente promedio de 14 amperios, pH promedio 7, concentración inicial de fosfato 227,65 mg/L y con un fosfato final de 87,61 mg/L.

Figura 4.5 Resultados de Remoción de Fosfato con pH 7 - Replica

<b>Tiempo (Horas)</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>I. Corriente (A)</b>	<b>pH</b>	<b>Po (mg/L)</b>	<b>Pf (mg/L)</b>
1	5,30	14	7,00	253,84	189,72
2	5,10	12	6,90	253,84	119,26
3	5,00	14	7,00	253,84	91,40
4	5,00	17	6,90	253,84	85,28

En la tabla 4.4 se encuentran los resultados del monitoreo de los parámetros de la réplica de la segunda prueba experimental, tiempo de 1 a 4 horas, voltaje promedio de 5,1 voltios, con una intensidad de corriente promedio de 14,3 amperios, pH promedio 7, concentración inicial de fosfato 253,84 mg/L y con un fosfato final de 85,28 mg/L..

Figura 4.6. Remoción de Fósforo con pH 7.



La figura 4.2 muestra la relación tiempo y remoción de fósforo, se observan los resultados del segundo tratamiento con su respectiva réplica, con un tiempo de 1 a 4 horas y un pH 7 donde la disminución de fosfato inicial es de 227,65 mg/L a 87,61 mg/L, no existiendo variaciones en los resultados por lo cual se obtendrá un promedio de cada punto experimental.

Figura 4.7. Resultados de Remoción de Fosfato con pH 4,5

Tiempo (Horas)	Voltaje (V)	I. Corriente (A)	pH	Po (mg/L)	Pf (mg/L)
1	5,00	14	4,5	214,31	154,79
2	5,40	12	4,3	214,31	108,12
3	5,20	17	4,5	214,31	65,95
4	5,00	15	4,4	214,31	60,11

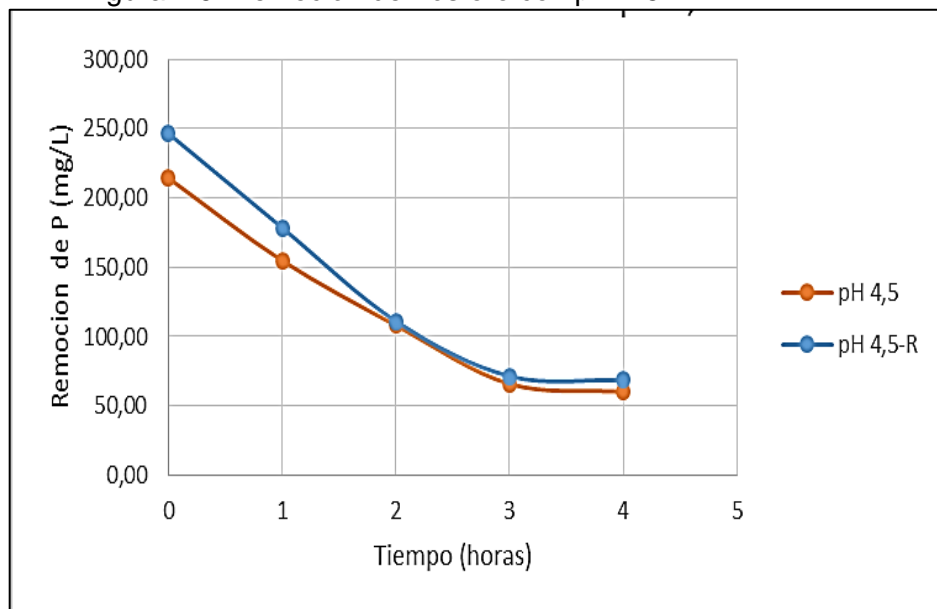
En la tabla 4.5 se encuentran los resultados del monitoreo de los parámetros de la tercera prueba experimental, tiempo de 1 a 4 horas, voltaje promedio de 5,2 voltios, con una intensidad de corriente promedio de 14,5 amperios, pH promedio 4,4 concentración inicial de fosfato 214,31 mg/L y con un fosfato final de 60,11 mg/L.

Figura 4.8 Resultados de Remoción de Fosfato con pH 4,5 - Replica

Tiempo (Horas)	Voltaje (V)	I. Corriente (A)	pH	Po (mg/L)	Pf (mg/L)
1	5,0	12	4,4	246,50	178,51
2	5,4	14	4,4	246,50	111,06
3	5,2	17	4,6	246,50	71,39
4	5,0	15	4,5	246,50	68,55

En la tabla 4.5 se encuentran los resultados del monitoreo de los parámetros de la réplica de la tercera prueba experimental, tiempo de 1 a 4 horas, voltaje promedio de 5,2 voltios, con una intensidad de corriente promedio de 14,5 amperios, pH promedio 4,5 concentración inicial de fosfato 246,50 mg/L y con un fosfato final de 68,55 mg/L.

Figura 4.9. Remoción de Fósforo con pH 4.5



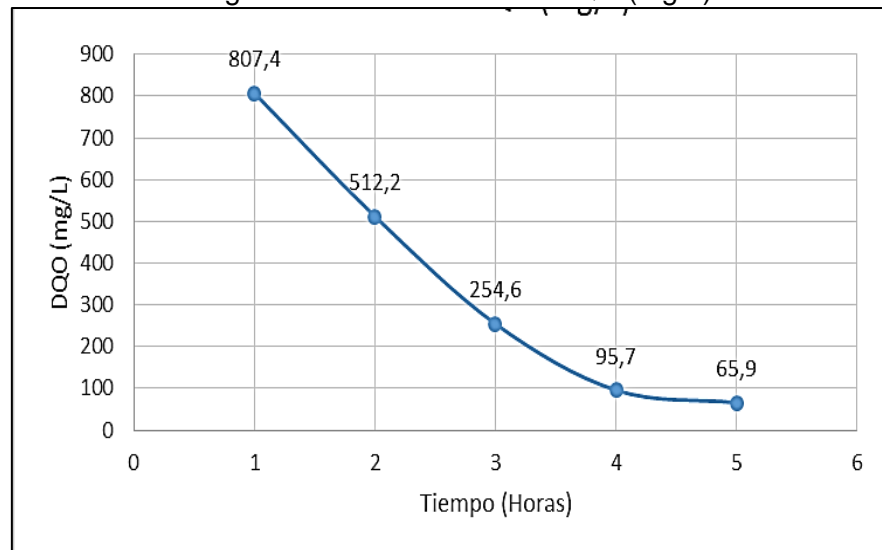
La figura 4.3 muestra la relación tiempo y remoción de fósforo donde se observan los resultados del segundo tratamiento con su respectiva réplica, con un tiempo de 1 a 4 horas y un pH 4,5 donde la disminución de fosfato inicial es de 214,31 mg/L a 60,11 mg/L, no existiendo variaciones en los resultados por lo cual se obtendrá un promedio de cada punto experimental.

**Figura 4.10.** Resultados de Remoción de Fosfato con pH 8 y DQO

Tiempo (Horas)	Fosfato (mg/L)	DQO (mg/L)	% de Remoción de DQO
0	274,40	807,4	0,00%
1	192,70	512,2	36,56%
2	106,22	254,6	68,47%
3	54,20	95,7	88,15%
4	49,70	65,9	91,84%

En la tabla 4.7 se encuentran los resultados del monitoreo de los parámetros de la prueba experimental optima, tiempo de 1 a 4 horas y un pH 8, donde se trabajó con una concentración inicial de fosfato 274,40 mg/L y con un fosfato final de 49,70 mg/L, con una DQO inicial de 807,4 mg/L y una DQO final de 65,9 mg/L y obteniendo un porcentaje de remoción de DQO de 91, 84 %.

**Figura 4.11.** Reducción de DQO (mg/L)



La figura 4.4 muestra la relación tiempo y reducción de DQO donde se observan los resultados de la reducción de DQO, con un tiempo de 1 a 4 horas y un pH 8, obteniendo un porcentaje de remoción de DQO de 91, 84 % no existiendo variaciones significativas en las dos últimas horas.

#### 4.1.2. Promedios de Resultados Evaluados en las Pruebas Experimentales.

Figura 4.12 Resultados Promedio de Remoción de Fosfato con pH 8 % y de Recuperación

Tiempo (Horas)	Fosfato (mg/L)	Fosfato - R (mg/L)	Fosfato Prom (mg/L)	% de Recuperación de P
0	242,22	289,10	265,66	0,00%
1	167,18	184,45	175,82	33,82%
2	98,54	102,40	100,47	62,18%
3	42,70	45,87	44,29	83,33%
4	39,25	44,50	41,88	84,24%

En la tabla 4.8 se observan los resultados del promedio de remoción y porcentaje de fosfato con un tiempo de 1 a 4 horas y un pH 8, teniendo como promedio inicial 265,66 mg/L y promedio final 41,88 mg/L. Con un porcentaje de recuperación de 84,24%.

Figura 4.13. Resultados Promedio de Remoción de Fosfato con pH 7 % y de Recuperación

Tiempo (Horas)	Fosfato (mg/L)	Fosfato - R (mg/L)	Fosfato Prom (mg/L)	% de Recuperación de P
0	227,65	253,84	240,75	0,00%
1	177,18	189,72	183,45	23,80%
2	115,82	119,26	117,54	51,18%
3	93,44	91,40	92,42	61,61%
4	87,61	85,28	86,45	64,09%

En la tabla 4.9 se observan los resultados del promedio de remoción y porcentaje de fosfato con un tiempo de 1 a 4 horas y un pH 7, teniendo como promedio inicial 240,75 mg/L y promedio final 86,45 mg/L. Con un porcentaje de recuperación de 64,09%.

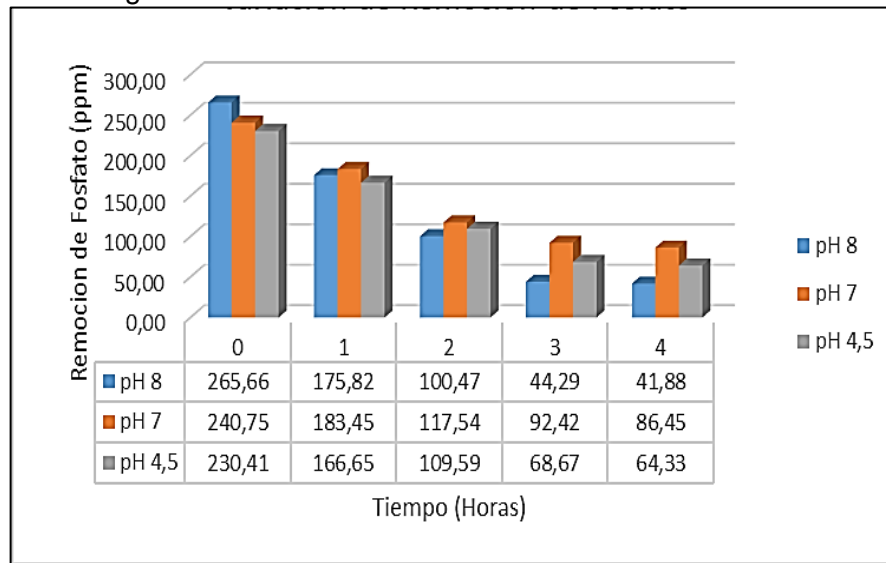


Figura 4.14. Resultados Promedio de Remoción de Fosfato con pH 4,5 y % de Recuperación

Tiempo (Horas)	Fosfato (mg/L)	Fosfato - R (mg/L)	Fosfato Prom (mg/L)	% de Recuperación de P
0	214,31	246,50	230,41	0,00%
1	154,79	178,51	166,65	27,67%
2	108,12	111,06	109,59	52,44%
3	65,95	71,39	68,67	70,20%
4	60,11	68,55	64,33	72,08%

En la tabla 4.10 se observan los resultados del promedio de remoción y porcentaje de fosfato con un tiempo de 1 a 4 horas y un pH 4.5, teniendo como promedio inicial 230,41 mg/L y promedio final 64,33 mg/L. Con un porcentaje de recuperación de 72,08%.

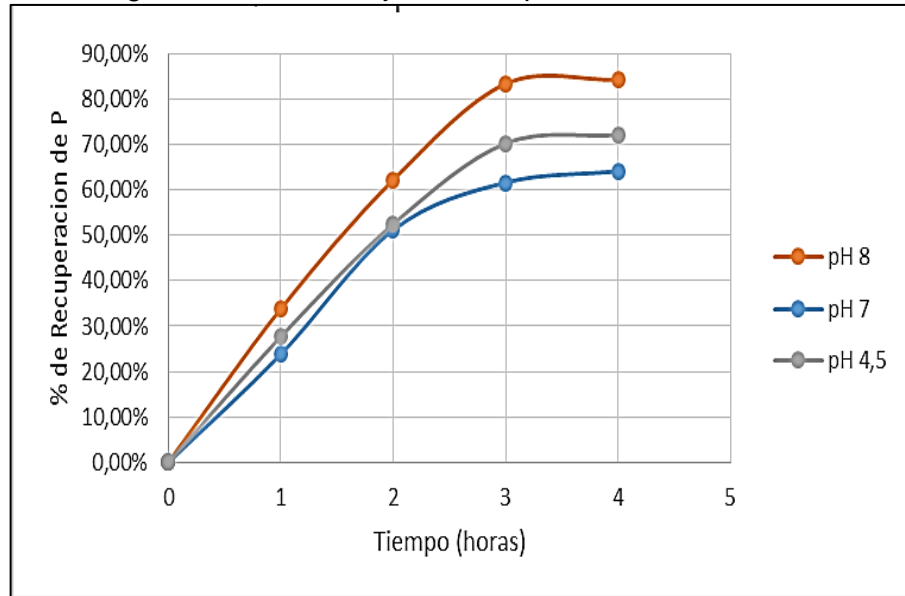
Figura 4.15. Variación de Remoción de Fosfato



La figura 4.5 muestra la relación tiempo y remoción de fosfato, donde se observan los resultados de la variación de remoción de fosfato para un pH 8 con un tiempo de 1 a 4 horas, con un valor inicial de 265,66 mg/L y un valor final de 41,88 mg/L; para un pH 7 con un tiempo de 1 a 4 horas, con un

valor inicial de 240,75 mg/L y un valor final de 86,45 mg/L; para un pH 4,5 con un tiempo de 1 a 4 horas, con un valor inicial de 230,41 mg/L y un valor final de 64,33 mg/L. Encontrando la mayor variación de remoción de fosfato en el tratamiento experimental para un pH 8.

Figura 4.16. Porcentaje de Recuperación de Fósforo.



La figura 4.6 muestra la relación tiempo y porcentaje de recuperación de fósforo, donde se observan los resultados del porcentaje de recuperación de fósforo para un pH 8 con un tiempo de 1 a 4 horas, con un porcentaje de recuperación de 84,24 mg/L; para un pH 7 con un tiempo de 1 a 4 horas, con un porcentaje de recuperación 64,09 mg/L; para un pH 4,5 con un tiempo de 1 a 4 horas, con un porcentaje de recuperación de 72,08%mg/L. Encontrando el mayor porcentaje de recuperación de fósforo en el tratamiento experimental para un pH 8.

#### 4.2. Discusión de Resultados.

El lactosuero ácido residual fue caracterizado en el laboratorio de Aguas de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Centro del

Perú obteniendo los siguientes resultados en la tabla 4.11 según el reporte nº 48 :

Figura 4.17 Características del Lactosuero Acido

<b>Parámetros</b>	<b>Lactosuero Acido</b>
pH	4,2
Sólidos totales	6452 mg/L
Calcio	147,1 mg/L
Fosfatos	242,26 mg/L
Cloruros	92,4 mg/L
DQO	824,5 mg/L

Realizado la comparación respecto al contenido de fosfato en la referencia Caracterización Físicoquímica de un Lactosuero: Potencialidad de Recuperación de Fósforo realizado por Judith Callejas Hernández y Francisco Prieto García que se muestra en la tabla 4.12

Figura 4.18 Composición Promedio de los Lactosueros Dulces y Ácidos Derivados de la Elaboración de Quesos

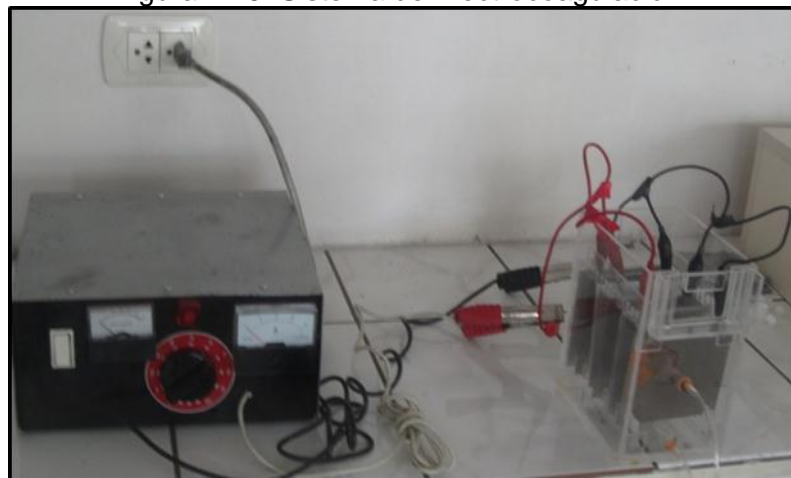
<b>Parámetro</b>	<b>Lactosueros dulces (g/kg de lactosuero)</b>	<b>Lactosueros ácidos (g/kg de lactosuero)</b>
Fósforo (Fosfato g/L)	0,4 - 0,7 (1,0 - 3,0)	0,5 - 0,8 (2,0 - 4,5)

Existe una variación significativa entre el contenido de fosfato en la caracterización y la referencia, esto se debe a que el lactosuero es caracterizado una vez terminado la elaboración de queso como nos explica la referencia, a diferencia del lactosuero tratado en el trabajo de investigación, debido al proceso que se realiza en el distrito de Yanacancha antes de emitir estos efluentes al río, este proceso consiste en hacer hervir el lactosuero por un periodo de 1 hora y media a 2 horas, para obtener producto llamado requesón por tal motivo la concentraciones de fosfato son menores respecto a los antecedentes.

Para la realización de la electrocoagulación, se utilizó una celda a escala prototipo, con capacidad de volumen de dos litros. En la cual están

sumergidos los electrodos, estos electrodos son placas rectangulares metálicas de hierro y aluminio dispuestas en paralelo y conectadas a una fuente de voltaje de corriente alterna que proporciona la corriente eléctrica requerida para la electrocoagulación, la fuente de poder posee control en el voltaje hasta los 30 voltios regulable y observación de la corriente eléctrica máxima hasta 20 amperios. Como se puede observar en la figura 4,7.

Figura 4.19. Sistema de Electrocoagulación



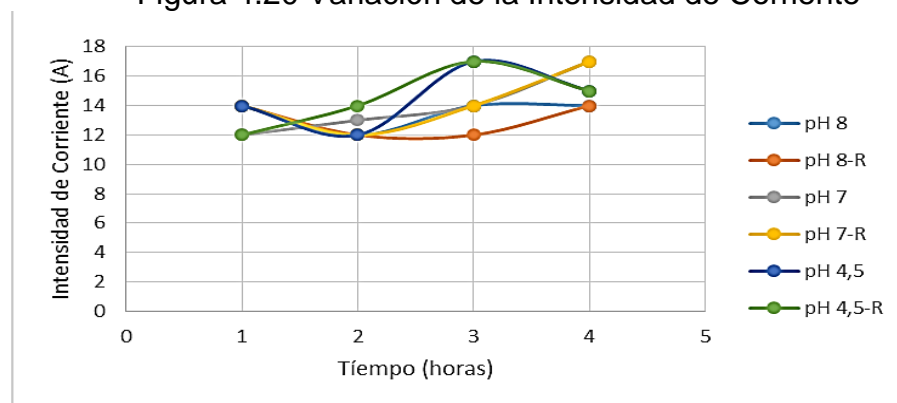
Los electrodos utilizados fueron de hierro y aluminio por las siguientes razones, la disponibilidad de los metales y son materiales relativamente baratos, los electrodos se diseñaron como placas rectangulares dispuestas en serie según la ecuación (13), con una separación de distancia de 1,25 cm entre la cara frontal y los electrodos, igualmente 1,25 cm entre estos y la cara posterior de la celda, el número de electrodos se determinó suponiendo una separación máxima entre electrodos de 14 mm más 3 mm del espesor de cada placa.

En otros estudios se probaron electrodos de aluminio y de hierro como electrodos de trabajo (ánodos), los electrodos auxiliares fueron de grafito y de óxido de rutenio/titanio (cátodos). Como electrodo de referencia se utilizó un electrodo de Calomel (mercurio-sulfato mercurioso). Se observa que el mejor arreglo de electrodos para la EC con la mayor recuperación de

fósforo fue el par Al-OxRut, seguido del par Al-Graf, que presentaron un 91% y 84%, respectivamente. Se concluye que el mejor arreglo de electrodos evaluados fue el del par aluminio-óxido de rutenio (Dra. Erika Bustos Bustos, 2012). Por lo que podemos ver que los electrodos de Al-Fe tienen semejanza de remoción y recuperación siendo arreglos relativamente menos costosos encontrando amplia información bibliográfica en la que se reportan buenas remociones de contaminantes con estos materiales en la electrocoagulación, adicionalmente son los metales más utilizados en el proceso (Chen, 2004).

En el proceso de electrocoagulación se monitoreo la intensidad de corriente para cada prueba experimental como se muestra en la figura (4,8).

Figura 4.20 Variación de la Intensidad de Corriente



La figura 4.8 muestra la relación tiempo intensidad de corriente donde podemos observar un incremento de la intensidad en la tercera hora donde se obtiene la mayor remoción de fosfato para cada una de las pruebas experimental y sus réplicas respectivas.

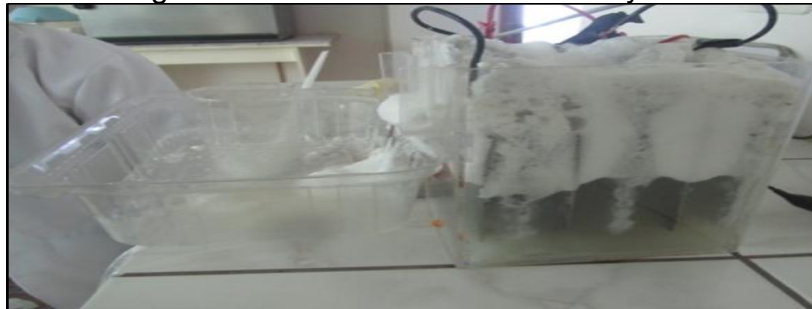
La eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento en la densidad de corriente (Mansouri et al., 2011; Adhoum et Monser, 2004). Para algunas conductividades del medio acuoso el consumo de energía se incrementa proporcionalmente con los aumentos de

conductividad, lo que conlleva a un consumo mayor de energía. Para altos consumos de energía se presentan pérdidas por la transformación de energía eléctrica en calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio acuoso.

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio  $Al^{+3}$  o hierro  $Fe^{+2}$ , liberado por los respectivos electrodos. En general un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante (Bayramoglu, 2004).

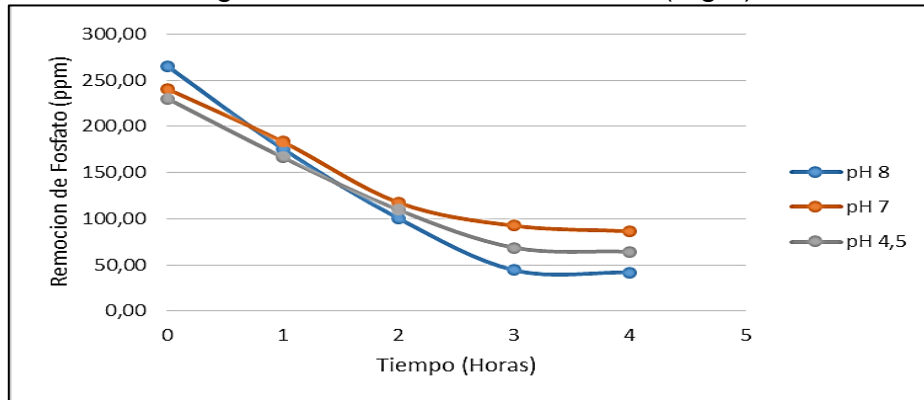
La recuperación de fósforo en el proceso de electrocoagulación está considerando tanto la fase acuosa como la fase floculada. De la solución de lactosuero, como se muestra en la figura 4,9.

Figura 4.21 fosfato en fase acuosa y floculada



En trabajo de investigación se analizó el fosfato que se removía del lactosuero, en tres diferentes tiempos donde existen mayor remoción se tomó muestras para analizar después de una hora más del tratamiento según el diseño experimental para determinar si la remoción era significativamente diferente, lo que ocurrió fue lo contrario manteniendo constante la remoción del fosfato a partir de la tercera hora en el lactosuero como se puede observar en la figura 4,10.

Figura 4.22 Remoción de fosfato (mg/L)



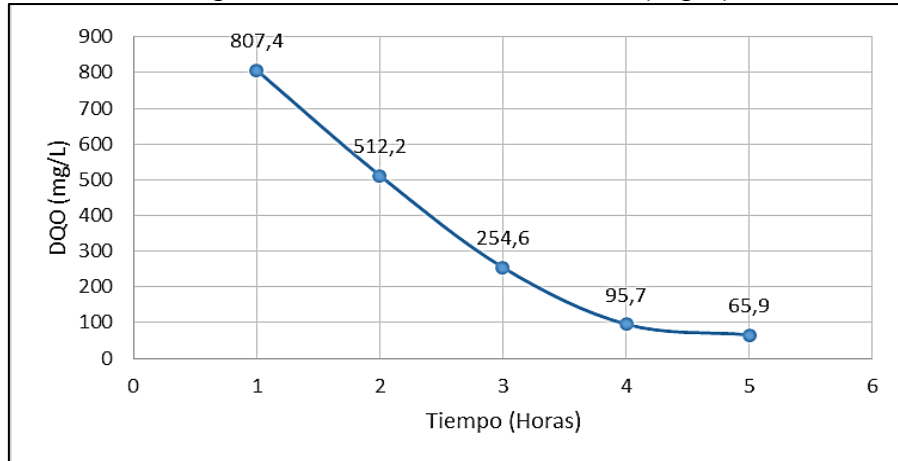
La figura 4,11 muestra la relación tiempo y reducción de DQO, donde observamos que la mayor remoción de fosfato del lactosuero se da cuando la solución se encuentra en estado básico con pH 8, la recuperación de fosfato es directamente proporcional a la remoción como también a la reducción de materia orgánica ya que esta relaciona con la disminución de DQO como se observa en la figura (4,11).

El pH es un factor importante debido a la especiación fraccionada del fósforo en función del pH se puede afirmar que el fosforo a un pH de 4,5 se encuentra en el estado de  $H_2PO_4^-$  (iones hidrogenofosfato) siendo más estable, mientras que para un pH de 8 el fósforo se encuentra en el estado de  $HPO_4^{2-}$  (fosfato ácido) siendo más inestables por este motivo tiende a reaccionar con los electrodos formando sedimentos.

El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar oxihidróxidos. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación (Mansouri et al., 2011; Jiantuan, 2004; Kobya et al., 2003; Bayramoglu, 2004; Powell Water Syastem, 2001; Zinola, 1999) y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua o líquido a tratar. El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. En contraposición, en aguas residuales

alcalinas el pH puede decrecer y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso.

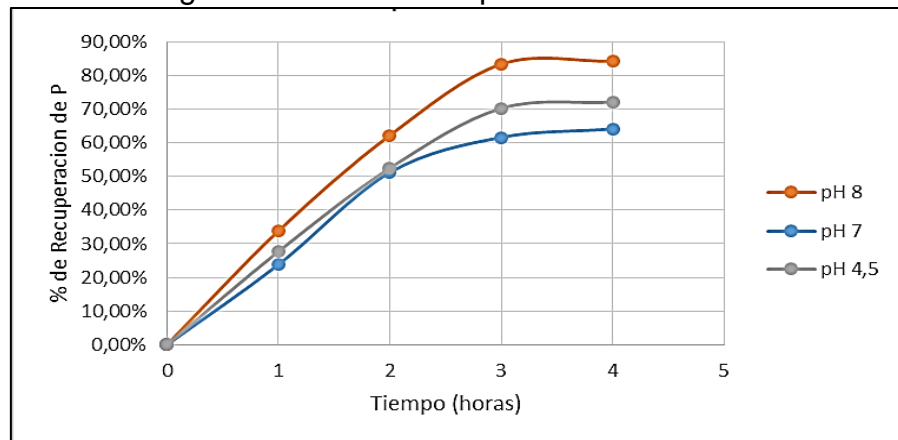
Figura 4.23 Reducción de DQO (mg/L)



La reducción de DQO es un indicador de la degradación de la materia orgánica quien estaría removiéndose del lacto suero.

El porcentaje de eficiencia de recuperación de fosfato en el tratamiento por electrocoagulación es mayor al 80% para un pH básico de 8 en los tratamientos que se realizaron en el trabajo de investigación como se muestra en la figura 4,12.

Figura 4.24 % de Recuperación de Fósforo





El mayor porcentaje de recuperación de fosfato en función del tiempo en las diferentes soluciones de pH se puede observar que se realiza en las tres primeras horas luego se mantiene constante, obteniendo así un 83,3% de recuperación de fosfato en 3 horas y un 84,24 % en 4 Horas.

El tiempo de retención hidráulica, indican algunos autores (Ojeda et Hing, 2010) determina que a mayor valor, mayor es la cantidad de sólidos formados, debido a que se favorece tanto los procesos de electrodos como la floculación y precipitación de los sólidos. Se producen más gases, que al ascender, llevan las partículas de óxido a la superficie en forma de espuma y a su vez promueve el crecimiento de los flóculos y su posterior precipitación. Un pequeño cambio del tiempo representa una gran influencia en la cantidad de sólidos obtenidos. Sin embargo estos mismos autores señalan que sus variaciones resultan estadísticamente menos significativas que las variaciones de pH, ya que éste, está muy vinculado a la constante del producto de solubilidad (Kps) la cual debe de disminuir al elevarse el mismo, lo que significa que los sólidos son más insolubles y por tanto se obtiene una mayor precipitación de los mismos en la medida que el pH aumenta.

#### 4.3. Contratación de Hipótesis.

##### **One-way ANOVA: pH 8; pH 7; pH 4,5**

```
Method
Null hypothesis          All means are equal
Alternative hypothesis   At least one mean is different
Significance level       $\alpha = 0,05$ 
Equal variances were assumed for the analysis.
Factor Information
```

```
Factor  Levels  Values
Factor           3  pH 8; pH 7; pH 4,5
```

```
Analysis of Variance
```

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	0,05102	0,02551	0,58	0,581
Error	9	0,39790	0,04421		
Total	11	0,44892			

**Interpretación:** En el análisis estadístico se trabajó con el software Minitab 17, utilizando el análisis de anova, ingresando los datos del % de recuperación de fosfato promedio según el pH de operación de los experimentos, resultando el valor P-value = 0,581 siendo mayor al valor de significancia del 0,05; según este resultado podemos aceptar la hipótesis que la variación del pH no tiene diferencia significativa en la recuperación de fosfato del lactosuero.

#### Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,210264	11,36%	0,00%	0,00%

#### Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
pH 8	4	0,659	0,237	( 0,421; 0,897)
pH 7	4	0,5017	0,1845	(0,2639; 0,7395)
pH 4,5	4	0,556	0,206	( 0,318; 0,794)

Pooled StDev = 0,210264

#### Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

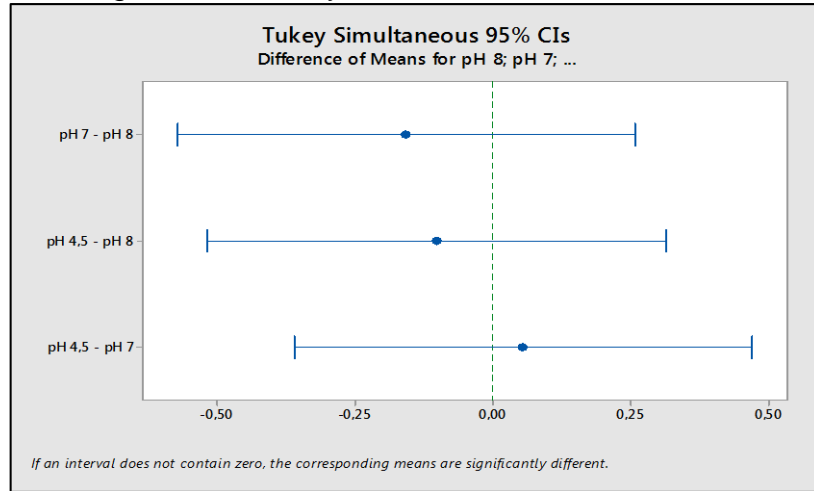
Factor	N	Mean	Grouping
pH 8	4	0,659	A
pH 4,5	4	0,556	A
pH 7	4	0,5017	A

Means that do not share a letter are significantly different.

**Interpretación:** Al realizar la comparación de TuKey con el software Minitab 17, observamos los resultados en función de las medias lo cual no existen

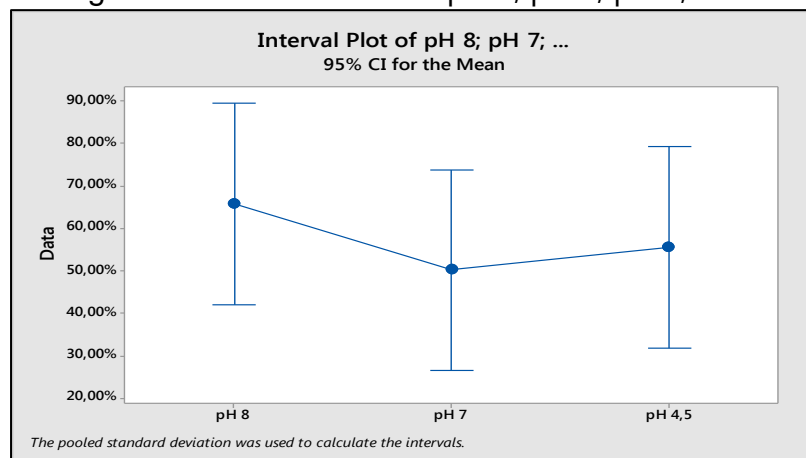
diferencia significativa por lo tanto las medias se encuentran dentro de los intervalos de confianza para cada factor y perteneciendo a un mismo grupo.

Figura 4.25 Tukey Simultaneous 95% CIs



En la Figura 4.13 Se observa que la diferencias de las medias para cada uno de las corridas experimentales, dos de ellas son negativas y el otro positivo respecto a la relación de pH, quiere decir pH 8 predomina la mayor recuperación de fosfato con un nivel de confianza al 95%.

Figura 4.26 Interval Plot of pH 8; pH 7; pH 4,5.



En la Figura 4.14 Se observa que la diferencias de las medias respecto al % de recuperación de fosforo siendo mayor el pH 8 a comparación del pH 7 y pH 4,5 con un nivel de confianza al 95%.

**One-way ANOVA: Tiempo 1 Hora; Tiempo 2 Hora; Tiempo 3 Hora; Tiempo 4 Hora**

Method

Null hypothesis All means are equal  
 Alternative hypothesis At least one mean is different  
 Significance level  $\alpha = 0,05$   
 Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Factor	4	Tiempo 1 Hora; Tiempo 2 Hora; Tiempo 3 Hora; Tiempo 4 Hora

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	3	0,39204	0,130680	18,38	0,001
Error	8	0,05688	0,007110		
Total	11	0,44892			

**Interpretación:** En el análisis estadístico se trabajó con el software Minitab 17, utilizando el análisis de anova, ingresando los datos del % de recuperación de fosfato promedio según el tiempo de retención en los experimentos, resultando el valor P-value = 0,001 siendo menor al valor de significancia del 0,05; según este resultado no se aceptar la hipótesis, que la variación del tiempo de retención no tiene diferencia significativa en la recuperación de fosfato del lactosuero.

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0843190	87,33%	82,58%	71,49%

Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
Tiempo 1 Hora	3	0,2843	0,0505	(0,1720; 0,3966)

Tiempo	2 Hora	3	0,5527	0,0602	(0,4404; 0,6649)
Tiempo	3 Hora	3	0,7171	0,1094	(0,6049; 0,8294)
Tiempo	4 Hora	3	0,7347	0,1015	(0,6224; 0,8470)

Pooled StDev = 0,0843190

### Tukey Pairwise Comparisons

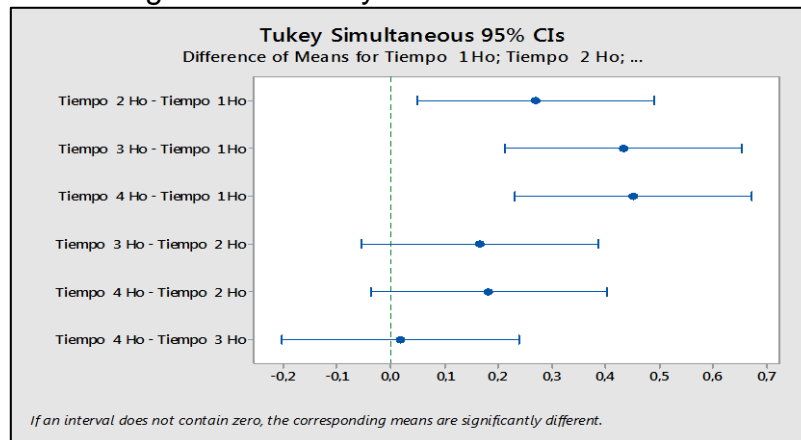
Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
Tiempo 4 Hora	3	0,7347	A
Tiempo 3 Hora	3	0,7171	A
Tiempo 2 Hora	3	0,5527	A
Tiempo 1 Hora	3	0,2843	B

Means that do not share a letter are significantly different.

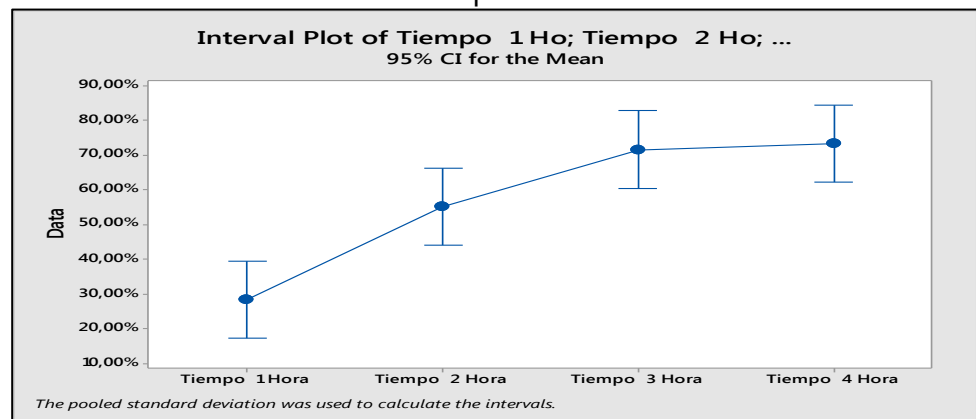
**Interpretación:** Al realizar la comparación de TuKey con el software Minitab 17, observamos los resultados en función de las medias lo cual si existen diferencia significativa entre el tiempo de 1 hora con respecto a los otros tiempos de retención por lo tanto las medias se encuentran en diferentes intervalos de confianza para cada factor y perteneciendo a diferentes grupos. Por lo consiguiente los tiempos de 2 horas hasta 4 horas pertenecen al grupo A y el tiempo de una hora al grupo B.

Figura 4.27 Tukey Simultaneous 95% CIs



En la Figura 4.15 Se observa que la diferencias de las medias para cada uno de las corridas experimentales, todas son positivas pero en las que tiene mayores medias son las que están relacionada con un tiempo de una hora quiere decir que la mayor recuperación de fosfato se dio en la primera hora.

Figura 4.28 Interval Plot of Tiempo 1 Ho; Tiempo 2 Ho; Tiempo 3 Ho; Tiempo 4 Ho



En la Figura 4.16 Se observa que la diferencias de las medias respecto al % de recuperación de fósforo siendo mayor en los tiempos de 3 y 4 horas y manteniendo se constante mientras que en las primeras horas existe mayor recuperaciones de fosfato

## CONCLUSIONES.

Se caracterizó el lactosuero ácido residual del distrito de Yanacancha, provincia Chupaca, departamento Junín obteniendo los siguientes resultados:

Cantidad de fósforo inicial que posee el lactosuero ácido residual es de 242,26 mg/L, pH 4,5, sólidos totales 6452,26 mg/L, calcio 147,1 mg/L, cloruros 92,4 mg/L y DQO 824,5 mg/L.

El pH es un factor importante debido a la especiación fraccionada del fósforo en función del pH se puede afirmar que el fósforo a un pH de 4,5 se encuentra en el estado de  $H_2PO_4^-$  (iones hidrogenofosfato) siendo más estable, mientras que para un pH de 8 el fósforo se encuentra en el estado de  $HPO_4^{2-}$  (fosfato ácido) siendo más inestables por este motivo tiende a reaccionar con los electrodos formando sedimentos.

El tiempo de retención hidráulica determina que a mayor valor, mayor es la cantidad de sólidos formados, debido a que se favorece tanto los procesos de electrodos como la floculación y precipitación de los sólidos.

Las pruebas realizadas en laboratorio nos permiten concluir que las mejores condiciones para obtener una alta eficiencia de recuperación de fósforo, en función del tiempo y en las diferentes soluciones de pH se realiza en las tres primeras horas luego se mantiene constante, obteniendo así un 83,3% de recuperación de fosfato en 3 horas y un 84,24 % en 4 Horas..

## RECOMENDACIONES

- Por los resultados del lodo obtenido en este proceso, se recomienda profundizar en análisis de su composición biológica y química que permita plantear nuevas investigaciones referidas a este tema en particular.
- En este estudio no se probó con configuraciones bipolares en serie y según algunos artículos pueden disminuir el consumo de energía, por lo cual se sugiere hacer pruebas para su verificación.
- En las pruebas de laboratorio se utilizó como material para los electrodos el aluminio y el hierro, por lo cual se recomienda realizar pruebas con otros materiales como acero inoxidable, cobre, etc.
- Los costos de montaje y operación son fundamentales en la aplicación de esta tecnología. Es por esto que cada caso en particular requiere de un estudio y análisis minucioso de los aspectos técnicos y económicos del proceso.
- Trabajar con estabilizador para trabajar con voltaje constante porque existen las caídas de tensión.



## BIBLIOGRAFÍA

- Abaigar, A. (2009). El lactosuero en la alimentacion del ganado porcino. *ITG Ganadero*, p.p.:13-17.
- Aider, M. H. (2009). Skim acidic milk whey cryoconcentration and assessment of its functional properties: Impact of processing conditions. *Innovative Food Science and Emerging*, p.p.:334-341.
- Alvaro Arango Ruiz, L. F. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *EAFIT*, p.p.:56-67.
- APHA. (1992). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington D.C.: American Public Health Association.
- Baez, C. (4 de octubre de 2015). Tecnología de Hidroxidos de capara para la recuperación de fosforo. *Desarrollan tecnología para la recuperación de fosforo*, págs. p.p.:72-89.
- Barrera, C. E. (2014). Historia y Evolucion de la electrocoagulación. En Electrocoagulación, *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales*. (págs. p.p.:165-180). España: Reverte.
- Branco, M. M. (1984). *“Limnología Sanitaria”*. Estudio de la polución de aguas continentales. Washington: OEA, programa regional de desarrollo científico y tecnológico.
- Brix H., A. C. (2001). Media selection for sustainable phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands. *Water Sci. Technol.*, p.p.:44, 47–54.
- Cajiao, M. F. (2009). Ingeniería ambiental: contaminación y tratamientos. *ECURED*, p.p.:98-112.
- Campos Gómez, I. (2003). *Saneamiento Ambiental*. San José, Costa Rica: Editorial de la Universidad Estatal a Distancia - EUNED.
- Charles Alais, A. L. (1985). *Ciencia de la leche*. España: Reverte.
- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, p.p.:11-41.

- Comeao Y., O. (1987). Biochemical model for enhanced biological phosphorus removal. *Wat Res. Vol 20*, p.p.:65-81.
- Cristancho, D. M. (2010). Descripción del comportamiento de un prototipo para el comportamiento de un proceso electroquímico de aguas residuales industriales. *Academia y Virtualidad*, p.p.:34-51.
- Díaz, C. E. (2014). *Aplicaciones Electroquímicas al tratamiento de aguas residuales*. España: Reverte.
- Doyle, & P. (2002). *Investigations on the Recovery of Phosphorus from Wastewater by Crystallization*. Alemania: Universal - publisher.
- Dra. Erika Bustos Bustos, D. V.-C. (2012). Depuración por electrocoagulación de un lactosuero. *Tecnología Química*, p.p.:24-41.
- Ecured. (5 de Enero de 2014). Electrocoagulación alternativa viable. *Ecured*, p.p.:30-52. Recuperado el 4 de Enero de 2014, de ECURED - Conocimiento con todos y para todos.
- Eddy., M. &. (2004). *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Eric Lichtfouse, J. S. (2013). *Materiales ecológicos de energía, productos y descontaminación*. New York: Springer.
- Fair Gordon Maskew, G. J. (1994). Ingeniería Sanitaria y de Aguas. En F. G. Maskew, *Tratamiento de aguas* (págs. p.p.:204-221). Mexico: Limusa.
- Garces, &. A. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. En A. Arango, *Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea* (págs. p.p.:10-45). Mexico: Lasallistas.
- García, F. C. (2012). Electrocoagulación: una alternativa para depuración de lactosuero. *AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, p.p.:9-21.
- García, F. C. (2012). Electrocoagulación: una alternativa para depuración de lactosuero residual. *AIDIS*, p.p.:62-64.

- Ge J., Q. J. ((2004).). New bipolar electrocoagulation-electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. *Separation and Purification Technology*. p.p: 33-39.
- Gil, A. (2010). Composicion y calidad nutritiva de los alimentos. *Tratado de nutricion*, p.p.:64-73.
- Giraldo, & L. (2009). Tratamiento de aguas residuales de la industria lactea. *P y L*, p.p.:15-32.
- Gopal. (1999). Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: potentials and problems. *Water Sci. Technol.*, p.p.:40, 27–35.
- Gujer W., e. a. (1995). *Biological phosphorus removal*. New York: The activated sludge model N° 2.
- Harris , D. (2007). *Analisis Quimico Cuantico*. Colombia: Reverte.
- Holt, P. K. (2005). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, p.p.:355-367.
- Huijuan Liu, X. Z. (2010). Electrocoagulation en el tratamiento de agua. En X. Z. Huijuan Liu, *Electroquimica del medio ambiente* (págs. p.p.:245-262). Nueva York: Springer.
- Irdemez S., D. N. (2006). The effects of current density and phosphate concentration on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation using aluminum and iron plate electrodes. *Sep. Purif. Technol.*, p.p.:218-223.
- Koutinas, A., Papapostolou, H., Dimitrellou, D., Kopsahelis, N., Katechaki, E., & Bekatorou, A. a. (2009). Whey valorisation: a complete and novel technology development for dairy industry starter culture production. *Bioresource Technology*, p.p.:3734-3739.
- Krishnam Rajeshwar, J. G. (1997). *Electroquimica Ambiental: Fundamentos y aplicaciones en reduccion de la contaminacion*. España: Prensa academica.
- Kumar P.R., C. S. ((2004).). Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *Chemosphere*, , p.p:55(9): 1245-1252.

- Lee JE, R. J. (2009). Dose effects of Mg and PO<sub>4</sub> sources on the composting of swine manure. *Environ Pollut*, p.p.:313-20.
- Luis F. Garcés, A. A. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación. *Universidad EAFIT*, p.p.:56-67.
- Marín, S. (2002). *Tratamiento de aguas residuales mediante un sistema de humedales artificiales a nivel laboratorio*. Mexico: Facultad de Química. Universidad Autónoma del Estado de México.
- MEM. (2010). *Dirección General de Electrificación Rural DGRR-MEM*. Peru: Ministerio de Energía y Minas.
- MINAM. (2010). *Estandares de Calidad Ambiental*. Peru: Ministerio del Ambiente.
- Mino T., M. V. (1998). Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process. *Wat. Res. Vol.32. Nº 11*, p.p.:98-114.
- Miranda, R. (2000). Desarrollo, situación actual y aplicaciones potenciales de los humedales artificiales de flujo horizontal de México. *Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México*, p.p.:56-81.
- Mollah, M. &. (2001). Electrocoagulation (EC). *Science and applications: Journal of Hazardous Materials*, p.p.:29-41.
- Nassef, D. (2012). Removal of Phosphorous Compounds by Electrochemical Technique. *IRACST*, p.p.:42-54.
- Parra, R. A. (2009). Lactosuero: Importancia en la industria de alimentos. *Fac. Nat. Agr. Medellín*, p.p.:4967-4982.
- Peters, R. (2005). Economic aspects of cheese making as influenced by whey processing options. *International Dair Journal*, p.p.:537-545.
- Quipuzco, E. (2002). Evaluación del comportamiento de dos pantanos artificiales instalados en serie con *Eichornia Crassipes* para el tratamiento de aguas residuales. *Rev. Inst. Investig. Fac. Minas Metal. Cienc. Geogr.*, p.p.:52-57.
- Restrepo, A. A. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción + Limpia*, p.p.:58-77.

- Ruiz, A. A. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales. *Universidad EAFIT*, p.p.:21-34.
- Sharma, D. (2014). Treatment of dairy waste water by electro coagulation using aluminum electrodes and settling, filtration studies. *ChemTech*, p.p.:15-29.
- Sharpe, A. G. (1993). *Química inorgánica*. Barcelona: Reverte.
- Sigfrido M. S., & S. (2000). Conceptos para tratamientos de residuos lácteos. *Aymerich*, p.p.:12-21.
- Universidad de Salamanca. (13 de 04 de 2014). *Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua*. Obtenido de CIDTA: <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/quimica.pdf>
- Valencia, E., & Ramirez, M. L. (2009). *La industria de la leche y la contaminación del agua* (Vol. N°2). España: Elementos.
- Valero, D. M. (2014). Tratamiento de aguas residuales. *EAFIT*, p.p.:50-61.
- Veisseyre, R. (1988). *Lactología Técnica 3ª Edición* (Vol. N° 3). Argentina: Acribia.
- Víctor E. Reyes Cruz, Y. M. (5 de Enero de 2012). Tratamiento de aguas residuales por Electrocoagulación. *ADIS*, p.p.:43-61. Recuperado el 4 de Enero de 2014, de ECURED - Conocimiento con todos y para todos.
- Willem S, B. K. (2001). Phosphate recycling in the phosphorus industry. *Second International Conference on the Phosphorus from Sewage and Animal Wastes* (págs. p.p.:392-401). The Netherlands: Noordwikerhout.

## **ANEXOS.**

# DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE LACTOSUERO ACIDO RESIDUAL

Figura 1. Celda de electrocoagulación

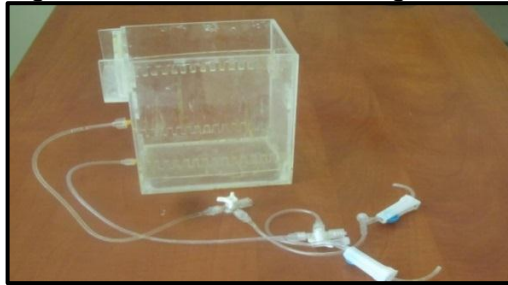


Figura 2. Electrodo de Al y Fe



Figura 3. Fuente de Poder.



Figura 4. Cocodrilos



Figura 5. Disposición de electrodos.



Figura 6. Equipo de completo.



## ENSAYOS DE LABORATORIO DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DEL LACTOSUERO ACIDO RESIDUAL CON EL EQUIPO DE ELECTROCOAGULACIÓN

Figura 13. Introducir los electrodos.



Figura 14. Medición del pH.





Figura 15. Comprobación del pH.



Figura 16. Llenado del lactosuero ácido.

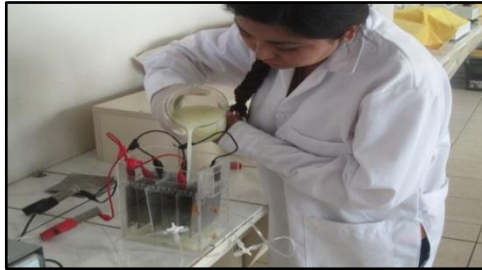


Figura 17. Monitoreo de voltaje y amperaje.



## ENSAYOS DE LABORATORIO

### Ensayo A pH= 8

Figura 18. Lactosuero inicial.

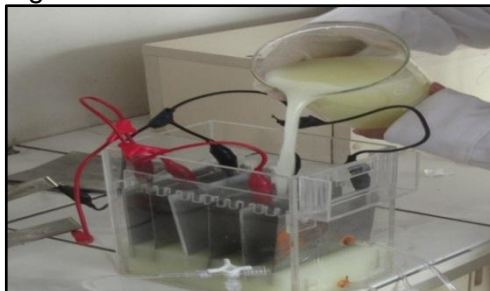


Figura 19. pH 8.



Figura 20. A 1 hora de tratamiento

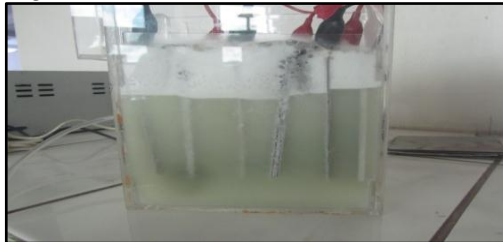


Figura 21. Formación de lodos.

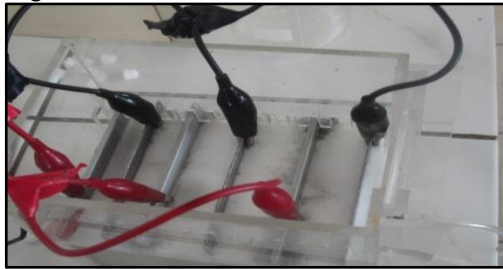


Figura 22. A 2 horas de tratamiento.



Figura 23. Formación de lodos.



Figura 24. A 3 horas de tratamiento.



Figura 25. Muestras finales.



### Ensayo B pH= 4.5

Figura 26. Lactosuero inicial.



Figura 27. pH 4.5.



Figura 28. A 1 hora de tratamiento.

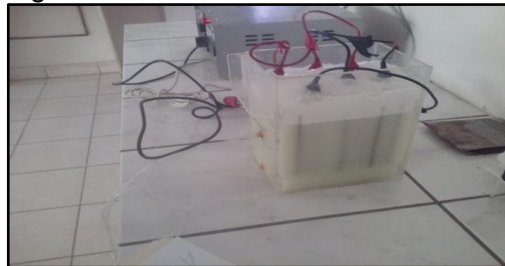


Figura 29. Formación de lodos.

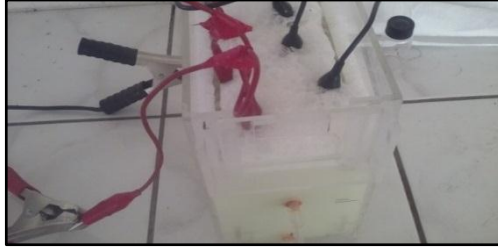


Figura 30. A 2 horas de tratamiento

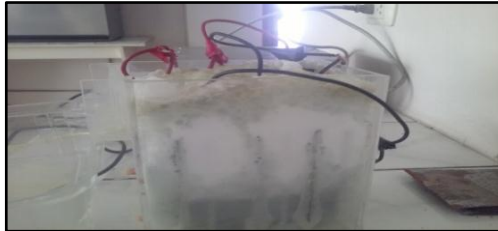


Figura 31. Formación de lodos.



Figura 32. A 3 horas de tratamiento

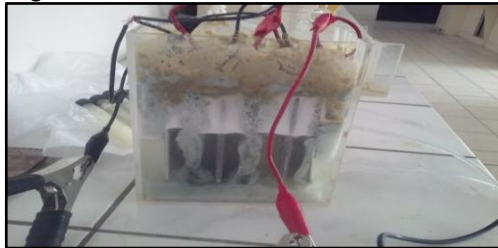


Figura 33. Formación de lodos.



Figura 34. Lodos finales.



Figura 35. Muestras finales.



**Ensayo B pH= 7.**

Figura 36. Lactosuero Inicial.



Figura 37. pH 7.



Figura 38. A 1 hora de tratamiento



Figura 39. Formación de lodos.



Figura 40. A 2 horas de tratamiento.

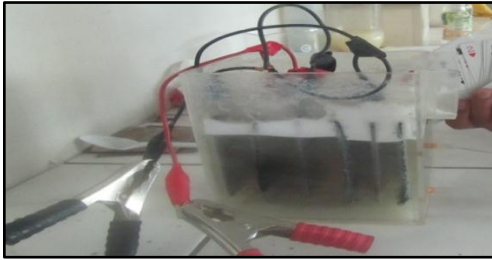


Figura 41. Formación de lodos.

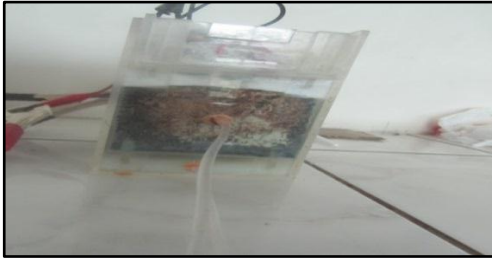


Figura 42. A 3 horas de tratamiento.

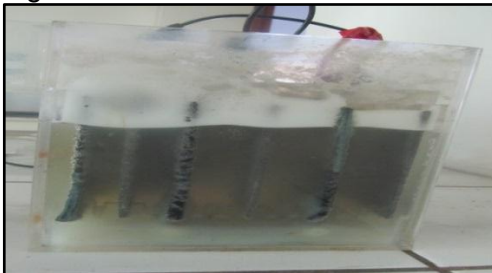


Figura 43. Formación de lodos.





Figura 44. Muestras finales.



Figura 45. Muestra de lodos finales



## ANALISIS DE FOSFORO

Fosfato ( $\text{PO}_4$ ) : 4500-D  $\text{PO}_4$  Cloruro estano.

Figura 46. pH 8.

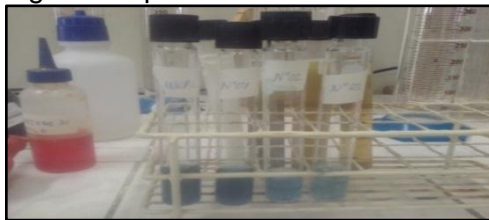


Figura 47. pH 4.5.

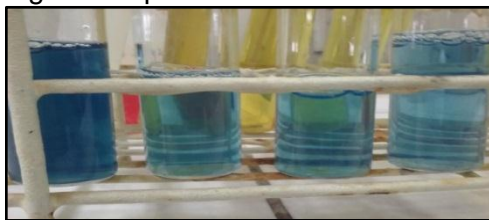


Figura 48. pH 7.

