

**UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**TESIS**

**REDUCCIÓN DE CARGA ORGÁNICA EN EL  
TRATAMIENTO AVANZADO DE AGUAS RESIDUALES  
DEL CAMAL MUNICIPAL DE CHUPACA MEDIANTE EL  
MÉTODO DE ELECTROCOAGULACIÓN - JUNIN**

**PRESENTADO POR LA BACHILLER:**

**VELASQUEZ SOLIER ANGELA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**HUANCAYO - PERÚ**

**2017**

Asesor:

Ing. M.Sc. Henry R. Ochoa León

A mis padres y hermanos por  
su ejemplo de vida y apoyo siempre.

## **AGRADECIMIENTO**

Dar gracias a Dios, por estar presente en mi vida, por permitirme ser partícipe de cada momento bueno y malo junto a los seres que más quiero mi familia, por mantenernos juntos y superando las dificultades.

A todos mis docentes desde mi etapa de niñez hasta la actualidad, especialmente aquellos a quienes me exigían mucho más que los demás, porque querían que mejore y aprenda que el logro de objetivos se obtiene mediante el esfuerzo y perseverancia.

A mis amigos y amigas, con quienes pasamos momentos muy gratos y productivos en aulas y fuera de ellas. Gracias por permitirme conocer a personas muy buenas con quienes sé que siempre podré contar.

Un agradecimiento profundo a mis padres y hermanos, quienes siempre me apoyan y me brindan su cariño, gracias por estar a mi lado e inculcar en mí valores que permanecerán siempre en mí, los mismos que trato de sembrar en todos los que conozco.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTO .....	iii
ÍNDICE DE ABREVIATURAS. ....	ix
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN .....	xvii
CAPÍTULO I.....	18
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	18
1.1 Caracterización de la realidad problemática.....	18
1.2 Formulación del problema.....	21
1.2.1 Problema general .....	21
1.2.2 Problemas específicos .....	21
1.3 Objetivos.....	21
1.3.1 Objetivo general .....	21
1.3.2 Objetivos específicos.....	21
1.4 Justificación .....	22
1.5 Importancia .....	23
1.6 Limitaciones.....	23
CAPÍTULO II.....	24
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	24
2.1 Marco referencial .....	24
2.1.1 Antecedentes de la investigación .....	24
2.1.2 Referencias históricas. ....	29
2.2 Marco legal .....	36

2.2.1	LEY N° 28611 - Ley General Del Ambiente .....	36
2.2.2	LEY N° 29338.- Ley De Recursos Hídricos .....	37
2.2.3	Reglamento de la Ley N°29338, Aprobado por DS N°001-2010-AG 40	
2.2.4	D.S. N° 002–2008-MINAM, Aprueban ECA para Agua.....	41
2.2.5	D.S. N°023-2009-MINAM, que aprueba las disposiciones para la implementación de los ECA para agua .....	43
2.2.6	D.S. N° 015-2015-MINAM, Modifican Los ECA para Agua y Establecen Disposiciones Complementarias para su Aplicación.....	43
2.2.7	R.J. N° 202-2010-ANA, Clasificación de Cuerpos de Agua Superficiales y Marino – Costeros.....	44
2.2.8	D.S. N° 003-2010-MINAM, Límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de Aguas residuales domesticas o municipales.....	45
2.3	Marco conceptual.....	45
2.4	Marco teórico. ....	48
2.4.1	Composición de Aguas Residuales de Matadero .....	48
2.4.2	Caracterización de aguas residuales de Camales .....	49
2.4.3	Electrocoagulación .....	50
2.4.4	Aplicaciones de la Electrocoagulación.....	52
2.4.5	Ventajas de la Electrocoagulación.....	53
2.4.6	Desventajas de la Electrocoagulación .....	54
2.4.7	Fundamento Teórico del Proceso de Electrocoagulación .....	55
2.4.8	Proceso de Electrocoagulación .....	57
2.4.9	Reacciones Involucradas en la Electrocoagulación .....	60
2.4.9.1	Mecanismo 1: Formación del hidróxido férrico .....	61
2.4.9.2	Mecanismo 2: formación del hidróxido ferroso .....	61

2.4.10 Aspectos Técnicos de la operación de la electrocoagulación .....	62
2.4.10.1 Consumos de energía .....	62
2.4.10.2 Desgaste de electrodos.....	62
2.4.10.3 Condiciones de operación .....	62
2.4.10.4 Producción de lodos.....	63
2.4.11 Factores que afectan la electrocoagulación.....	63
2.4.11.1 pH .....	63
2.4.11.2 Densidad de corriente .....	64
2.4.11.3 Conductividad .....	65
2.4.11.4 Temperatura.....	66
2.4.12 Configuraciones Hidráulica y Eléctricas.....	66
2.4.13 El Reactor para la electrocoagulación .....	68
2.4.14 Materiales de los electrodos.....	70
2.4.15 Distancia apropiada entre electrodos y niveles para pH, Densidad de Corriente y Tiempo .....	72
CAPÍTULO III.....	74
3 PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO .....	74
3.1 Metodología .....	74
3.1.1 Método. ....	74
3.1.1.1 Ubicación del Lugar de Estudio:.....	74
3.1.1.2 Ubicación del Camal Municipal de Chupaca: .....	75
3.1.1.3 Construcción de la Celda de Electrocoagulación .....	76
3.1.1.4 Fuente de voltaje .....	80
3.1.1.5 Recolección y Preparación de la muestra .....	83
3.1.1.6 Experimentación .....	85
3.1.1.7 Variable a medir.....	88

3.1.2	Tipo de la investigación .....	88
3.1.3	Nivel de la investigación .....	88
3.2	Diseño de la investigación. ....	88
3.3	Hipótesis de la investigación .....	89
3.3.1	Hipótesis general.....	89
3.3.2	Hipótesis específicas .....	89
3.4	Variables.....	89
3.4.1	Variable independiente.....	89
3.4.1.1	Electrocoagulación.....	89
3.4.1.2	Índice de acides .....	89
3.4.2	Variable dependiente.....	90
3.4.2.1	Carga Orgánica.....	90
3.5	Cobertura del Estudio. ....	90
3.5.1	Universo. ....	90
3.5.2	Población. ....	90
3.5.3	Muestra. ....	90
3.5.4	Muestreo. ....	90
3.6	Técnicas e instrumentos .....	90
3.6.1	Técnicas de la investigación.....	90
3.6.2	Instrumentos de la investigación.....	91
3.7	Procesamiento estadístico de la información. ....	91
3.7.1	Estadísticos.....	91
3.7.2	Representación. ....	91
3.7.3	Técnica de comprobación de la hipótesis.....	91
CAPITULO IV	.....	92
4	ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	92



4.1	Resultados.....	92
4.2	Discusión de resultados .....	103
4.2.1	Tiempo de retención hidráulica.....	107
4.2.2	pH .....	107
4.2.3	Tensión de corriente.....	109
4.3	Contrastación de Hipótesis .....	109
	CONCLUSIONES .....	118
	RECOMENDACIONES .....	119
	BIBLIOGRAFÍA.....	120
	ANEXOS.....	123

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS.

FAFA	: Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente
ANA	: Autoridad nacional del Agua
AGV	: Ácidos grasos volátiles.
CA	: Corriente Alterna
DBO	: Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	: Demanda Química de Oxígeno
EC	: Electrocoagulación.
ECA	: Estándar de Calidad Ambiental.
I	: Intensidad.
L	: Litro
LMP	: Límite Máximo Permisible.
mg/L	: Miligramo por litro
mm	: Milímetros.
mS	: Milisiemens
MINAM	: Ministerio del Ambiente.
pH	: Potencial de Hidrógeno
PNUMA	: Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
SDT	: Sólidos Disueltos Totales.
SS	: Sólidos Suspendidos.
SST	: Sólidos Suspendidos Totales.
ST	: Sólidos Totales.
TRH	: Tiempo de retención hidráulica
V	: Voltaje.

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Categoría 3 - Riego de Vegetales y bebidas de Animales, Parámetros para Riego de Vegetales de Tallo Bajo y Tallo Alto .....	42
Tabla 2: Clasificación de cuerpos de agua superficiales: ríos, lagos, lagunas .	44
Tabla 3: LMP para los efluentes de PTAR .....	45
Tabla 4: Características de las aguas residuales de mataderos (mg/L) .....	49
Tabla 5: Caracterización de aguas residuales planta de carnes .....	50
Tabla 6: Datos Ubicación del Lugar de Estudio.....	75
Tabla 7: Datos Ubicación del Camal Municipal de Chupaca .....	75
Tabla 8: Valores Marcados por la Fuente de Poder .....	81
Tabla 9: Diseño Factorial de la Investigación .....	88
Tabla 10: Caracterización de aguas del Camal Municipal de Chupaca. ....	92
Tabla 11: Resultados del Tratamiento con pH 7 y tensión de corriente 20 V ...	93
Tabla 12 Resultados del Tratamiento con pH 8 y tensión de corriente 20 V ....	93
Tabla 13: Resultados del Tratamiento con pH 7 y tensión de corriente 30 V ...	94
Tabla 14: Resultados del Tratamiento con pH 8 y tensión de corriente 30 V ...	95
Tabla 15: Resultados de réplica del Tratamiento con pH 8 y tensión de corriente 20 V .....	95
Tabla 16: Resultados de réplica del Tratamiento con pH 8 y tensión de corriente 30 V .....	96
Tabla 17: Cálculos de DQO y DBO <sub>5</sub> con pH 7 y Tensión de corriente 20 V ...	103
Tabla 18: Cálculos de DQO y DBO <sub>5</sub> con pH 8 y Tensión de corriente 20 V ...	103
Tabla 19: Cálculos de DQO y DBO <sub>5</sub> con pH 7 y Tensión de corriente 30 V ...	104
Tabla 20: Cálculos de DQO y DBO <sub>5</sub> con pH 8 y Tensión de corriente 30 V ...	105
Tabla 21: Réplica de Cálculos DQO y DBO <sub>5</sub> con pH 8 y Tensión de corriente 20 V .....	106
Tabla 22: Réplica de Cálculos DQO y DBO <sub>5</sub> con pH 8 y Tensión de corriente 30 V .....	106
Tabla 23: Porcentaje de remoción en pruebas con 20 V y pH 8.....	109
Tabla 24: Porcentaje de remoción en prueba con 30 V y pH 8 .....	113

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Arreglos de Electroodos.....	66
Figura 2: Posibles configuraciones de Flujo dentro de un reactor de Electrocoagulación.....	67
Figura 3: Reactor de electrocoagulación.....	69
Figura 4: Ubicación de la UAP - Huancayo .....	74
Figura 5: Ubicación del Camal Municipal de Chupaca .....	75
Figura 6: Dimensiones de la celda para electrocoagulación.....	77
Figura 7: Detalle de toma de muestras y evacuación de lodos. ....	77
Figura 8: Electroodos de Fierro y Aluminio Utilizados. ....	78
Figura 9: Ranuras para separación de Electroodos. ....	79
Figura 10: Celda de Electrocoagulación terminada. ....	79
Figura 11: Armado de la Celda de electrocoagulación. ....	80
Figura 12: Medidas de los electrodos .....	82
Figura 13: Fuente de poder.....	83
Figura 14: Camal Municipal de Chupaca. ....	83
Figura 15: Filtrado Simple de la Muestra.....	84
Figura 16: Celda de Electrocoagulación Lista para Iniciar Pruebas.....	85
Figura 17: Toma de temperatura y pH de la muestra. ....	85
Figura 18: Celda de Electrocoagulación con muestra para Iniciar Pruebas.....	86
Figura 19: Celda de Electrocoagulación en funcionamiento. ....	86
Figura 20: Toma de muestra del agua tratada. ....	87
Figura 21: Reducción de la DQO .....	97
Figura 22: Reducción de la DBO <sub>5</sub> .....	98
Figura 23: Variación del PH .....	99
Figura 24: Variación de la Temperatura.....	100
Figura 25: Reducción de DBO <sub>5</sub> y DQO con pH 8 y Tensión de corriente de 30 V .....	101
Figura 26: Reducción de Materia Orgánica con pH 8 y tensión de corriente de 20 V .....	102
Figura 27: Muestras obtenidas en distintos tiempos de tratamiento .....	104

Figura 28: Resultados después del tratamiento según parámetros .....	105
Figura 29: Intervalo del porcentaje de DQO vs TIEMPO - 20 V y pH 8 .....	111
Figura 30: Intervalo del porcentaje de DBO <sub>5</sub> vs TIEMPO - 20 V y pH 8 .....	113
Figura 31: Intervalo del porcentaje de DQO vs TIEMPO - 30 V y pH 8 .....	115
Figura 32: Intervalo del porcentaje de DBO <sub>5</sub> vs TIEMPO - 30 V y pH 8 .....	117

## RESUMEN

La contaminación causada por aguas residuales provenientes de diversas actividades humanas y vertidas en los ríos, generan problemas en el ecosistema de los ríos donde son vertidos, en nuestro caso nos centramos en las aguas residuales del Camal municipal de Chupaca el cual vierte sus aguas hacia el río Cunas, considerado como una de las fuentes de contaminación de este río. Por ello se planteó el presente trabajo para la reducción de materia orgánica con el uso del método de la electrocoagulación como propuesta para el tratamiento de las aguas residuales generadas en el Camal, tomando en cuenta en este tratamiento parámetros como el tiempo de retención, el pH, y el voltaje administrado.

Se inició con la toma de muestras para realizar la caracterización de las aguas residuales, donde encontramos valores más altos alcanzados de DQO 9962,6 mg/L, DBO<sub>5</sub> de 6822,5 mg/L, Conductividad eléctrica igual a 3620,0  $\mu$ Sm/cm, Solidos totales 4297,0 mg/L, valores que nos sirvieron como referencia para iniciar el trabajo.

De las pruebas experimentales se obtuvo como resultados, en la primera prueba con un pH inicial de 7 y tensión de corriente de 20 V, con tiempos de 30, 45 y 60 min, se obtuvo remociones de DQO de 51,6 %; 74,4 %; 82,5 %; DBO<sub>5</sub> de 56,9 %; 79,1 %; 87,4%, con valores de pH de 8,8; 9,6; 10,4 respectivamente. La segunda prueba con pH inicial de 8 y tensión de corriente 20V, con tiempos de 30, 45, 60 y 75min las remociones fueron en DQO 59,8 %; 72,8 %; 90,9 %; 91,0 %; en DBO<sub>5</sub> de 62,7 %; 80,1 %; 94%; 94,1%, valores de pH de 9,3; 10,4; 10,9; 11 respectivamente. La tercera prueba fue con pH inicial de 7 y tensión de corriente de 30 V, con tiempos de 30, 40 y 60 min, con remociones de DQO de 55 %; 73,5 %; 86,6%; los valores de DBO<sub>5</sub> fueron 61,6 %; 81,1%; 90,6%; los valores de pH de 9,1; 10,5; 11,4 respectivamente. La cuarta prueba con pH inicial de 8 y tensión de corriente de 30 V, con tiempos de 30, 45 y 60 min, las remociones de DQO fueron de 45,4 %; 75,3 %; 87,8 %; en la DBO<sub>5</sub> de 54,1 %; 81,3 %; 91,4 %; el pH de 9,9; 10,8; 11,6 respectivamente.

Para tener mayor confiabilidad en las pruebas de mayor remoción se realizaron réplicas de la prueba con pH 8 y tensión de corriente 20, con tiempos de 30, 45, 60 y 75min, obteniendo remociones de DQO 50,5 %; 77,3 %; 89,9 %; 90 %, para la DBO<sub>5</sub> se 59,2 %; 82,7 %; 93,2 %; 93,4 % con valores de pH de 9,6; 10,3; 11; 11,2 para cada caso. La segunda prueba de réplica fue con pH 8 y tensión de corriente de 30V, con tiempos de 30, 45 y 60 min, los valores de remoción de DQO fueron 45,5 %; 73 %; 87%; para la DBO<sub>5</sub> fueron 54,6; 79,4; 90,5 y pH de 9,5; 10,7; 11,4 respectivamente.

En base a los resultados obtenidos al realizar el tratamiento con electrocoagulación, se determinó una eficiencia de hasta 91 % de la DQO y un 94 % en la DBO<sub>5</sub>, trabajando con pH 8 y tensión de corriente de 20 V e iniciando con un pH neutro en la muestra. Debemos tener en cuenta no se tienen LMP para aguas efluentes de camales, por lo que al comparar con los LMP para efluentes de PTAR, los resultados obtenidos no se encuentran dentro de los parámetros permitidos por lo cual se debe realizar un tratamiento adicional complementario.

## ABSTRACT

The pollution caused by wastewater from various human activities and discharged into rivers, generate problems in the ecosystem of the rivers where the discharges are, in our case we focus on the wastewater of the Municipal Camal of Chupaca what pours its waters Towards the Cunas River, considered as one of the sources of contamination of this river. Therefore, the present work was proposed for the reduction of organic matter with the use of the electrocoagulation method as proposed for the treatment of the wastewater generated in the Camal, taking into account in this treatment parameters such as retention time, pH, and the voltage administered.

We started with the sample of samples to perform the characterization of the wastewater, where we found values of DQO 9962,6 mg/L, DBO<sub>5</sub> of 6822,5 mg/L, Electrical conductivity equal to 3620,0  $\mu\text{Sm/cm}$ , Total solids 4297,0 mg/L, values that did not serve as reference to start the work.

From the experimental tests results were obtained, in the first test with an initial pH of 7 and current voltage of 20 V, with the times of 30, 45 and 60 min, DQO removals were obtained of 51,6 %; 74,4 %; 82,5%; DBO<sub>5</sub> of 56,9 %; 79,1%; 87,4 %; pH values of 8,8; 9,6; 10,4 respectively. The second test with initial pH of 8 and current voltage 20 V, with the times of 30, 45, 60 and 75 min the removals were in DQO 59,8 %; 72,8 %; 90,9 %; 91,0 %; In DBO<sub>5</sub> of 62,7%; 80,1 %; 94 %; 94,1 %; pH values of 9,3; 10,4; 10,9; 11 respectively. The third test was with initial pH of 7 and current voltage of 30 V, with times of 30, 40 and 60 minutes, with removals of DQO of 55 %; 73,5 %; 86,6 %; The DBO<sub>5</sub> values were 61,6 %; 81,1 %; 90,6 %; pH values of 9,1, 10,5, 11,4 respectively. The fourth test with the initial pH of 8 and the current voltage of 30 V, with the times of 30, 45 and 60 min, DQO removals were 45,4 %; 75,3 %; 87,8 %; In the DBO<sub>5</sub> of 54,1 %; 81,3 %; 91,4 %, the pH of 9,9; 10,8; 11,6 respectively.

In order to have greater reliability in the tests of mayor, test replicas with pH 8 and current tension 20, with times of 30, 45, 60 and 75 min were obtained, obtaining removals of DQO 50,5 %; 77,3 %; 89,9 %; 90 %, for DBO<sub>5</sub> were 59,2 %; 82,7 %; 93,2 %; 93,4 % with pH values of 9,6; 10,3; 11,11; 2 for each case



The second test of fires with pH 8 and current voltage of 30 V, with the times of 30, 45 and 60 minutes, DQO removal values were 45,5 %; 73 %; 87 %; for the DBO<sub>5</sub> were 54; 6; 79,4; 90,5 and pH of 9,5; 10,7; 11,4 respectively.

Based on the results obtained in the treatment with electrocoagulation, an efficiency of up to 91 % of the DQO and 94 % in the DBO<sub>5</sub> was determined, working with pH 8 and voltage of current of 20 V and starting with a neutral pH in La Sample We must bear in mind that we do not have LMP for effluent water from camales, so all with the LMP for effluents from PTAR, the results obtained are not within the allowed parameters and therefore a complementary treatment must be carried out.

# INTRODUCCIÓN

Entre los problemas de contaminación en nuestra localidad está el de los recursos hídricos que vienen recibiendo aguas residuales sin previo tratamiento de distintas actividades humanas, una de estas actividades es el Camal Municipal de Chupaca, que vierte grandes cantidades de sus aguas residuales compuestas principalmente por grandes cantidades de carga orgánica, y restos de animales los que van hacia el río Cunas afectando así sus aguas, por lo cual nuestro objetivo principal fue determinar la eficiencia de la reducción de la carga orgánica de las aguas residuales del camal municipal de Chupaca mediante el método de electrocoagulación.

En la primera parte se realizó el planteamiento del problema, donde hablamos sobre la realidad problemática de las aguas del río Cunas afectadas por la contaminación, identificamos así los problemas y objetivos a alcanzar en nuestro trabajo, además se describe la importancia que tiene el tratamiento de las aguas residuales del Camal y las limitaciones encontramos en el desarrollo del trabajo. La segunda parte de la tesis contiene los fundamentos teóricos en los cuales nos basamos para poder construir y ejecutar el tratamiento de aguas con el método de la electrocoagulación, se consultó varias fuentes bibliográficas con trabajos realizados relacionados al tema, así mismo se hace un recuento del marco legal que tenemos en nuestro país, con los cuales se obtuvo un marco teórico que respalda los procedimientos realizados.

En la tercera se realizó el planteamiento metodológico, se detalla cómo se realizó los procedimientos para la construcción de la celda de electrocoagulación y las pruebas experimentales, se define las hipótesis planteadas y se realiza el procesamiento estadístico de la información obtenida durante la experimentación.

Finalmente, la cuarta parte presenta los resultados obtenidos, discusión de resultados y la contratación de hipótesis de todo el trabajo realizado, en esta parte vemos cuan eficiente llegó a ser el método de la electrocoagulación para el tratamiento de las aguas residuales de camal.

## **CAPÍTULO I**

### **1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1 Caracterización de la realidad problemática**

Durante muchos años atrás no se tomaba en cuenta el cuidado que debemos proporcionar a nuestro planeta, del cual obtenemos todos los recursos necesarios para el sostenimiento de la vida, es cierto que muchas culturas alrededor del mundo son muy cuidadosas con el medio donde viven, o lo eran, pero al pasar los años el factor económico se hizo mucho más importante que el bienestar de las personas y su medio, deteriorando de esta forma los ecosistemas en el mundo con gran cantidad de desechos de todo tipo de industrias; pero a raíz de los cambios abruptos que fueron aconteciendo y siguen ocurriendo llamado calentamiento global por la inmensa contaminación que producimos, muchos de los países en el mundo a través de sus organizaciones como el PNUMA (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente) están realizando acciones en favor a la conservación y recuperación de zonas degradadas de la naturaleza, así como la reducción de las emisiones de contaminantes en su entorno para salvaguardar el planeta para sus generaciones futuras, actuando como catalizador, defensor, educador y facilitador para promover el uso sensato y el desarrollo sostenible del medio ambiente global. (ONU medio ambiente, 2017). En el caso de los mataderos o industrias de la

carne en los países desarrollados se trabaja bajo estándares y cumpliendo la normativa impuesta por sus estados, con lo cual se controla y en muchos casos se elimina los residuos líquidos que generan en sus procesos, haciendo que este tipo de actividad no genere contaminación a sus aguas superficiales.

En Latinoamérica que alberga gran diversidad de ecosistemas, tenemos problemas medio ambientales mayores en relación a las economías de otros lugares del mundo, pues se depende mucho de la explotación y extracción de los recursos naturales para el crecimiento económico de los países, siendo el gobierno de cada país responsable de salvaguardar sus recursos dentro de su ámbito imponiendo o rigiéndose a los estándares para la conservación ambiental. También existen la cooperación para este fin entre los países, para ello es necesario la coordinación y el trabajo en conjunto para el logro del objetivo de salvaguardar los recursos naturales. (Ovalles, 2006) En estos países de Latinoamérica también se manejan los mataderos o industrias de la carne, siendo en su mayoría controlados en el caso de grandes industrias, pero en el caso de los mataderos y más aún en distritos pequeños se encuentran gran informalidad por lo cual no se realiza el control necesario para sus efluentes, contaminando de esta forma las aguas superficiales más cercanas a su labor. (Guerrero E. & Ramirez F., 2004)

Al hablar del tema de mataderos o camales en nuestro país, la situación es más crítica porque no se realiza la supervisión y fiscalización estricta de estos lugares, en la mayoría de casos informales y por consiguiente no realizan tratamiento a sus residuos y los eliminan en aguas superficiales, afectando así este recurso tan importante.

En nuestro ámbito local, tenemos dentro de las múltiples fuentes de contaminación hacia el río Cunas, aguas residuales domésticas, mineras y otros como las aguas residuales emitidas por el Camal Municipal de

Chupaca, considerado una de las principales fuentes de contaminación de este río. El camal municipal de Chupaca viene funcionando hace muchos años atrás de la misma forma artesanal, laborando todos los días de la semana y con mucha mayor demanda los fines de semana donde se realiza la feria tradicional en este distrito, con gran importancia porque forma parte de las actividades económicas de la población de la zona.

La cantidad de cabezas de ganado vacuno que ingresan al camal es de 500 a 600 al mes, según reportes del mes del 2016 del camal municipal, por lo que diariamente se trabaja entre 12 a 15 animales y los fines de semana esta cantidad se duplica según la demanda. (Chupaca, 2017)

No se tiene un registro de la cantidad de agua consumida por el camal municipal, pero según bibliografía que sabe que el consumo promedio por sacrificio de ganado vacuno es de 600 L de agua, por lo que se deduce que diariamente se consume un promedio de 7000 a 8000 litros de agua, que es utilizada por la cantidad de animales sacrificados, por lo que no se tienen un control adecuado de este recurso.

Las aguas residuales del camal contienen principalmente sangre, restos de pelos, grasas, heces y otros de origen animal (Salas C. & Condorhuamán C., 2008), por lo que estas aguas aportan hacia el río un gran contenido de materia orgánica, el cual se vierte sin previo tratamiento directamente hacia las aguas del río Cunas, convirtiéndose en una fuente más de contaminación hacia el río, que aporta grandes cantidades de carga orgánica que serán necesarios descomponer por los organismos descomponedores acuáticos quienes consumirán grandes cantidades de oxígeno disuelto para cumplir con este fin, además provoca el crecimiento rápido de diversas algas en el agua, fenómeno que es llamado eutrofización; teniendo como resultado final el perjuicio a la vida acuática en el río tales como diversos organismos aerobios, la flora y fauna que con el paso del tiempo van disminuyendo y desapareciendo. (Muñoz, 2005)

La UAP siendo una casa de estudios y teniendo dentro de ella profesionales en formación, es deber nuestro dar solución de estos problemas cercanos a nuestro lugar de estudios, por ello es que se necesita proponer una forma

de tratar estas aguas reduciendo en esta oportunidad la carga orgánica mediante el método de la electrocoagulación.

## **1.2 Formulación del problema**

### **1.2.1 Problema general**

¿Cuál es la eficiencia de la reducción de la carga orgánica del tratamiento avanzado de aguas residuales del camal municipal de Chupaca mediante el método de electrocoagulación?

### **1.2.2 Problemas específicos**

- ¿Cuál es la composición físico química de las aguas residuales del Camal municipal de Chupaca?
- ¿Cuál es el tiempo de retención hidráulica necesario para el tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Chupaca mediante el método de electrocoagulación?
- ¿Cómo influye el pH en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Chupaca mediante el método de electrocoagulación?
- ¿Cómo influye la tensión de corriente en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Chupaca mediante el método de electrocoagulación?

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Evaluar la eficiencia de la reducción de la carga orgánica del tratamiento avanzado de aguas residuales del camal municipal de Chupaca mediante el método de electrocoagulación

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Determinar la composición físico química de las aguas residuales del Camal municipal de Chupaca

- Evaluar el tiempo de retención hidráulica necesario para el tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Chupaca mediante el método de electrocoagulación
- Evaluar la influencia el pH en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Chupaca mediante el método de electrocoagulación.
- Evaluar la influencia la tensión de corriente en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Chupaca mediante el método de electrocoagulación

#### **1.4 Justificación**

El tratamiento de las aguas residuales de los camales, necesitan de una solución inmediata para la solución de la contaminación que genera hacia las fuentes de agua, en este caso la contaminación causada por el Camal Municipal de Chupaca que desecha sus residuos líquidos hacia el río Cunas, conteniendo grandes cantidades de carga orgánica y otros, que degradan las aguas del río, a pesar que en una visita al referido camal, el personal que labora en el lugar, indican que se realizan un tratamiento de todos sus residuos líquidos antes de eliminarlos, pero no se pudo corroborar este proceso, según indicios de la población del lugar indican que durante las noches se eliminan los residuos líquidos hacia el río Cunas, estas aguas residuales generan y emiten fuertes olores causando malestar en la población del lugar, que diariamente perciben estos olores y con mayor intensidad en horas de las noches. Por consiguiente, como personas responsables del medio ambiente y como profesionales formados en este campo es deber nuestro propiciar la exploración de nuevas líneas de investigación o aplicar los métodos conocidos eficientemente para la solución de este y otros problemas ambientales.

La investigación se realiza porque es necesario contar con un tratamiento efectivo, donde el método ayude a disminuir la mayor cantidad de carga orgánica en un periodo de tiempo aceptable para obtener un resultado

donde la calidad del agua mejore y los costos del proceso no sean elevados.

### **1.5 Importancia**

El método de la electrocoagulación es utilizado actualmente en distintas industrias para reducir la carga orgánica y otros componentes de forma eficiente. Para la obtención de resultados satisfactorios es necesario tomar en cuenta parámetros y condiciones óptimas que nos ayudarán a la mejor eficiencia de este proceso. El beneficio que se pretende obtener no solo será para la empresa del camal municipal de Chupaca quienes tendrán una opción válida para realizar el tratamiento de sus residuos líquidos evitando contaminar y resolviendo los conflictos que tienen con la población del lugar y los que hacen uso de las aguas del río Cunas en actividades como el riego de sembríos aguas abajo. El beneficio no solo es para los mencionados, también consideremos al delicado ecosistema que subsiste en el río.

### **1.6 Limitaciones**

En cuanto a las limitaciones teóricas, en nuestra ciudad no se encuentran trabajos realizados con el método de electrocoagulación para tratamiento de aguas residuales del Camal Municipal, pero se tiene antecedentes de otros trabajos donde se aplican muy eficientemente este método en distintas industrias donde las cargas orgánicas de sus aguas residuales son altas.



## **CAPÍTULO II**

### **2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

#### **2.1 Marco referencial**

##### **2.1.1 Antecedentes de la investigación**

- (Julio Isasc Maldonado M, 2006), las aguas residuales de mataderos industriales de ganado vacuno y porcino son los vertimientos líquidos que impactan los sistemas de alcantarillados sanitarios y los cuerpos receptores, con cargas orgánicas que representan en poblaciones pequeñas y medianas hasta el 80% del aporte contaminante municipal, por esta razón se construyó, operó y evaluó a escala laboratorio un sistema de tratamiento en serie conformado por un Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA) inoculado y un reactor secundario aeróbico de Discos Biológicos Rotatorios (Biodiscos), comprobándose que este sistema permite tratar estas aguas residuales industriales con buenas eficiencias en la remoción de Materia Orgánica (92 – 97 % DBO<sub>5</sub> y 87,72 – 94,5 % DQO) con TRH entre 3,33 y 2,10 días, con cargas orgánicas volumétricas (COV) aplicadas sobre el FAFA entre 2,62 y 6,3 Kg. DQO total/m<sup>3</sup>-d y entre 2,25 – 6,32 gDQO total/m<sup>2</sup>-día aplicadas sobre los Biodiscos (TRH=1,33 -2,11días), realizando

aceptables remociones de Coli-fecales > al 97 % (FAFA: 78 %; Biodiscos: 88,8 – 95 %).

- (Sierra Ramirez & Vivas Albarracin, 2005), nos dicen que el tratamiento de aguas residuales se hace cada vez más importante, no solo para reducir las cargas contaminantes que a diario son descargadas a cuerpos de agua, sino además para evitar la disminución de su capacidad de auto purificación, sobre todo cuando se trata de vertimientos industriales. Es por ello que las autoras diseñaron e implementaron para el matadero de Macanal (Boyacá) una unidad de tratamiento biológico no convencional: Reactor Facultativo de Flujo a Pistón de Flujo descendente (RFP). Adicionalmente, se diseñó una trampa de grasas, dos sedimentadores primarios (uno de ellos en Stand-by) y un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente sobre manto de lodos (UASB) como tratamiento preliminar y primario para disminuir las cargas afluentes al RFP y un sedimentador secundario después del RFP, para precipitación de solidos suspendidos.

Se monitorearon varios parámetros del agua residual en el RFP (principalmente DBO, DQO, SST, Alcalinidad, AGV y Grasas y aceites) para controlar la operación de la planta.

En la fase de arranque fue necesario agregar lodo anaerobio para agilizar esta etapa o de lo contrario de hubiera requerido de más tiempo para la aclimatación de los microorganismos. En la fase de funcionamiento bajo condiciones de diseño se operó el RFO tomando como base los criterios utilizados por expertos sobre el funcionamiento del RAP, pero teniendo en cuenta un mecanismo de tratamiento completo alcanzó un valor del 82 %.

- (Marcos Hernandez, y otros, 2002), realizaron el trabajo donde caracterizan los efluentes de un matadero, a través de los parámetros característicos como el pH, la DQO, la DBO, así como los sólidos totales, acidez y alcalinidad, para en otra fase posterior diseñar un digestor anaerobio que trate estos residuos y obtener los rendimientos de metano generados y la eliminación en materia orgánica, medida como DQO, con el fin de diseñar un prototipo de biodigestor para la cogeneración de electricidad y calor a partir de estos residuos.
- (Molinet Coll & Pigem comeselle, 2004), los mataderos son industrias agroalimentarias que producen una elevada contaminación del agua procedente de los procesos propios de fabricación, debido a una gran variedad de razones. En función de su ubicación en el territorio precisarán de un tratamiento de depuración más o menos profundo, dependiendo de si el vertido se efectúa directamente a cauce público o a redes de saneamiento. Para determinar el tratamiento más adecuado para las aguas residuales de un matadero el análisis de los métodos de depuración permite formular las siguientes conclusiones: Resulta muy complicado realizar una caracterización de las aguas residuales de los mataderos, los procesos biológicos tanto aerobios como anaerobios precisan tratamientos previos de eliminación de sólidos, grasas y sangre, que reducen notablemente la carga contaminante total.
- (Salas C. & Condorhuamán C., 2008), los residuos líquidos producidos en un centro de beneficio o matadero son efluentes que contienen sangre, rumen, pelos, grasas, proteínas. La generación de vertidos de aguas residuales tiene una carga orgánica, DBO y de nutrientes media-alta (sangre) con un contenido importante de sólidos en suspensión (rumen), grasas

y aceites, así como vertidos líquidos de la operación de escaldado y lavado de carcazas, limpieza de equipos e instalaciones. En el campo del tratamiento de aguas residuales de mataderos, la flotación por aire disuelto (DAF) se usa, entre otros, para la separación de grasas, aceites, y sangre coloidal, en los cuales el DAF ha demostrado ser el sistema de separación de fases más eficiente. Durante todas las experiencias la temperatura del agua varió entre 20 y 22 °C. El punto de muestreo fue el efluente que ingresa al DAF. Las características fueron: pH = 7,2; DBO (mg/L) = 9300 mg/L. DQO = 4 700 mg/L, grasas y aceites F&G = 28 mg/L. La relación aire-sólidos, A/S, en las diferentes experiencias varió entre 0,0014 y 0,0038. La máxima eficiencia de remoción de DBO es para una recirculación de 100 %. La flotación con aire disuelto (DAF) permite reducir la carga contaminante contenida en los efluentes generados en el matadero, reduciendo el DBO5 en 80 %, DQO en 75 % y grasas y aceites en 95 %.

- (Chen G. , 2004), describió el desarrollo, diseño y aplicaciones de tecnologías electroquímicas en el tratamiento de agua y aguas residuales. Se dio especial atención a la electrodeposición, electrocoagulación (EC), electroflotación (EF) y electrooxidación. La electrodeposición es eficaz para recuperar metales pesados de corrientes de aguas residuales. Se considera como una tecnología establecida con un posible desarrollo adicional en la mejora del rendimiento espacio-temporal. EC ha estado en uso para la producción de agua o tratamiento de aguas residuales. Está encontrando más aplicaciones usando Aluminio, hierro o los electrodos híbridos Al / Fe. La separación de los lodos floculados del agua tratada se puede lograr usando EF. La tecnología EF es eficaz en la eliminación de partículas coloidales, aceite y grasa, así como

contaminantes orgánicos. Se ha demostrado que funciona mejor que la flotación de aire disuelto, la sedimentación, la flotación del impulsor (IF). Los nuevos electrodos estables y activos para la evolución del oxígeno definitivamente impulsarían la adopción de esta tecnología. La electrooxidación está encontrando su aplicación en el tratamiento de aguas residuales en combinación con otras tecnologías. Es eficaz para degradar los contaminantes refractarios en la superficie de unos pocos electrodos.

- (Kobyas, Can, & Bayramoglu, 2003), Se ha encontrado que el uso de hierro y aluminio como materiales de electrodo de sacrificio en el tratamiento de aguas residuales textiles por electrocoagulación depende del pH. Según los resultados, en medio ácido.  $\text{pH} < 6$ , DQO y eficiencia de remoción de turbidez de aluminio son mayores que los de hierro, mientras que en condiciones neutras y alcalinas es preferible. La alta conductividad favorece las altas prestaciones del proceso. Por otra parte. Para las mismas eficiencias de remoción de turbidez o DQO, el hierro requiere una densidad de corriente de 80-100  $\text{A} / \text{m}^2$ , mientras que el aluminio requiere 150  $\text{A} / \text{m}^2$  para un tiempo de operación de 10 min. Los experimentos muestran que el tiempo de operación y la densidad de corriente presentan efectos similares en las prestaciones del proceso, en la energía eléctrica y en los valores de consumo de electrodos. Por lo tanto, la carga de carga del producto de estas dos variables de proceso, se puede utilizar más convenientemente en el diseño del proceso y las tareas de optimización. Por último, el consumo de energía kWh por kg de DQO eliminado es menor con hierro. Mientras que el consumo de electrodo por kg de DQO eliminado es generalmente menor con el aluminio. Es evidente que estos dos importantes costos de operación influirán fuertemente en la

decisión sobre el tipo de material de electrodo sacrificial para las características de aguas residuales dadas y los niveles de DQO y eliminación de turbidez impuestos por las restricciones ambientales sobre los efluentes del proceso.

### **2.1.2 Referencias históricas.**

- (Hernandez Lehmann, 2011), se establecen tres fases de investigación. En la primera trabajando el sistema discontinuo, sistema batch, la segunda con una planta de laboratorio en discontinuo, para investigar sobre los parámetros que intervienen en el proyecto, utilizando los resultados en el diseño y construcción de una planta real, 144 L/h, ensayando la tercera parte sobre la eficacia del proceso de electrocoagulación en el cumplimiento las normativas actuales de reutilización, en relación con la reducción de parámetros físico - químicos de las aguas (SS, turbidez, nitrógeno y fósforo), así como la reducción de la contaminación biológica de las aguas (E. coli, legionella, presencia de parásitos como nematodos y tenia), analizando el consumo energético del proceso.

Se han establecido como parámetros fundamentales: uno de los parámetros básicos de diseño a escala piloto, que se ha considerado, en la relación de superficie electrolítica sobre el volumen de la disolución o del reactor, a escala laboratorio ( $A/V$ ), que es una medida del potencial para la liberación de coagulante y burbujas a un sistema (sobre una base volumétrica). La densidad de corriente, definida como la corriente por un área activa de electrodo, es otro parámetro de diseño de escala utilizado.

Considerando todo lo anterior se diseñó la planta piloto, en la que el agua a tratar pasa secuencialmente a través de un depósito de pretratamiento, un depósito de procesamiento

electroquímico, un depósito de post-tratamiento, que puede pasar a un decantador o a un depósito de flotación.

El electrocoagulador se construyó en metacrilato con unas dimensiones internas de 27,5 x 49,5 x 49,5 cm. en una primera serie de experimentos se establecerían 4 placas de electrodo, 2 cátodos y 2 ánodos de aluminio, y 3 placas intermedias de acero. De la misma forma de trabajó en la segunda línea, pero como placas de hierro. Las dimensiones de las placas de aluminio fueron de 250 x 500 x 1,5 mm, las placas de hierro de 250 x 250 x 1,0 mm., y el espacio entre electrodos de 4,75 cm. los electrodos se conectaron a una fuente de alimentación, que tienen una salida variable entre 300 V y 10 A.

La experimentación realizada concluye sobre los buenos resultados de la aplicación del sistema de electrocoagulación, en relación con el grado de cumplimiento respecto a las normativas actuales de reutilización. Los resultados garantizan las posibilidades del proceso en la eliminación de: la turbidez, solidos suspendidos totales (SST), DQO y fosfatos en fósforo total, así como en la eliminación de microorganismos.

Estos resultados justifican que la electrocoagulación puede constituirse en un sistema de tratamiento y depuración de las aguas tanto en la lucha contra la eutrofización de las aguas eliminando fosfatos, como en la mejora de las aguas de forma previa al empleo de membranas, como en la mejora de calidad de las aguas de salida de las depuradoras o circulante por los ríos. Su sencillez, facilidad de montaje y bajo consumo energético lo avalan.

- (Mariz Medeiros, 2011), La emisión de olores en las depuradoras de aguas residuales representa un impacto significativo. Una mayor concientización de la población sobre sus derechos y el aumento del número de depuradoras en

explotación, asociadas a las presiones urbanas sobre áreas desocupadas que fuerzan la construcción de residencias y/o complejos de ocio cada vez más próximos de las depuradoras, obligan a las empresas responsables de las depuradoras a considerar este problema, buscando soluciones de forma constante para evitar conflictos con las comunidades.

La utilización de procesos electroquímicos para el tratamiento de aguas residuales está adquiriendo cada día más importancia por su versatilidad, reducido tamaño y capacidad de automatización. En este sentido, resultan de especial interés la electrocoagulación, como procedimiento de tratamiento de compuestos olorosos presentes en aguas residuales.

Durante la presente investigación se ha estudiado la eliminación de los siguientes compuestos olorosos mediante el proceso de electrocoagulación: sulfuro de carbono, amoníaco, ácido acético, tolueno y diclorometano.

Se ha investigado, al efecto, del diseño del reactor (configuración 1 fuente, configuración 2 fuentes seguidas y configuración de 2 fuentes separadas), naturaleza de los electrodos (grafito y aluminio), y corriente eléctrica aplicada de (0,5 A; 2 A; 4 A; 6 A; 8 A y 9,5 A).

La investigación experimental se ha llevado a cabo en una planta piloto de la cátedra de ingeniería sanitaria, instalada en la EDAR de Viveros de la Villa, empleando como influente el agua procedente de la decantación secundaria de depuradora. Para simular el tratamiento fue necesario adicionar los productos artificialmente en el tanque de pre-tratamiento de la planta piloto. En referencia al amoníaco, se realizarán con la adición artificial del amoníaco para simular el tratamiento en la cabecera de la planta, y sin la adición artificial del amoníaco para simular el tratamiento como un afino para depuradoras.



Mediante el tratamiento como ánodo de aluminio y cátodo de aluminio se observaron rendimientos satisfactorios para el sulfuro de carbono y se determinó un rendimiento óptimo mediante electrodos de aluminio separados entre sí 2,5 cm. utilizando la configuración de 1 fuente y aplicando intensidades muy bajas. (0,5 amperios.)

No se observó acción significativa sobre el contenido de ácido acético, tolueno, diclorometano y amoníaco, sin embargo, se desarrolla una aceleración de la oxidación en el agua muestreada al disminuir las concentraciones de nitrito y aumentar las concentraciones de nitrato.

La electrooxidación, mediante ánodo de grafito, se presentó como una técnica eficiente para un afino de depuradoras en relación a la eliminación del amoníaco, presentando rendimientos apreciables para el tratamiento de amoníaco en la cabecera de depuradoras. Se alcanzaron rendimientos medios de 34 % en la reducción del amoníaco, utilizando la configuración 2 fuentes seguidas por electrodos separados entre sí 2,5, aplicando 4 A de corriente eléctrica y consumiendo 15 w/h.

Se concluye también que el rendimiento del proceso se presenta inversamente proporción a las concentraciones de amoníaco en la entrada del proceso, y que la mayor parte del amoníaco eliminado por electrooxidación pasa a nitrógeno gas. Desde el punto de vista económico la electrooxidación mediante ánodo de grafito es eficiente por presentar los mayores rendimientos con un aporte de energía bajo y bajos tiempos de retención.

A pesar del comportamiento variable del sulfuro de carbono se observan rendimientos satisfactorios para el sulfuro de carbono y se determinó un rendimiento óptimo mediante electrodos de aluminio separados entre sí 2,5 cm, utilizando la configuración

de 1 fuente, y aplicando intensidades muy bajas (0,5 amperios). En referencia al tolueno se apreció un ligero rendimiento, mientras que no se observó acción significativa sobre el diclorometano y ácido acético

El objetivo fundamental buscado y alcanzado en esta investigación, es facilitar el escalonado de procesos de electrocoagulación necesarios para la eliminación de compuestos olorosos presentes en aguas residuales. Se concluye entonces que esta técnica es un arma positiva que permite una optimización de la calidad del agua eliminando compuestos olorosos.

- (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006), la electrocoagulación es una tecnología limpia emergente que se conoce desde principios del siglo XX y ha sido aplicada en el tratamiento de diversas aguas residuales. Pese a ello, esta tecnología no se ha desarrollado ampliamente y aún falta mucho por investigar sobre sus procesos y mecanismos. Se realiza una revisión de la electrocoagulación, presentando su evolución histórica, discutiendo los retos y oportunidades de esta tecnología, presentando su potencial de aplicación además de sus ventajas, 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.
- (Ilhan, Kunt, Apaydin, & Talha Gonullu, 2008), El tratamiento del lixiviado mediante electrocoagulación (EC) se ha investigado en un proceso discontinuo. La muestra de lixiviado fue suministrada desde Odayeri Landfill en Estambul. En primer

lugar, EC se comparó con el proceso clásico de Coagulación Química (CQ) mediante la eliminación de DQO. Los primeros resultados de comparación con una densidad de corriente de 348 A/m<sup>2</sup> mostraron que el proceso EC tiene mayor rendimiento de tratamiento que el proceso CQ. En segundo lugar. Efectos de variables de proceso tales como material de electrodo, densidad de corriente (de 348 a 631 A/m<sup>2</sup>), pH, costo de tratamiento, y el tiempo de operación para el proceso de EC se investigan sobre las eficiencias de eliminación de DQO y NH<sub>4</sub>-N. La búsqueda de tipo de electrodo apropiada para EC proporcionó que el aluminio suministra más eliminación de DQO (56%) que el electrodo de Hierro (35%) al final de los 30 minutos de funcionamiento. Finalmente, también se continuaron los experimentos de la CE para determinar la eficiencia de la remoción de amoníaco, y los efectos de la densidad de corriente, mezcla y aireación. Todas las conclusiones del estudio revelaron que el tratamiento del lixiviado por EC puede ser utilizado como un paso de un tratamiento conjunto.

- (Chen, Chen, & Lock Yue, 2000), Se investigaron las características de las aguas residuales de los restaurantes. Se detectaron altos contenidos de aceite y grasa. La electrocoagulación se utilizó para tratar este tipo de aguas residuales. Se examinaron diferentes materiales de electrodo y condiciones operacionales. El aluminio se prefirió al hierro. Se encontró que la carga de carga era la única variable que afectó significativamente la eficacia del tratamiento. La carga óptima y la densidad de corriente fueron de 1,67 -9,95 F/m<sup>3</sup> de aguas residuales y de 30-80 A/m<sup>2</sup> dependiendo de las aguas residuales analizadas. La eficiencia de remoción de aceite y grasa fue del 94% para todas las aguas residuales ensayadas. Los resultados experimentales también muestran que la

electrocoagulación puede neutralizar el pH del agua residual. Se proponen varios mecanismos asociados con la variación del pH.

- (Holt, Barton, & Mitchell, 1999), La coagulación y la floculación son métodos tradicionales para el tratamiento del agua contaminada. La electrocoagulación presenta una robusta e innovadora alternativa en la que un ánodo de metal de sacrificio dosifica el agua de forma electroquímica. Esto tiene la ventaja principal de proporcionar cationes activos requeridos para la coagulación, sin aumentar la salinidad del agua.

La electrocoagulación es un proceso complejo con una multitud de mecanismos que operan sinérgicamente para eliminar contaminantes del agua. Existe una amplia variedad de opiniones en la literatura sobre mecanismos clave y configuraciones de reactores. La falta de un enfoque sistemático ha dado lugar a una mirada de diseños para reactores de electrocoagulación sin tener debidamente en cuenta la complejidad del sistema. Se requiere un enfoque sistemático y holístico para entender la electrocoagulación y sus parámetros de control. Esto permitirá una predicción a priori del tratamiento de diversos tipos de contaminantes.

## 2.2 Marco legal

### 2.2.1 LEY N° 28611 - Ley General Del Ambiente

- **Artículo 31° . - Del Estándar de Calidad Ambiental.**

31.1 El Estándar de Calidad Ambiental - ECA es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos. (...)"

- **Artículo 121° . - Del vertimiento de aguas residuales.**

El Estado emite en base a la capacidad de carga de los cuerpos receptores, una autorización previa para el vertimiento de aguas residuales domésticas, industriales o de cualquier otra actividad desarrollada por personas naturales o jurídicas, siempre que dicho vertimiento no cause deterioro de la calidad de las aguas como cuerpo receptor, ni se afecte su reutilización para otros fines, de acuerdo a lo establecido en los ECA correspondientes y las normas legales vigentes."

- **Artículo 122° . - Del tratamiento de residuos líquidos.**

122.1 Corresponde a las entidades responsables de los servicios de saneamiento la responsabilidad por el tratamiento de los residuos líquidos domésticos y las aguas pluviales.

122.3 Las empresas o entidades que desarrollan actividades extractivas, productivas, de comercialización u otras que generen aguas residuales o servidas, son responsables de su tratamiento, a fin de reducir sus niveles de contaminación hasta niveles compatibles con los LMP, los ECA y otros estándares establecidos en instrumentos de gestión ambiental, de

conformidad con lo establecido en las normas legales vigentes. El manejo de las aguas residuales o servidas de origen industrial puede ser efectuado directamente por el generador, a través de terceros debidamente autorizados a o a través de las entidades responsables de los servicios de saneamiento, con sujeción al marco legal vigente sobre la materia.”

### **2.2.2 LEY N° 29338.- Ley De Recursos Hídricos**

- **Artículo 15°. - Funciones de la Autoridad Nacional.**

(...) 4. Elaborar el método y determinar el valor de las retribuciones económicas por el derecho de uso de agua y por el vertimiento de aguas residuales en fuentes naturales de agua, valores que deben ser aprobados por decreto supremo; así como aprobar las tarifas por uso de la infraestructura hidráulica, propuestas por los operadores hidráulicos. 7. Otorgar, modificar y extinguir, previo estudio técnico, derechos de uso de agua, así como aprobar la implementación, modificación y extinción de servidumbres de uso de agua, a través de los órganos desconcentrados de la Autoridad Nacional.”

- **Artículo 76°. - Vigilancia y fiscalización del agua.**

La Autoridad Nacional en coordinación con el Consejo de Cuenca, en el lugar y el estado físico en que se encuentre el agua, sea en sus cauces naturales o artificiales, controla, supervisa, fiscaliza el cumplimiento de las normas de calidad ambiental del agua sobre la base de los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA-Agua) y las disposiciones y programas para su implementación establecidos por autoridad del ambiente. También establece medidas para prevenir, controlar y remediar la contaminación del agua y los bienes asociados a esta. Asimismo, implementa actividades de

vigilancia y monitoreo, sobre todo en las cuencas donde existan actividades que pongan en riesgo la calidad o cantidad del recurso.”

- **Artículo 79° . - Vertimiento de agua residual.**

La Autoridad Nacional autoriza el vertimiento del agua residual tratada a un cuerpo natural de agua continental o marina, previa opinión técnica favorable de las Autoridades Ambiental y de Salud sobre el cumplimiento de los ECA-Agua y LMP. Queda prohibido el vertimiento directo o indirecto de agua residual sin dicha autorización.

En caso de que el vertimiento del agua residual tratada pueda afectar la calidad del cuerpo receptor, la vida acuática asociada a este o sus bienes asociados, según los estándares de calidad establecidos o estudios específicos realizados y sustentados científicamente, la Autoridad Nacional debe disponer las medidas adicionales que hagan desaparecer o disminuyan el riesgo de la calidad del agua, que puedan incluir tecnologías superiores, pudiendo inclusive suspender las autorizaciones que se hubieran otorgado al efecto. En caso de que el vertimiento afecte la salud o modo de vida de la población local, la Autoridad Nacional suspende inmediatamente las autorizaciones otorgadas.

Corresponde a la autoridad sectorial competente la autorización y el control de las descargas de agua residual a los sistemas de drenaje urbano o alcantarillado.”

- **Artículo 80° . - Autorización de vertimiento.**

Todo vertimiento de agua residual en una fuente natural de agua requiere de autorización de vertimiento, para cuyo efecto debe presentar el instrumento ambiental pertinente aprobado

por la autoridad ambiental respectiva, el cual debe contemplar los siguientes aspectos respecto de las emisiones:

1. Someter los residuos a los necesarios tratamientos previos.
2. Comprobar que las condiciones del receptor permitan los procesos naturales de purificación.

La autorización de vertimiento se otorga por un plazo determinado y prorrogable, de acuerdo con la duración de la actividad principal en la que se usa el agua y está sujeta a lo establecido en la Ley y en el Reglamento.”

- **Artículo 82°. - Reutilización de agua residual.**

La Autoridad Nacional, a través del Consejo de Cuenca, autoriza el reúso del agua residual tratada, según el fin para el que se destine la misma, en coordinación con la autoridad sectorial competente y, cuando corresponda, con la Autoridad Ambiental Nacional. El titular de una licencia de uso de agua está facultado para reutilizar el agua residual que genere siempre que se trate de los mismos fines para los cuales fue otorgada la licencia. Para actividades distintas, se requiere autorización. La distribución de las aguas residuales tratadas debe considerar la oferta hídrica de la cuenca.”

- **Artículo 83°. - Prohibición de vertimiento de algunas sustancias.**

Está prohibido verter sustancias contaminantes y residuos de cualquier tipo en el agua y en los bienes asociados a ésta, que representen riesgos significativos según los criterios de toxicidad, persistencia o bio-acumulación. La Autoridad Ambiental respectiva, en coordinación con la Autoridad Nacional, establece los criterios y la relación de sustancias prohibidas.”



- **Artículo 135°.** - **Prohibición de efectuar vertimientos sin previa autorización.**

135.1 Ningún vertimiento de aguas residuales podrá ser efectuado en las aguas marítimas o continentales del país, sin la autorización de la Autoridad Nacional del Agua.

135.2 En ningún caso se podrá efectuar vertimientos de aguas residuales sin previo tratamiento en infraestructura de regadío, sistemas de drenaje pluvial ni en los lechos de quebrada seca.”

- **Artículo 137°.** - **Otorgamiento de autorizaciones de vertimientos de aguas residuales tratadas.**

137.1 La Autoridad Nacional del Agua otorga autorizaciones de vertimientos de aguas residuales tratadas con las opiniones previas técnicas favorables de la Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud y de la autoridad ambiental sectorial competente de acuerdo al procedimiento que, para tal efecto, establece dicha Autoridad. (...)”

### **2.2.3 Reglamento de la Ley N°29338, Aprobado por DS N°001-2010-AG**

- **Artículo 131°.** - **Aguas residuales y vertimientos.**

Para efectos del Título V de la Ley se entiende por: a. Aguas residuales, aquellas cuyas características originales han sido modificadas por actividades antropogénicas, tengan que ser vertidas a un cuerpo natural de agua o reusadas y que por sus características de calidad requieren de un tratamiento previo. b. Vertimiento de aguas residuales, es la descarga de aguas residuales previamente tratadas, en un cuerpo natural de agua continental o marítima. Se excluye las provenientes de naves y artefactos navales.”

- **Artículo 133°. - Condiciones para autorizar el vertimiento de aguas residuales tratadas.**

133.1 La Autoridad Nacional del Agua podrá autorizar el vertimiento de aguas residuales únicamente cuando:

- a. Las aguas residuales sean sometidas a un tratamiento previo, que permitan el cumplimiento de los LMP.
  - b. No se transgredan los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, ECA - Agua en el cuerpo receptor, según las disposiciones que dicte el Ministerio del Ambiente para su implementación.
  - c. Las condiciones del cuerpo receptor permitan los procesos naturales de purificación.
  - d. No se cause perjuicio a otro uso en cantidad o calidad del agua.
  - e. No se afecte la conservación del ambiente acuático.
  - f. Se cuente con el instrumento ambiental aprobado por la autoridad ambiental sectorial competente.
  - g. Su lanzamiento submarino o subacuático, con tratamiento previo, no cause perjuicio al ecosistema y otras actividades lacustre, fluviales o marino costeras, según corresponda.
- (...)

#### **2.2.4 D.S. N° 002–2008-MINAM, Aprueban ECA para Agua**

- **Artículo 1.- Aprobación de los estándares nacionales de calidad ambiental para agua.**

(...) el objetivo de establecer el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos o biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor o componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente. (...)

*Tabla 1: Categoría 3 - Riego de Vegetales y bebidas de Animales,  
Parámetros para Riego de Vegetales de Tallo Bajo y Tallo Alto*

<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	40
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: Extraído de D.S. N° 002 – 2008-MINAM

### **2.2.5 D.S. N°023-2009-MINAM, que aprueba las disposiciones para la implementación de los ECA para agua**

- **Artículo 2.- precisiones de las categorías de los ECA para agua**

#### **c. Categoría 3. Riego de vegetales y bebida de animales.**

i. Vegetales de tallo bajo: entiéndase como aguas utilizadas para el riego de plantas, frecuentemente de porte herbáceo o de poca longitud de tallo; que usualmente tienen un sistema radicular difuso o fibroso y poco profundo. Ejemplo. ajo, lechuga, fresa, col, repollo, apio, arvejas, similares.

ii. Vegetales de tallo alto: entiéndase como aguas utilizadas para el riego de plantas, de porte arbustivo o arbóreo, que tienen una mayor longitud de tallo. Ejemplos: árboles forestales, árboles frutales, entre otros.

iii. Bebida de animales: entiéndase como aguas utilizadas para bebida de animales mayores como ganado vacuno, ovino, porcino, equino, camélido, y para animales menores como ganado caprino, cuyes, aves, y conejos.

### **2.2.6 D.S. N° 015-2015-MINAM, Modifican Los ECA para Agua y Establecen Disposiciones Complementarias para su Aplicación**

- **Artículo 2.- ECA para Agua y políticas públicas**

Los ECA para Agua son de cumplimiento obligatorio en la determinación de los usos de los cuerpos de agua, atendiendo a sus condiciones naturales o niveles de fondo, y en el diseño de normas legales y políticas públicas, de conformidad con lo dispuesto en la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente.

- **Artículo 3.- ECA para Agua e instrumentos de gestión ambiental**

3.2. Los titulares de la actividad extractiva, productiva y de servicios deben prevenir y/o controlar los impactos que sus operaciones pueden generar en los parámetros y concentraciones aplicables a los cuerpos de agua dentro del área de influencia de sus operaciones, advirtiendo entre otras variables, las condiciones particulares de sus operaciones y los insumos empleados en el tratamiento de sus efluentes; dichas consideraciones deben ser incluidas como parte de los compromisos asumidos en su instrumento de gestión ambiental, siendo materia de fiscalización por parte de la autoridad competente.

### 2.2.7 R.J. N° 202-2010-ANA, Clasificación de Cuerpos de Agua Superficiales y Marino – Costeros.

Ubicación del Río Cunas dentro de la clasificación de cuerpos de agua como categoría 3 y clase 3.

*Tabla 2: Clasificación de cuerpos de agua superficiales: ríos, lagos, lagunas*

<b>Id. CUERPO DE AGUA</b>	<b>CUERPO DE AGUA</b>	<b>CATEGORÍA</b>	<b>CLASE</b>	<b>CODIGO DE CUENCA</b>	<b>CUENCA A LA QUE PERTENECE EL RECURSO</b>
4996	Río Mantaro	Categoría 3	Case 3	4996	Mantaro
<b>49968</b>	<b>Río Cunas</b>	<b>Categoría 3</b>	<b>Clase 3</b>	<b>49968</b>	<b>Cunas</b>
49967-1	Río Shulcas (hasta entes de captación de SEDAM Huancayo)	Categoría 1-A2	Case 2	49967	Medio Alto Mantaro
49967-1	Río Shulcas (aguas debajo de captación de SEDAM Huancayo)	Categoría 3	Clase 3	49967	Medio Alto Mantaro

Fuente: extraído de la R.J. N° 202-2010-ANA

### 2.2.8 D.S. N° 003-2010-MINAM, Límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de Aguas residuales domesticas o municipales.

De cumplimiento obligatorio, además los titulares de los PTAR están obligados a realizar el monitoreo de sus efluentes según el programa de monitoreo aprobado por el ministerio de vivienda, construcción y saneamiento.

Tabla 3: LMP para los efluentes de PTAR

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUA
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	10,000
DBO	mg/L	100
DQO	mg/L	200
pH	Unidad	6,5 – 8,5
Solidos totales en suspensión	mL/L	150
Temperaturas	°C	<35

Fuente: Anexo del D.S. N° 003-2010-MINAM

### 2.3 Marco conceptual.

- **Ácido Sulfhídrico (H<sub>2</sub>S):** Gas tóxico, irritante y asfixiante, con característico olor a huevo podrido, que se forma principalmente de la descomposición de materia orgánica en condiciones carentes de oxígeno y como producto de procesos industriales (refinado de petróleo, industria del cuero, aprovechamiento geotérmico, entre otros)
- **Agua:** sustancia química compuesta de 2 átomos de hidrógeno y 1 de oxígeno y que puede presentarse en cualquiera de los tres estados: líquido, gas (vapor) y sólido (hielo). Se conoce, además, que en la naturaleza sigue un ciclo (ciclo hidrológico).
- **Agua Residual:** agua proveniente de procesos, como resultado de su formación o de su uso en dichos procesos. /Generalmente, vertidos en

núcleos urbanos, industrias o actividades agrarias, constituidos por agua y residuos.

- **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.
- **Carga orgánica:** constituido por los compuestos orgánicos presentes en un líquido residual que consisten en una amplia variedad de compuestos orgánicos. Desde el punto de vista del tratamiento, no es necesario la discriminación de los diferentes tipos.
- **DBO:** Demanda Bioquímica de Oxígeno, es una medida aproximada de la cantidad de materia orgánica bioquímicamente degradable presente en una muestra de agua, se define por la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos aeróbicos presentes en la muestra para oxidar la materia orgánica a una forma inorgánica estable. Debe ser medido a los cinco días y a 20 grados centígrados.
- **Demanda de Oxígeno:** los compuestos orgánicos pueden oxidarse biológica o químicamente para obtener productos finales estables, tales como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_3\text{H}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ . el contenido orgánico de un agua residual puede expresarse en función de la cantidad de oxígeno que se requiere para su oxidación.
- **DQO:** La demanda química de oxígeno corresponde al volumen de oxígeno requerido para oxidar la fracción orgánica de una muestra susceptible de oxidación al dicromato o permanganato, en medio ácido.
- **Electrocoagulación:** Es una alternativa a la coagulación que facilita la eliminación de materia coloidal y fósforo, y puede también ayudar a la mejora en la eliminación de materia orgánica y de nitrógeno. Necesita ser combinado con un tratamiento de filtración.

- **Intensidad de corriente:** es la cantidad de carga que pasa por unidad de tiempo y por unidad de sección transversal, siendo un vector con la misma dirección que la velocidad de las partículas cargadas
- **Matadero o Camal:** son establecimientos en los que se sacrifican y preparan para el consumo humano determinados animales. Constituye la primera etapa en la industrialización de la carne. El producto final del proceso es la canal, denominada así a la pieza limpia sin vísceras
- **Oxidación:** es un cambio químico en el que un átomo o grupo de átomos pierden electrones.
- **pH:** es el término utilizado para expresar la intensidad de las condiciones ácidas o básicas del agua. Por convención está definido como:

$$pH = -\text{Log } H^+ \dots (1)$$

y por análisis químicos se sabe que el pH siempre se encuentra en una escala de 0 a 14.

- **Reacciones 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.
- **Reducción:** es un cambio químico en el cual un átomo o grupo de átomos ganan electrones
- **Sólidos:** el contenido en sólidos puede medirse como Sólidos Totales (ST), Sólidos volátiles (SV), Sólidos en Suspensión Totales (SST) y Sólidos en Suspensión Volátiles (SSV). Los sólidos totales incluyen los sólidos en suspensión y en disolución, y pueden estar constituidos por materia orgánica e inorgánica. Los sólidos disueltos se deben a la presencia de materias solubles, mientras que los sólidos en suspensión son partículas discretas que se pueden medir al filtrar una muestra a través de un papel fino.



- **Tensión de corriente:** llamado también voltaje, una magnitud física que impulsa a los electrones a lo largo de un conductor en un circuito eléctrico cerrado, provocando el flujo de una corriente eléctrica.
- **Tiempo de retención Hidráulica:** es el tiempo que permanece el agua residual en el interior del reactor y se define según la siguiente expresión:

$$TRH = \frac{V_r}{Q_i} (d) \dots (2)$$

en donde  $V_r$  es el volumen del sistema ( $m^3$ ) y  $Q_i$  es el caudal de influente ( $m^3/d$ ).

## 2.4 Marco teórico.

### 2.4.1 Composición de Aguas Residuales de Matadero

En los Mataderos se produce excrementos en los establos o corrales, sangre en abundancia, pezuñas, contenidos de los estómagos e intestinos, etc. En las salas de despiece y en las industrias cárnicas, el volumen de residuos es muy inferior y de otra naturaleza que el de los mataderos, ya que se reduce a restos de carne y desperdicios. En todo caso, tanto en los mataderos como en las salas de despiece y en las industrias cárnicas, se utiliza gran cantidad de agua para mantener las instalaciones, el equipo y los utensilios en condiciones de higiene adecuadas. Con el agua, son arrastradas, sobre todo en los mataderos, cantidades variables de sangre, grasa, contenidos gástricos e intestinales, heces y otras materias orgánicas, además de detergentes, desinfectantes. El consumo de agua por animal sacrificado es muy variable: 400 a 800 L para vacuno, 300 a 500 L para cerdos, 100 a 500 L para ganado caprino y de 6 a 20 L para pollos. También la carga contaminante de las aguas residuales de matadero que dan distintos autores son muy diferentes. La relación promedio DQO:  $DBO_5$  : N en las aguas residuales de un matadero es de orden 12 :4 :1. (Moreno, 2006)

Las aguas residuales de matadero contienen cantidades variables de materias groseras. Estos materiales deben ser separados lo antes posible en el propio matadero. Ello se consigue por dos procedimientos: primero, procurando que estos sólidos gruesos no lleguen a las aguas residuales, recogidos mediante arrastre por barrido en seco y segundo, instalando sumideros y desagües rejillas u otros sistemas de retención. Como aún quedan los sólidos en suspensión de menor tamaño y las grasas y aceites, para su separación, las aguas residuales deben someterse después a un tratamiento primario por medios físicos: tamizado, sedimentación. También aplicarse tratamiento químico o físico-químico de coagulación o floculación, que favorecen la separación de las proteínas solubles, grasas emulsionadas y la materia coloidal. (Moreno, 2006)

#### 2.4.2 Caracterización de aguas residuales de Camales

Resulta muy complicado realizar una caracterización de las aguas residuales de los mataderos, debido a la gran diversidad de instalaciones, a las distintas formas operativas de las mismas, así como la propia heterogeneidad de las especies sacrificadas. Esta diversidad también se produce para una misma industria, día a día, e incluso hora a hora. (Molinet Coll & Pigem comeselle, 2004)

Tabla 4: Características de las aguas residuales de mataderos (mg/L)

	Fullen, 1951 EEUU	Bond, 1974 GB	Simonini, 1978 Italia	Cooper, 1979 N. Zelanda	DMA, 1984 España
pH	6,6 – 7,2		7,4		7,0
DBO <sub>5</sub>	1790	1400 - 1900	838	1500	1287
DQO			1536	2600	4605
Mat. Suspensión	825	810	580	500	
Mat. Solución			1206		
Mat. Decantable			60		
Sol. Totales	5580	5600		2300	2200
Sol. Volátiles	1700	1600 – 2070		1300	1792
Grasas			108	770	
N2 total K	160	170	145	140	

<b>N2 orgánico</b>	25	140		125	
<b>N2 amoniacal</b>	135	30		15	34
<b>Ac. Volátiles</b>	26				107

Fuente: (Molinet Coll & Pigem comeselle, 2004)

El agua residual estuvo constituida por la mezcla de los vertimientos sedimentados de la sangre, los desechos ruminales y el estiércol de los corrales... (Ortiz Arce, 1995)

Tabla 5: Caracterización de aguas residuales planta de carnes

<b>Parámetro</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Promedio</b>	<b>Unidades</b>
<b>DQO total</b>	539	3676	2120,4	mg/L
<b>DQO soluble + coloidal</b>	346	2470	1122,6	mg/L
<b>DQO Soluble</b>	320	2030	1057	mg/L
<b>Sólidos Suspendidos totales</b>	144	3200	779	Mg/L
<b>pH</b>	6,6	8,2	7,2	Unidades
<b>Alcalinidad a pH 4.3</b>	184	2707	969	mg/L CaCO <sub>3</sub>
<b>Alcalinidad a pH 5.75</b>	50	2223	549	Mg/L CaCO <sub>3</sub>
<b>Temperatura promedio diurna</b>	16	19	17,9	°C
<b>Nitrógeno Orgánico</b>	40	198	98	Mg/L como N

Fuente: (Ortiz Arce, 1995)

### 2.4.3 Electrocoagulación

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. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

La electrocoagulación es un proceso que utiliza la electricidad para eliminar contaminantes en el agua que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificados. La técnica consiste en inducir corriente eléctrica en el agua residual a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, dentro de los más comúnmente utilizados están el hierro y el aluminio. La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca las reacciones químicas que

desestabilizan las formas en las que los contaminantes se encuentran presentes, bien sea suspendidas o emulsificadas. Es así que los contaminantes presentes en el medio acuoso forman agregados, produciendo partículas sólidas que son menos coloidales y menos emulsificadas (o solubles) que en estado de equilibrio. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan y/o flotan y se pueden remover fácilmente por algún método de separación de tipo secundario. (Arango Ruiz, La electrocoagulación: Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, 2005)

En el proceso de electrocoagulación hay generación de coagulantes in situ por la disolución de iones de aluminio o de hierro de los electrodos de aluminio o hierro respectivamente. La generación de iones metálicos tiene lugar en el ánodo y en el cátodo hay liberación de burbujas de hidrógeno gaseoso las cuales ayudan a la flotación de las partículas floculadas, las mismas que serán retiradas posteriormente. (Arango Ruiz, La electrocoagulación: Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, 2005)

La electrocoagulación es utilizada en la remoción de contaminantes de muy diversas aguas residuales, tales como las de la industria de galvanoplastia, electro-plateado metálico, fábricas de envasados, industria del papel (desperdicios de molinos de papel), peleterías, molinos de acero, efluentes con contenido de cromo, plomo o mercurio y efluentes con contenido de aceites como los generados por talleres de maquinaria, refinerías, talleres de reparación de autos, transporte, almacenamiento y distribución de aceites, efluentes de la industria alimentaria, lavanderías e industria textil, y finalmente ha sido utilizada en la remoción de los contaminantes de las aguas para consumo humano y residuales domésticas.

(Arango Ruiz, La electrocoagulación: Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, 2005)

#### **2.4.4 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. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

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. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

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. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

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. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

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. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

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. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

#### **2.4.5 Ventajas de la Electrocoagulación**

- 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.

(Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

#### **2.4.6 Desventajas de la Electrocoagulación**

- 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

(Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

#### 2.4.7 Fundamento Teórico del Proceso de Electrocoagulación

Los electrolitos son sustancias que careciendo de carácter metálico y en disolución son capaces de conducir la corriente eléctrica. No todos los electrolitos presentan la misma posición al paso de la corriente eléctrica. La conducción de corriente eléctrica por una disolución electrolítica va acompañada de cambios químicos que tienen lugar a los extremos de conductor introducido en la disolución. Estos cambios dependen del polo de la corriente. (Hernandez Lehmann, 2011)

Se define la electrolisis como la reacción química de descomposición del electrolito al paso de la corriente continua cuando introducimos dos electrodos en una disolución electrolítica o en un producto iónico fundido y aplicamos una diferencia de potencial continua entre ellos. La reacción química producida por la corriente eléctrica tiene lugar en la superficie de los electrodos que son los conductores metálicos introducidos en la disolución. (Hernandez Lehmann, 2011)

La conductividad eléctrica de la disolución electrolítica y las reacciones químicas que se producen en los electrodos, son fenómenos perfectamente relacionados entre sí. Esta relación fue deducida por Faraday de forma experimental y expresada mediante las leyes que llevan su nombre, las cuales cuantifican los procesos electrolíticos, siendo:

La cantidad de electrolito descompuesto en una cuba electrolítica, al paso de la corriente eléctrica es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que ha circulado a través de dicha disolución:

$$m = K_1 \cdot Q \dots (3)$$



Cuando circula la misma cantidad de electricidad ( $Q = I \cdot t$ ) por varias cubas electrolíticas conectadas en serie, las cantidades de electrolitos descompuestos son directamente proporcionales a los equivalentes químicos de dichos electrolitos:

$$\frac{m_A}{E_{qA}} = \frac{m_B}{E_{qB}} = \frac{m_C}{E_{qC}} = K_2 \rightarrow m = K_2 E q \dots (4)$$

La cantidad de electricidad que ha de circular por la cuba electrolítica para que en los electrodos se deposite o desprenda un equivalente químico de cualquier sustancia es constante e igual a 96,480 colombios, denominándose a este como valor Faraday, luego

$$1F = 96,480 C \dots (5)$$

Puesto que la corriente eléctrica es un flujo de electrones, F será un múltiplo de la carga del electrón, ese múltiplo resulta de multiplicarla por  $N_A$ .

$$F = N_A * q_e \dots (6)$$

Luego un Faraday es la cantidad de electricidad que contiene una mol de electrones.

Puesto que las sustancias que reaccionan en los electrodos son iones el equivalente químico, será igual a una mol de sustancia dividido por el número de cargas del ión correspondiente (valencia: v)

Estas tres leyes se pueden recopilar bajo la siguiente expresión:

$$m = \frac{1}{F} * I * t * E_q \dots (7)$$

Donde:

m = masa depositada o desprendida en cada electrodo (gramos)

I = intensidad de la corriente eléctrica aplicada (amperios)

t = tiempo de actuación de la corriente eléctrica (segundos)

$E_q$  = equivalente electroquímico ( $E_q = M; M =$  masa molecular;  $v =$  valencia)

$F =$  Faraday (96,480 colombios)

Así como la conductividad metálica consiste en el flujo de electrones a través del conductor metálico, la conductividad de una disolución electrolítica consiste en un transporte de carga eléctrica por iones existentes en la disolución, que equivale al transporte de electrones desde el electrodo negativo al positivo. Por consiguiente, como consecuencia de las leyes de Faraday, ya que son descargados en ambos electrodos cantidades equivalente de ambos iones, el número de electrones tomados por el catión, es el electrodo negativo, ha de ser igual al de electrones depositados simultáneamente por el anión en el electrodo positivo. Ese mismo número habrá de ser los que circulan por el conductor metálico, externo a la cuba, que forma parte del circuito eléctrico.

En general:

- Al electrodo donde los aniones depositan los electrones, es decir, del que salen los electrones hacia el circuito exterior se denomina ánodo, electrodo donde tiene lugar la oxidación (donación de electrones)
- Al electrodo donde los cationes captan los electrones, es decir, al que llegan los electrones por el circuito exterior se denomina cátodo, electrodo donde tiene lugar la reducción. (captación de electrones)

(Hernandez Lehmann, 2011)

#### **2.4.8 Proceso de Electrocoagulación**

Durante la electrólisis ocurren una serie de procesos físicos y químicos que se pueden describir de la siguiente manera:

El lado positivo sufre reacciones anódicas, mientras que el negativo sufre reacciones catódicas. (Arango Ruiz, La electrocoagulación: Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, 2005)

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. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006). Estos iones liberados neutralizan las cargas de las partículas desestabilizando los sistemas de suspensión de los contaminantes dando inicio a la coagulación. (Arango Ruiz, La electrocoagulación: Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, 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. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

Los iones liberados remueven cualquier contaminante, bien sea por reacción química y precipitación o agregando materiales coloidales que bien pueden flotar o precipitarse. Además, como el agua contiene partículas coloidales, aceites u otros contaminantes, éstos se mueven a través del campo eléctrico aplicado y pueden ionizarse, sufrir reacciones de electrólisis o de hidrólisis o formar radicales libres que alteran las propiedades físicas y químicas del agua y de los contaminantes, resultando en un estado reactivo y excitado lo cual es causa de la liberación, destrucción o

insolubilidad de los contaminantes. (Arango Ruiz, La electrocoagulación: Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, 2005)

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. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

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 por estequiometría con la cantidad de electricidad puesta en el sistema. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

Para aumentar la eficiencia de remoción de los iones indeseables, se puede hacer pasar el agua residual a través de una serie de celdas que tienen electrodos compuestos de varios metales. Los parámetros como pH, conductividad y potencial de óxido-reducción deben ser ajustados de acuerdo con el tipo de contaminante (Arango Ruiz, La electrocoagulación: Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, 2005)

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. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

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. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006).

#### **2.4.9 Reacciones Involucradas en la Electrocoagulación**

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. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

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. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

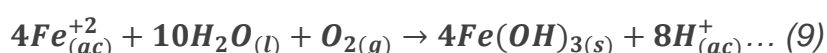
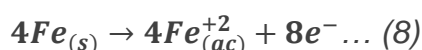
Para el caso en el cual el hierro actúa como ánodo, se han propuesto dos mecanismos que explican la formación in situ de dos

posibles coagulantes. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

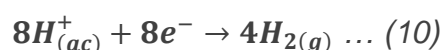
Estos pueden ser hidróxido ferroso  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  o hidróxido férrico  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .

#### 2.4.9.1 Mecanismo 1: Formación del hidróxido férrico

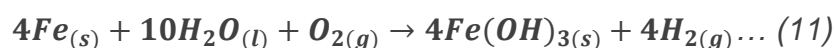
En el ánodo ocurren las siguientes reacciones:



En el cátodo ocurre la reacción:

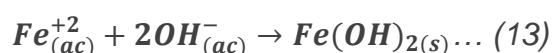
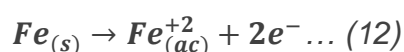


Reacción global:

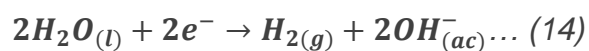


#### 2.4.9.2 Mecanismo 2: formación del hidróxido ferroso

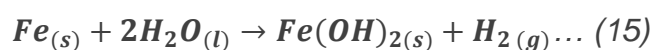
En el ánodo se dan las reacciones:



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 tracciones electrostáticas.

(Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

#### **2.4.10 Aspectos Técnicos de la operación de la electrocoagulación**

Las condiciones de operación de un sistema de electrocoagulación son altamente dependientes de las condiciones químicas, pH, tamaño de partículas del agua a tratar y especialmente de su conductividad. El tratamiento general de las aguas residuales requiere aplicaciones bajas de voltaje (<50 Volts) con amperaje variable, de acuerdo a las características químicas del agua. (Ecosystem SA, 2002)

##### **2.4.10.1 Consumos de energía**

Los consumos de energía varían entre 0.1 a 1.0 Kwh/m<sup>3</sup> (dependiendo del tipo de agua a tratar). (Ecosystem SA, 2002)

##### **2.4.10.2 Desgaste de electrodos**

El desgaste de material está directamente relacionado con la corriente aplicada al sistema (amperaje) y el tiempo de residencia hidráulico del agua residual en la celda de electrocoagulación. Se estima un mínimo reemplazo de los electrodos de una a dos veces por año. (Ecosystem SA, 2002)

##### **2.4.10.3 Condiciones de operación**

El sistema de electrocoagulación funciona en forma automática, mediante controles electrónicos que regulan la corriente y voltaje, de acuerdo a los cambios en la calidad del agua residual a tratar, dados por su resistividad. (Ecosystem SA, 2002)

#### **2.4.10.4 Producción de lodos**

La producción o generación de lodos está directamente relacionado con el nivel de contaminación del agua residual y de las especies catiónicas que se disuelven en el agua de acuerdo a la corriente aplicada a los electrodos. En todo caso la generación de lodos es menor que un sistema químico o biológico convencional. Se obtiene un lodo más compacto (dado el fierro o aluminio) con un nivel de humedad entre un 97 a 99%. (Ecosystem SA, 2002)

#### **2.4.11 Factores que afectan la electrocoagulación**

##### **2.4.11.1 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, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

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 se dan en un pH de 7. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

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 Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

#### **2.4.11.2 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. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

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. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio  $Al^{+3}$  o hierro  $Fe^{+2}$ , liberados por los respectivos

electrodos. Cuando se usa una corriente demasiado grande, hay una transformación de energía eléctrica en energía calórica que calienta el agua. 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. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

#### **2.4.11.3 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, manteniendo la densidad de corriente constante, se produce una disminución del voltaje aplicado. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

La adición de algunos electrólitos tales como NaCl o CaCl<sub>2</sub> generan 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<sub>3</sub><sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de Ca<sup>+2</sup> y Mg<sup>+2</sup> 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 Cl<sup>-</sup> alrededor del 20 %. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

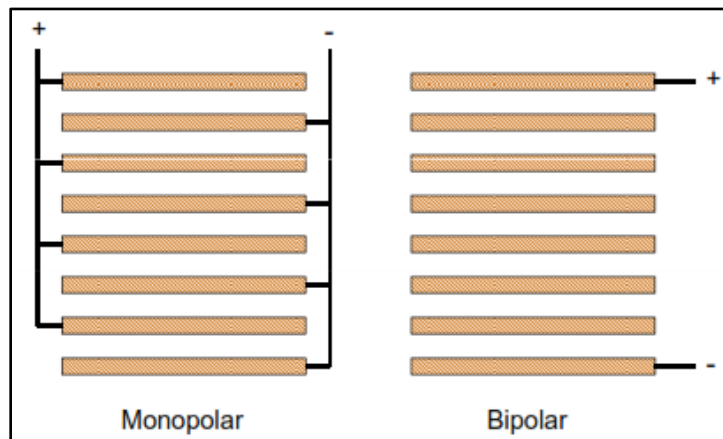
#### 2.4.11.4 Temperatura

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 °C, punto donde se hace máxima para luego decrecer. El incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuido al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

#### 2.4.12 Configuraciones Hidráulica y Eléctricas

El arreglo de los electrodos puede ser de forma mono-polar o bipolar y los materiales pueden ser aluminio o hierro, en forma plana o paquetes de láminas. (Piña Soberanis, Martín dominguez, & Gonzale, 2011)

Figura 1: Arreglos de Electrodos

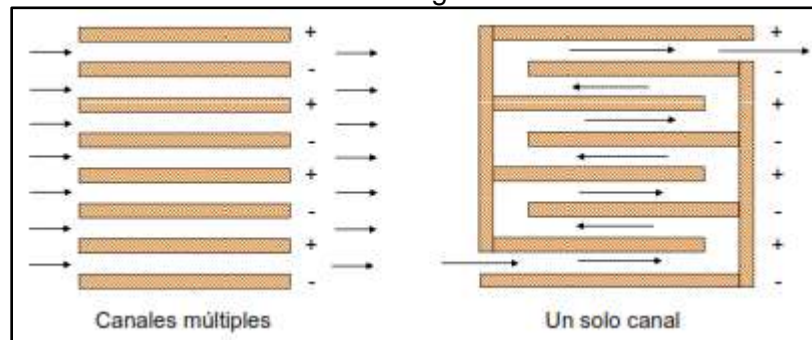


Fuente: (Piña Soberanis, Martín dominguez, & Gonzale, 2011)

Dependiendo de la orientación de los electrodos (placas), el flujo dentro de la celda de electrocoagulación puede ser vertical u horizontal. El agua fluye a través de los espacios entre las placas, que pueden ser canales múltiples o un solo canal. Los canales múltiples es un arreglo simple, pero normalmente la velocidad de

flujo en cada canal es baja. Cuando no es posible reducir la pasivación en la superficie de los electrodos, se recomienda incrementar la velocidad del flujo utilizando un sistema con un solo canal. (Piña Soberanis, Martín dominguez, & Gonzale, 2011)

Figura 2: Posibles configuraciones de Flujo dentro de un reactor de Electrocoagulación



Fuente: (Piña Soberanis, Martín dominguez, & Gonzale, 2011)

También se han utilizado electrodos bipolares con celdas en paralelo. En este caso el electrodo “sacrificable” se localiza entre dos electrodos paralelos sin ninguna conexión eléctrica. Solo los electrodos mono-polares se conectan a la fuente externa de poder. Este tipo de arreglos resuelve en parte la disminución de la eficiencia de la electrocoagulación por formación de una capa de óxido sobre los electrodos. (Piña Soberanis, Martín dominguez, & Gonzale, 2011)

Otra forma de aumentar la eficiencia de esta técnica es utilizar corriente alterna que retarda los mecanismos normales de ataque de los electrodos, sin embargo, los campos de corriente alterna pueden desestabilizar el sistema. También se ha aplicado esta tecnología en unidades de lecho fluidizado equipados con metales no consumibles y con partículas de aluminio sometidas a flujo turbulento. La agitación es mantenida con aire comprimido. (Piña Soberanis, Martín dominguez, & Gonzale, 2011)

Es importante también considerar los tiempos de residencia en el reactor, ya que de este depende el tamaño del mismo. Algunos autores emplean mayores tiempos de residencia para incrementar la dosis del coagulante, lo que mejora la eficiencia de remoción, pero aumenta el tamaño de las unidades y por lo tanto los costos de inversión. (Piña Soberanis, Martín dominguez, & Gonzale, 2011)

En este mismo sentido se debe considerar el tipo de flujo, es decir, si se trata de un sistema en lotes (batch) o en continuo, la configuración de los electrodos y los tipos de conexión (bipolar o monopolar) que repercuten en la eficiencia y en el costo. Sin embargo, la información publicada hasta el momento está enfocada principalmente a las eficiencias de remoción de los contaminantes, sin mostrar detalles de los diseños de los prototipos utilizados y sin profundizar en la influencia de las variables involucradas en los procesos. (Piña Soberanis, Martín dominguez, & Gonzale, 2011)

#### **2.4.13 El Reactor para la electrocoagulación**

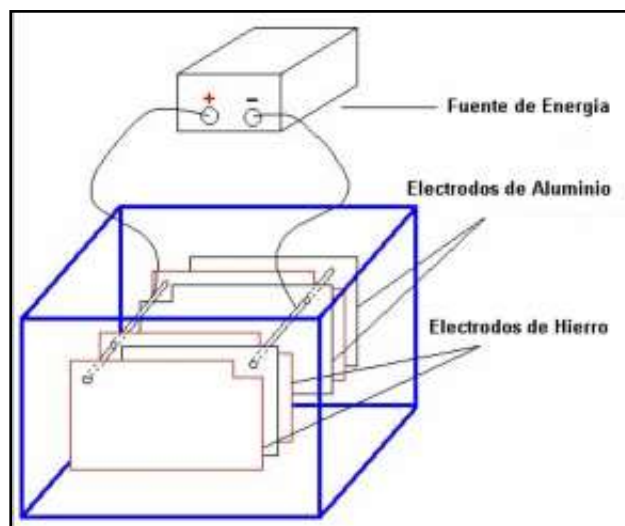
El reactor utilizado para realizar la electrocoagulación en una operación por batch, en su forma más simple, está formado por una celda electroquímica con un ánodo y un cátodo dispuestos en forma vertical y conectados a una fuente de energía externa. El material anódico se corroe eléctricamente debido a la oxidación, mientras que el cátodo permanece pasivo. (Arango Ruiz, La electrocoagulación: Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, 2005)

El diseño formado por un par de electrodos no es el más adecuado a la hora del proceso ya que para obtener una tasa adecuada de 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. (Arango Ruiz, La electrocoagulación: Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, 2005)

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 (Arango Ruiz, La electrocoagulación: Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, 2005)

El reactor electrolítico, donde se realiza la electrocoagulación, es un recipiente de termoplástico como el que se muestra.

Figura 3: Reactor de electrocoagulación



Fuente: (Gonzalo Motante G., 2002)

Consta de una fuente de energía para inducir la corriente eléctrica y de los electrodos dispuestos de forma intercalada dentro del reactor, estos van cubiertos por el agua a tratar. (Gonzalo Motante G., 2002)

El material de los electrodos varía de acuerdo al tipo de sistema utilizado, estos pueden ser de hierro, de aluminio, cobre, acero o aleaciones de aluminio y magnesio. Las partículas coloidales se desestabilizan con la adición de iones multivalentes ( $Fe^{+++}$  y  $Al^{+++}$ ). Los electrodos son de sacrificio, según Faraday, debido a que en el proceso electrolítico desprenden en el agua los iones que desestabilizan los coloides. (Gonzalo Motante G., 2002)

Durante el proceso se generan compuestos que desestabilizan las suspensiones y emulsiones provocando su floculación; de igual manera ocurre una disolución anódica donde se liberan elementos que pueden reaccionar con algunos contaminantes en solución precipitándolos. En los electrodos se generan microburbujas de hidrógeno y oxígeno que chocan y se adhieren a los flóculos, arrastrándolos a la superficie del líquido donde se forma una espuma que puede ser removida mecánicamente. También, las burbujas formadas dentro del reactor ayudan a que el aceite y las grasas floten (Gonzalo Motante G., 2002)

La celda electroquímica o reactor para la electrocoagulación puede ser tipo batch o continuo. En su forma más simple el reactor batch es una cubeta en la cual, los electrodos se disponen en forma de placas paralelas conectados en serie a una fuente de voltaje. El volumen de la celda ocupada por los electrodos se define como zona de reacción, en esta se dan los procesos de desestabilización de partículas, coagulación y sedimentación. Los lodos formados pueden depositarse en la parte superior de la celda cuando su densidad es baja o precipitar cuando su densidad es alta, para luego ser removidos. El reactor tipo batch tiene importancia a nivel de laboratorio ya que permite el estudio del proceso y los parámetros a ser controlados. (Arango Ruiz & Garcés Giraldo, Diseño de una Celda de Electrocoagulación, 2007)

#### **2.4.14 Materiales de los electrodos**

En el caso de la electrocoagulación con ánodos de sacrificio, la selección del material del electrodo va a depender de la naturaleza y afinidad que tenga el contaminante que se pretende remover con el coagulante producido, es decir, si se quiere remover material suspendido, el coagulante debe propiciar una desestabilización de los coloides para que estos se aglutinen y posteriormente sean separados por precipitación. En el caso de elementos disueltos se

busca que el coagulante los adsorba o los retenga mediante algún mecanismo fisicoquímico. Cuando se trata de electrodos inertes como el acero inoxidable, el titanio, platino, níquel, grafito, etc., el mecanismo de remoción es debido a que se presenta una reducción electroquímica del agua en el cátodo incrementándose el pH propiciando la formación de sales básicas poco solubles e hidróxidos de metales polivalentes que precipitan. (Piña Soberanis, Martín dominguez, & Gonzale, 2011)

La utilización de electrodos de aluminio tiende a ser minimizada con respecto a los de hierro, debido a los problemas de disposición de los lodos conteniendo ese metal y a la alta pasivación de los electrodos, Sin embargo, de acuerdo a los resultados experimentales de diversos autores, los electrodos de Al son más eficientes que los de Fe para la remoción de aceites. En el caso de metales pesados se puede remover de manera muy eficiente el arsénico (As) y el cadmio de aguas residuales. Para As la remoción es muy eficiente utilizando electrodos de Fe considerando mecanismos de adsorción de los hidróxidos de Fe con las especies de As. (Piña Soberanis, Martín dominguez, & Gonzale, 2011)

Electrodos inertes como el titanio y el paso de una corriente alterna, también remueve iones metálicos y promueve la coagulación de solidos suspendidos. En este caso el movimiento electroforético concentra las partículas de carga negativa en el ánodo y por neutralización de cargas se facilita la coagulación. (Piña Soberanis, Martín dominguez, & Gonzale, 2011)

Se comparó la eficiencia de remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), turbiedad, fenoles, hidrocarburos y grasas utilizando electrodos de aluminio (Al) y hierro (Fe) a diferentes tiempos de electrolisis (2,5; 5; 10; 15 y 20 minutos), y se encontró que en general se remueven más fenoles e hidrocarburos con



electrodos de Al. Con electrodos de Fe se remueve más turbiedad y grasas y no hay una diferencia importante para la remoción de la DQO utilizando electrodos de Fe y Al. Del análisis se concluyó que la eficiencia y capacidad de los procesos de electrocoagulación dependen de la naturaleza del agua residual y de las concentraciones de los contaminantes. (Piña Soberanis, Martín dominguez, & Gonzale, 2011)

#### **2.4.15 Distancia apropiada entre electrodos y niveles para pH, Densidad de Corriente y Tiempo**

Durante las pruebas exploratorias se observó que para separaciones entre electrodos inferiores a 10 mm los tratamientos se hacen prolongados, adicionalmente se presentaron atascamientos por deposición de lodo sobre la superficie de los electrodos, impidiendo la circulación del medio acuoso y la generación de turbulencias que favorecen la coagulación dando como resultado bajas remociones de DQO. Para distancias entre electrodos mayores a 10 mm no se presentaron cambios importantes en el proceso, en comparación con los resultados obtenidos a 10 mm. Lo anterior sugiere que por aspectos técnicos la separación entre electrodos que permite un proceso de electrocoagulación con buenas remociones de DQO y grasas y aceites es de 10 mm. (Arango Ruiz & Garcés Giraldo, Diseño de una Celda de Electrocoagulación, 2007)

Se probó electrodo de sacrificio tanto de hierro como de aluminio, se varió el pH y la densidad de corriente para las cuales se midieron las remociones de DQO y de grasas y aceites a 5, 10, 15 y 20 minutos. En los resultados se observa que la eficiencia en la remoción incrementa con el aumento de la distancia entre electrodos, el aumento de densidad de corriente y el tiempo. Los resultados muestran que se pueden conseguir eficiencias altas en

la remoción de DQO a densidades de corriente inferiores, esto cuando se disminuye el pH. Analizando los tiempos del proceso de electrocoagulación, se puede ver que entre los 15 y los 20 minutos las pendientes de las curvas tienen una tendencia a disminuir, lo cual sugiere que los tratamientos tienen su mayor efectividad en los primeros 15 minutos.

(Arango Ruiz & Garcés Giraldo, Diseño de una Celda de Electrocoagulación, 2007)

## CAPÍTULO III

### 3 PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

#### 3.1 Metodología

##### 3.1.1 Método.

##### 3.1.1.1 Ubicación del Lugar de Estudio:

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Alas Peruanas – Filial Huancayo.

Figura 4: Ubicación de la UAP - Huancayo



Fuente: Google Maps 2016

Tabla 6: Datos Ubicación del Lugar de Estudio

Altitud	3247 m. s. n. m.
Latitud sur	12° 3'19.98"S
Longitud Oeste	75°15'33.43"O
Distrito	Pilcomayo
Provincia	Huancayo
Departamento	Junín

### 3.1.1.2 Ubicación del Camal Municipal de Chupaca:

El Camal Municipal de Chupaca, lugar de donde se tomó las muestras de agua residual generadas por las actividades que se desarrollan dentro de sus instalaciones, aguas que son vertidas en el río Cunas.

Figura 5: Ubicación del Camal Municipal de Chupaca



Fuente: Google Maps 2016

Tabla 7: Datos Ubicación del Camal Municipal de Chupaca

Altitud	3263 m. s. n. m.
Latitud sur	12° 3'26.74"S
Longitud Oeste	75°17'4.22"O
Distrito	Chupaca
Provincia	Chupaca
Departamento	Junín

### 3.1.1.3 Construcción de la Celda de Electrocoagulación

Para la elaboración de la celda utilizada en las experimentaciones, se tomó en cuenta la referencia bibliográfica de (Arango Ruiz & Garcés Giraldo, Diseño de una Celda de Electrocoagulación, 2007), donde muestra la forma de construcción de este tipo de celdas a escala laboratorio en trabajos similares al de la investigación.

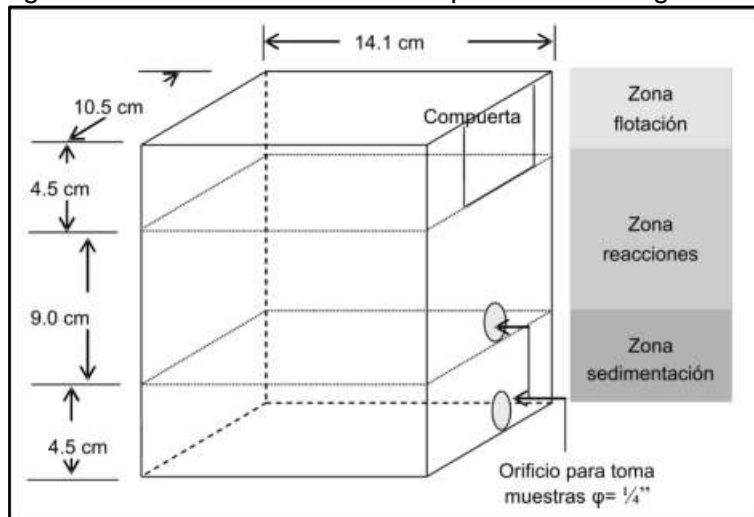
La celda construida es de tipo Bach, con electrodos de hierro y aluminio, dispuestas en forma paralela conectados a una fuente de voltaje, el volumen de la celda ocupada por los electrodos es llamada zona de reacción y es donde se dan los procesos de desestabilización de partículas, coagulación y sedimentación, los lodos se depositan en la base de la celda o en la parte superior los cuales son removidos.

- **Dimensiones, Material, y numero de electrodos:**

El diseño de la celda contiene tres regiones, una región superior para el depósito de lodos de floración y espumas, llamada Zona de flotación; una región media donde se llevan a cabo las reacciones electroquímicas llamada zona de reacción, en esta zona es donde se ubican los electrodos; y la región inferior llamada zona de sedimentación donde se depositan los lodos de precipitación y lodos más densos. Además, tiene una compuerta para evacuar las espumas generadas y en la parte inferior dos orificios a los que se acopló a cada uno, una llave para la toma de muestras después del tratamiento.

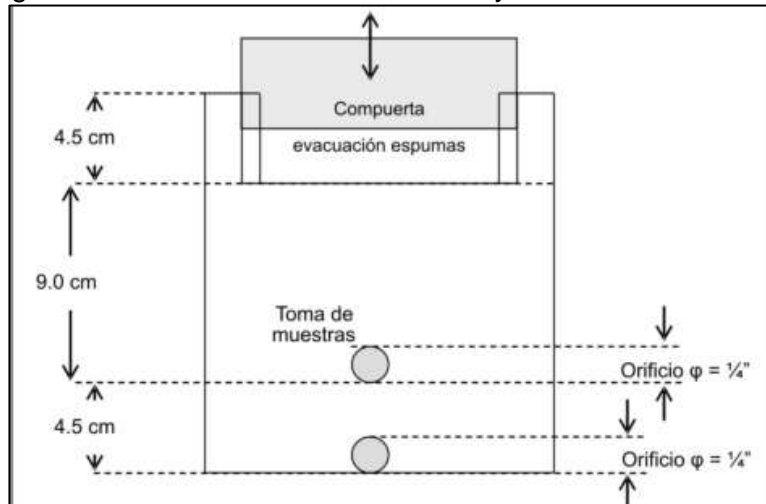
El material utilizado es acrílico de 5 mm de espesor, con la finalidad de tener una celda más sólida para las pruebas experimentales.

Figura 6: Dimensiones de la celda para electrocoagulación.



Fuente: (Arango Ruiz & Garcés Giraldo, Diseño de una Celda de Electrocoagulación, 2007)

Figura 7: Detalle de toma de muestras y evacuación de lodos.



Fuente: (Arango Ruiz & Garcés Giraldo, Diseño de una Celda de Electrocoagulación, 2007)

Para la selección de los electrodos y sus dimensiones según la bibliografía los electrodos son de hierro y aluminio diseñados como placas rectangulares los cuales se dispuso en serie dentro de la celda construida, los electrodos tienen 3 mm de espesor, 80 mm de ancho, 90 mm de largo, y la distancia de cada uno es de 2 cm hacia las caras laterales de la celda,

para que permita el flujo de agua residual durante la experimentación.

Figura 8: Electrodo de Hierro y Aluminio Utilizados.



- **Distancia de electrodos:**

De acuerdo a la bibliografía, las distancias de separación inferiores a 10 mm hace que el tratamiento se prolonga, y se producen atascamientos por deposición de lodo sobre la superficie de los electrodos, lo cual impide la circulación del medio acuoso y generación de turbulencias que favorecen a la coagulación; en el caso de distancias mayores a 10 mm nos dice que no se realizan cambios relevantes con los resultados, de acuerdo a esta información y tomando en cuenta el tamaño de la celda construida, la separación de los electrodos será de 15 mm, porque el material es más grueso y por tanto la distribución de las ranuras se dieron a 5 mm.

Figura 9: Ranuras para separación de Electrodo.

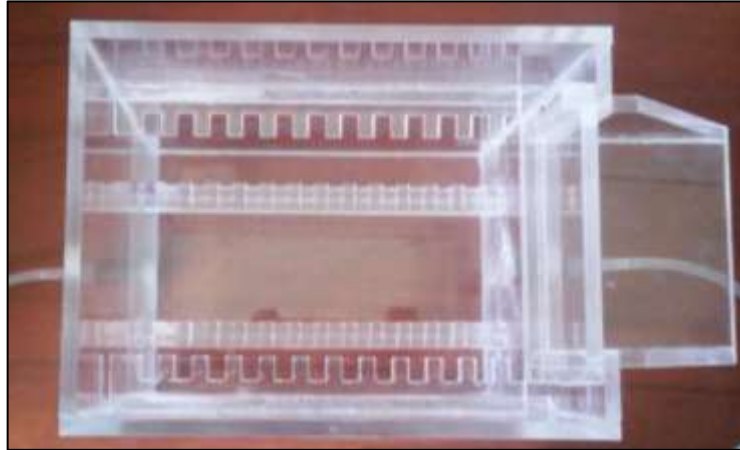


Figura 10: Celda de Electrocoagulación terminada.



Para el número de electrodos se determinó en base a la siguiente ecuación, según la bibliografía.

$$N^{\circ} \text{ electrodos} = \frac{(\text{ancho celda}) - 2 * (\text{dist. electrodos cara lateral})}{(\text{dist.máx.entre electrodos} + \text{espesor de placa})} \dots (16)$$

De donde se obtuvo para las corridas experimentales:

$$\frac{(140 \text{ mm}) - 2 * (15 \text{ mm})}{(15 \text{ mm} + 3 \text{ mm})} = 6.11 \text{ electrodos}$$

Se obtuvo como resultado 6 electrodos para la experimentación, de los cuales son 3 electrodos de fierro conectados al ánodo (+) y 3 electrodos de



aluminio conectados al cátodo (-), formando un arreglo intercalado y en paralelo de electrodos.

Figura 11: Armado de la Celda de electrocoagulación.



#### 3.1.1.4 Fuente de voltaje

De acuerdo a la bibliografía, nos dice que con un voltaje de 20 V se reportan mejores resultados en la remoción de contaminantes, por ello aplicamos este parámetro para el trabajo de nuestra investigación.

El voltaje requerido en la celda de electrocoagulación se obtiene de acuerdo a:

$$U = (N - 1)U_0... ( 17)$$

Donde:

$U_0$ : voltaje entre los electrodos

N: número de electrodos

U: voltaje total

Con estos valores como parámetros mínimos requeridos en la experimentación, se construyó una fuente con corriente máxima de 10 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. (Arango

Ruiz & Garcés Giraldo, Diseño de una Celda de Electrocoagulación, 2007)

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 0.1 V, todo el equipo tiene conexión a 110 V AC monofásico. (Arango Ruiz & Garcés Giraldo, Diseño de una Celda de Electrocoagulación, 2007)

Para administrar corriente eléctrica a nuestra celda de electrocoagulación en las pruebas definitivas, se usó una fuente de poder, con una capacidad para suministrar hasta 20 Amperios y voltaje de 0 a 30 V, los valores marcados en la fuente de poder durante las pruebas experimentales de muestran en la siguiente tabla.

*Tabla 8: Valores Marcados por la Fuente de Poder*

<b>Parámetro</b>		
Intensidad de corriente	16,5 A	25 A
Tensión de corriente	20 V	30 V

En el suministro de corriente en los electrodos se utilizó cable de uso eléctrico con 6 terminales que se conectaron a cada electrodo de fierro y aluminio con ayuda de pequeños cocodrilos.

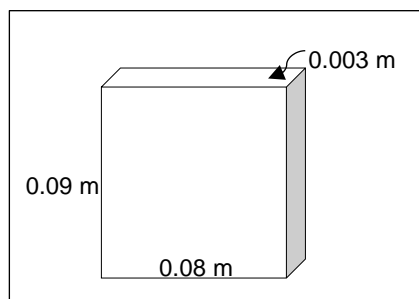
Para calcular la densidad de corriente que reciben los electrodos dentro de la celda para el proceso de electrocoagulación se aplican las siguientes ecuaciones:

Densidad de corriente:  $J = \frac{I}{A} \dots (18)$

Ley de Ohm:  $V = I * R \dots (19)$

Calculamos el área de los 6 electrodos utilizados en la celda para las pruebas experimentales.

Figura 12: Medidas de los electrodos



$$\text{Area electrodo} = (0,08 \times 0,09 \times 2) + (0,003 \times 0,08 \times 2) + (0,003 \times 0,09 \times 2)$$

$$\text{Area electrodo} = 0,0154 \text{ m}^2$$

$$\text{Area 6 electrodos} = 0,098 \times 6$$

$$\text{Area 6 electrodos} = 0,0925 \text{ m}^2$$

De acuerdo a los valores registrados en la fuente de poder, se realizó el cálculo de la resistencia que se produce en la celda de electrocoagulación:

$$\text{Resistencia: } R1 = \frac{V}{I} = \frac{20 \text{ V}}{16,5 \text{ A}} = 1.21 \Omega$$

$$R2 = \frac{V}{I} = \frac{30 \text{ V}}{25 \text{ A}} = 1.2 \Omega$$

$$\text{Resistencia promedio} = 1.2 \Omega$$

Para el cálculo de la densidad de corriente producida en la celda se utilizó la ecuación 18:

$$J_{20 \text{ V}} = \frac{I}{A} = \frac{16,5 \text{ A}}{0,0925 \text{ m}^2} = 178,38 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$$

$$J_{30 \text{ V}} = \frac{I}{A} = \frac{25 \text{ A}}{0,0925 \text{ m}^2} = 270,27 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Densidad de Corriente promedio} = 224,32 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$$

Figura 13: Fuente de poder.



### 3.1.1.5 Recolección y Preparación de la muestra

La toma de muestras se realizó en el efluente del Camal Municipal, constituido por aguas residuales que llegan al río Cunas, estas muestras se trasladó hacia el laboratorio de la Universidad Alas Peruanas en Pilcomayo, para las pruebas experimentales con la celda de electrocoagulación, para luego llevarlas al laboratorio de análisis físico – químicos.

Figura 14: Camal Municipal de Chupaca.



- **Toma de Muestra:** se tomó cantidades de 10 litros en baldes oscuros con tapa para poder transportarlos fácilmente. Este proceso se realizó cada sábado durante 3 semanas, puesto que este es el día de mayor actividad en el camal por la gran demanda en la feria que realiza el distrito.

Durante la semana, se trabajó con la muestra obtenida los días sábados, con la cantidad de 1,5 L que

corresponde a la capacidad de la celda de electrocoagulación.

- **Preparación de la muestra:** se transportó las muestras desde el lugar de recolección hacia el laboratorio de la Universidad Alas Peruanas en baldes oscuros y tapados, luego se guardaron bajo la sombra. Se realizó un filtrado simple de la muestra para separar el líquido de las partículas grandes (restos de pelos, heces y otros) del líquido.

Figura 15: Filtrado Simple de la Muestra.



Seguidamente se tomó de la muestra filtrada 1.5 L para comenzar la experimentación en la celda de electrocoagulación.

Figura 16: Celda de Electrocoagulación Lista para Iniciar Pruebas.



### 3.1.1.6 Experimentación

Las corridas experimentales se realizaron de acuerdo al diseño experimental propuesto.

Antes de comenzar con la experimentación, se procedió a medir el pH y temperatura de la muestra a tratar, datos que fueron registrándose en un cuaderno de notas.

Figura 17: Toma de temperatura y pH de la muestra.



Se llenó el reactor con la muestra y luego se conectó a cada electrodo de fierro y aluminio un terminal del ánodo y cátodo respectivamente.

Figura 18: Celda de Electrocoagulación con muestra para Iniciar Pruebas.



Luego se procedió a encender la fuente de poder ubicando la cantidad de voltaje requerido para la prueba y cronometrando el tiempo transcurrido.

Figura 19: Celda de Electrocoagulación en funcionamiento.





Finalizado la experimentación, se procedió a tomar la muestra de la zona de reacción del reactor (parte central de la celda), y enseguida se midió el pH y la temperatura final.

Figura 20: Toma de muestra del agua tratada.



Las muestras inicial y final de cada experimentación fueron puestas en tubos de ensayo de 10 ml para el envío al laboratorio de análisis físico – químico, debidamente rotuladas.



### 3.1.1.7 Variable a medir

Para evaluar la carga Orgánica se tomó en cuenta la DBO y DQO de la muestra inicial y final de cada experimentación, proceso que estuvo sujeto a las variables de pH, tiempo de retención, y el voltaje administrado, en la celda de electrocoagulación, según la tabla de diseño de la investigación.

### 3.1.2 Tipo de la investigación

Se realizó la investigación utilizando el tipo Experimental, donde se analizó el efecto producido por la manipulación de las variables independientes, sobre la variable dependiente.

### 3.1.3 Nivel de la investigación

El nivel de la investigación fue correlacional, donde se ofreció predicciones, su finalidad fue explicar o conocer la relación entre variables; las correlaciones se sustentaron en hipótesis sometidas a prueba.

## 3.2 Diseño de la investigación.

En la presente investigación se utilizó el diseño factorial simple, para la manipulación simultánea de variables independientes con dos niveles o modalidad de presencia en cada variable independiente.

Tabla 9: Diseño Factorial de la Investigación

VARIABLES	NIVELES	
	X1	X2
<i>Índice de Acides</i>		
pH	7	8
<i>Electrocoagulación</i>		
Tiempo de retención	30 min	60 min
Voltaje	20 V	30 V

De acuerdo a la tabla anterior, se tuvo 3 variables independientes con 2 niveles cada uno, por tanto, el número de experimentaciones fue de  $2^3= 8$ , más sus repeticiones hicieron un total de 16 pruebas.

### **3.3 Hipótesis de la investigación**

#### **3.3.1 Hipótesis general**

La eficiencia de la reducción de la carga orgánica alcanza hasta un 90% para el Tratamiento avanzado de aguas residuales del camal municipal de Chupaca mediante el método de electrocoagulación

#### **3.3.2 Hipótesis específicas**

- La composición físico química de las aguas residuales del camal municipal de Chupaca es materia orgánica.
- El tiempo de retención hidráulica óptimo es de 30 a 40 minutos para el tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Chupaca mediante el método de electrocoagulación.
- El pH neutro es óptimo en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Chupaca mediante el método de electrocoagulación
- La tensión de corriente adecuada es de 20 voltios en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Chupaca mediante el método de electrocoagulación

### **3.4 Variables**

#### **3.4.1 Variable independiente**

##### **3.4.1.1 Electrocoagulación**

Indicadores:

- Tiempo de retención
- Tensión de corriente

##### **3.4.1.2 Índice de acides**

Indicadores:

- pH

### **3.4.2 Variable dependiente**

#### **3.4.2.1 Carga Orgánica**

Indicadores:

- DQO
- DBO<sub>5</sub>

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

#### **3.5.1 Universo.**

Aguas residuales del Camal Municipal de Chupaca

#### **3.5.2 Población.**

Aguas residuales producto de las actividades de sacrificio a animales en el camal municipal de Chupaca

#### **3.5.3 Muestra.**

Se tomó el volumen de 1,5 litros para tratarlo en la celda de electrocoagulación.

#### **3.5.4 Muestreo.**

Se realizó un muestreo sistemático, tomando la muestra los días sábados entre 7 y 9 am.

- Materiales: para realizar el muestreo es necesario contar con:
  - Guantes
  - Balde de plástico oscuro de 20 L
  - Guardapolvo
  - Mascarilla
  - Botas

### **3.6 Técnicas e instrumentos**

#### **3.6.1 Técnicas de la investigación.**

- Revisión de artículos
- Observación de campo

- Pruebas experimentales
- Observación de experimentos

### **3.6.2 Instrumentos de la investigación.**

- Resúmenes de artículos
- Anotaciones
- Reportes de las pruebas experimentales
- Fotografías

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

### **3.7.1 Estadísticos.**

- Estadística descriptiva
- Estadística diferencial

### **3.7.2 Representación.**

- Gráficas en Excel
- Fotografías

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

- Anova

## CAPITULO IV

### 4 ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1 Resultados.

Los resultados obtenidos dentro del trabajo de investigación fueron la caracterización del agua residual del camal municipal de Chupaca, como se muestran en la tabla 10, el reporte de análisis de agua del laboratorio de aguas de la facultad de ingeniería química de la UNCP utilizado, fue el que mostro valores más altos.

Tabla 10: Caracterización de aguas del Camal Municipal de Chupaca.

PARÁMETRO	MÉTODO	RESULTADOS
Solidos Disueltos	MS-2540-C-Secado a 180 °C	1905,0 mg/L
Sólidos suspendidos	MS-2540-C-Secano a 103 °C – 105 °C	1597,0 mg/L
Sólidos totales	MS-2540-C-Secano a 103 °C – 105 °C	4297,0 mg/L
O <sub>2</sub>	MS-5220-D-reflujo	0 mg/L
pH	MS-4500-H-B-Electrométrico	7,6
Conductividad	MS-2540-C-Secado a 180 °C	3620,0 μSm/cm
DQO	MS-5220-D-reflujo cerrado colorimétrico	9962,6 mg/L
DBO <sub>5</sub>	MS-5210-B-ROD 5 días	6822,5 mg/L

Fuente: Elaboración propia, (Anexo 3)

Luego se obtuvieron los resultados de cada tratamiento en función al diseño experimental del capítulo anterior que se presentan a continuación.

Tabla 11: Resultados del Tratamiento con pH 7 y tensión de corriente 20 V

<b>TIEMPO (min)</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/L)</b>	<b>pH</b>	<b>T (°C)</b>
0	9962,4	6822,1	7,1	13,9
30	4821,6	2940,3	8,8	22,4
45	2546,5	1422,8	9,6	28,6
60	1748,2	859,3	10,4	35,7

Fuente: Elaboración propia (Anexo 4)

En la tabla 11 se muestra los resultados de los análisis realizados a las pruebas experimentales, en la primera columna se encuentran los tiempos de exposición del agua residual en el reactor de electrocoagulación, en la segunda columna los resultados de DQO con un valor inicial de 9962,4 mg/L y finalizó con 1748,2 mg/L, en la tercera columna se presenta los resultados de DBO<sub>5</sub> con un valor inicial de 6822,1 mg/L y finalizando con un valor de 859,3 mg/L, en la siguiente columna los resultados de pH, con un valor inicial de 7,1 que fue incrementando hasta un valor básico de 10,4, en la última columna se encuentra la temperatura que inicia en 13,9 °C y se incrementa hasta llegar a un valor de 35,7 °C.

Tabla 12 Resultados del Tratamiento con pH 8 y tensión de corriente 20 V

<b>TIEMPO (min)</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/L)</b>	<b>pH</b>	<b>T (°C)</b>
0	9962,4	6822,1	7,9	14,6
30	4005,7	2541,3	9,3	24,7
45	2712,1	1358,2	10,4	29,8
60	902,9	412,2	10,9	35,4
75	900	405	11	40

Fuente: Elaboración propia (Anexo 4)

En la tabla 12 muestra los resultados de los análisis realizados a las pruebas experimentales, la primera columna muestra los tiempos de exposición del agua residual en el reactor de electrocoagulación, la segunda columna los resultados de DQO con un valor inicial de 9962,4 mg /L y finalizó con 900 mg/L en un tiempo de 75 min, no existiendo mucha variación con una muestra anterior de 902,9 mg/L en un tiempo de 60 min, la tercera columna presenta los resultados de DBO<sub>5</sub> con un valor inicial de 6822,1 mg/L y finalizando con un valor de 405 mg/L, la siguiente columna presenta los resultados de pH, con un valor inicial de 7.,9 que fue incrementando hasta un valor básico de 11, la última columna muestra la temperatura que inicia en 14,6 °C y se incrementa hasta llegar a un valor de 40 °C.

Tabla 13: Resultados del Tratamiento con pH 7 y tensión de corriente 30 V

<b>TIEMPO (min)</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/L)</b>	<b>pH</b>	<b>T (°C)</b>
0	9125,3	6399,5	7	14,1
30	4109,8	2458,9	9,1	25,7
45	2415,6	1208,3	10,5	31
60	1225,1	598,7	11,4	39,7

Fuente: Elaboración propia, (Anexo 5)

En la tabla 13 se muestra los resultados de los análisis realizados a las pruebas experimentales, la primera columna muestran los tiempos de exposición del agua residual en el reactor de electrocoagulación, la segunda columna muestra los resultados de DQO con un valor inicial de 9125,3 mg /L y finalizó con 1225,1 mg/L, la tercera columna presenta los resultados de DBO<sub>5</sub> con un valor inicial de 6399,5 mg/L y finalizando con un valor de 598,7 mg/L, la cuarta columna muestra los resultados de pH, con un valor inicial de 7 que se incrementó hasta un valor básico de 11,4 , en la última columna se encuentra la temperatura que inicia en 14,1 °C y se incrementa hasta llegar a un valor de 39,7 °C.

Tabla 14: Resultados del Tratamiento con pH 8 y tensión de corriente 30 V

<b>TIEMPO (min)</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/L)</b>	<b>pH</b>	<b>T (°C)</b>
0	9125,3	6399,5	8,1	14,5
30	4978,1	2935,7	9,9	24,6
45	2256,8	1199,5	10,8	31,1
60	1109,2	551	11,6	38,8

Fuente: Elaboración propia, (Anexo 5)

En la tabla 14 se muestra los resultados de los análisis realizados a las pruebas experimentales, la primera columna muestran los tiempos de exposición del agua residual en el reactor de electrocoagulación, la segunda columna muestra los resultados de DQO con un valor inicial de 9125,3 mg /L y finalizó con 1109,2 mg/L, la tercera columna presenta los resultados de DBO<sub>5</sub> con un valor inicial de 6399,5 mg/L y finalizando con un valor de 551 mg/L, la cuarta columna muestra los resultados de pH, con un valor inicial de 8,1 que se incrementó hasta un valor básico de 11,6 , en la última columna se encuentra la temperatura que inicia en 14,5 °C y se incrementa hasta llegar a un valor de 38,8 °C.

Tabla 15: Resultados de réplica del Tratamiento con pH 8 y tensión de corriente 20 V

<b>TIEMPO (min)</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/L)</b>	<b>pH</b>	<b>T (°C)</b>
0	10102,8	6992,3	8	13,8
30	4998,2	2854,7	9,6	23,9
45	2298,2	1211,5	10,3	28,1
60	1023,2	475,8	11	36,9
75	1007,5	462,9	11,2	39,5

Fuente: Elaboración propia, (Anexo 6)

En la tabla 15 se muestra los resultados de los análisis realizados a las pruebas experimentales, en este caso se aplicó una réplica porque se obtuvo mayor valor de remoción, para obtener mayor confiabilidad de los



resultados, la primera columna muestran los tiempos de exposición del agua residual en el reactor de electrocoagulación, la segunda columna muestra los resultados de DQO con un valor inicial de 10102,8 mg/L y finalizó con 1007,5 mg/L, la tercera columna presenta los resultados de DBO<sub>5</sub> con un valor inicial de 6992,3 mg/L y finalizando con un valor de 462,9 mg/L, la cuarta columna muestra los resultados de pH, con un valor inicial de 8 que se incrementó hasta un valor básico de 11,2, en la última columna se encuentra la temperatura que inicia en 13,8 °C y se incrementa hasta llegar a un valor de 39,5 °C.

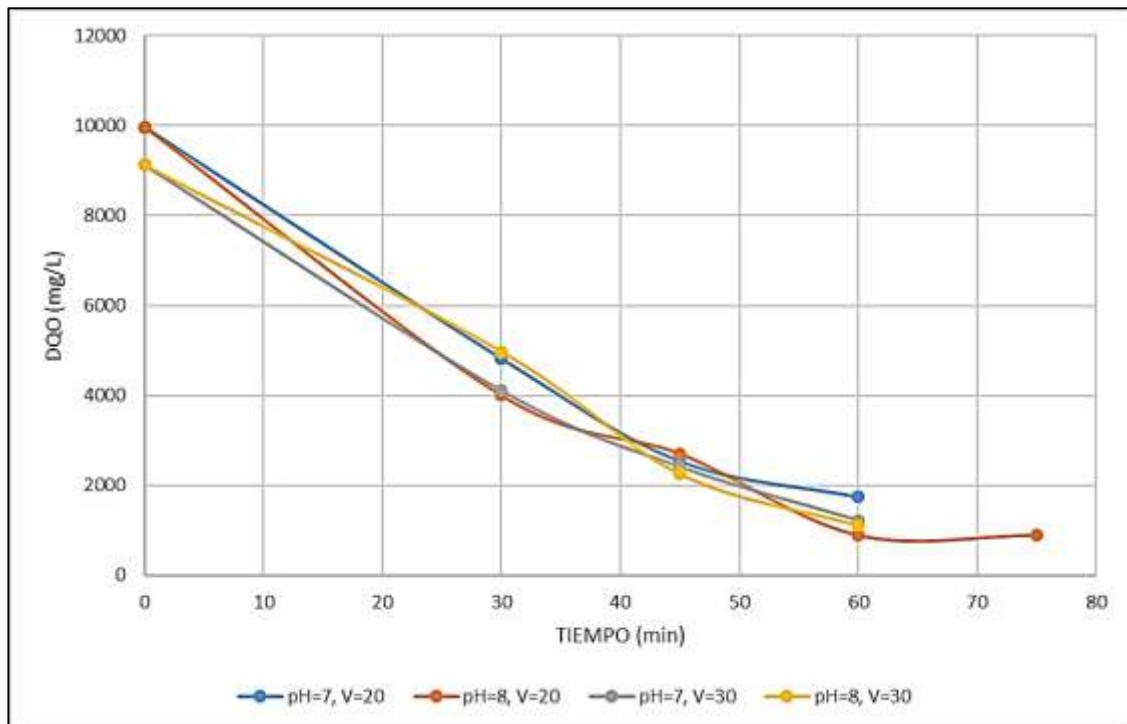
Tabla 16: Resultados de réplica del Tratamiento con pH 8 y tensión de corriente 30 V

<b>TIEMPO (min)</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/L)</b>	<b>pH</b>	<b>T (°C)</b>
0	10102,8	7005,8	7,9	15,8
30	5501,2	3181,1	9,5	24,1
45	2732,1	1442,6	10,7	30,8
60	1311,4	664,2	11,4	39

Fuente: Elaboración propia (Anexo 4)

En la tabla 16 se muestra los resultados de los análisis realizados a las pruebas experimentales, en este caso se aplicó una réplica porque también se obtuvo mayor valor de remoción, para obtener mayor confiabilidad de los resultados, la primera columna muestran los tiempos de exposición del agua residual en el reactor de electrocoagulación, la segunda columna muestra los resultados de DQO con un valor inicial de 10102,8 mg/L y finalizó con 1311,4 mg/L, la tercera columna presenta los resultados de DBO<sub>5</sub> con un valor inicial de 7005,8 mg/L y finalizando con un valor de 664,2 mg/L, la cuarta columna muestra los resultados de pH, con un valor inicial de 7,9 que se incrementó hasta un valor básico de 11,4, en la última columna se encuentra la temperatura que inicia en 15,8 °C y se incrementa hasta llegar a un valor de 39 °C.

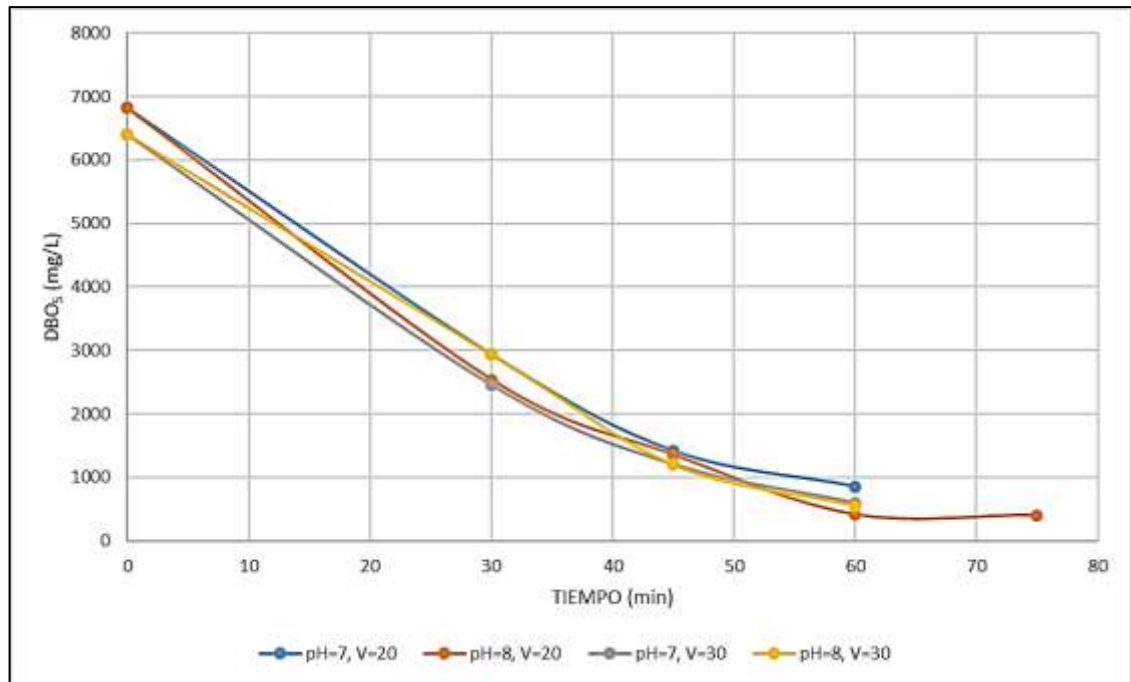
Figura 21: Reducción de la DQO



Fuente: Elaboración propia

En la figura 21, se muestra la disminución del valor de la DQO en las aguas residuales tratadas en el reactor de electrocoagulación, en periodos de tiempo de hasta 60 min y 75 min, con pH 7 y 8, y tensión de corriente de 20 V y 30 V, durante aproximadamente los 30 a 40 minutos iniciales se observa la mayor cantidad de reducción de este parámetro, y en los siguientes minutos la velocidad de reducción disminuye hasta tornarse en valores constantes que muestran la detención del proceso.

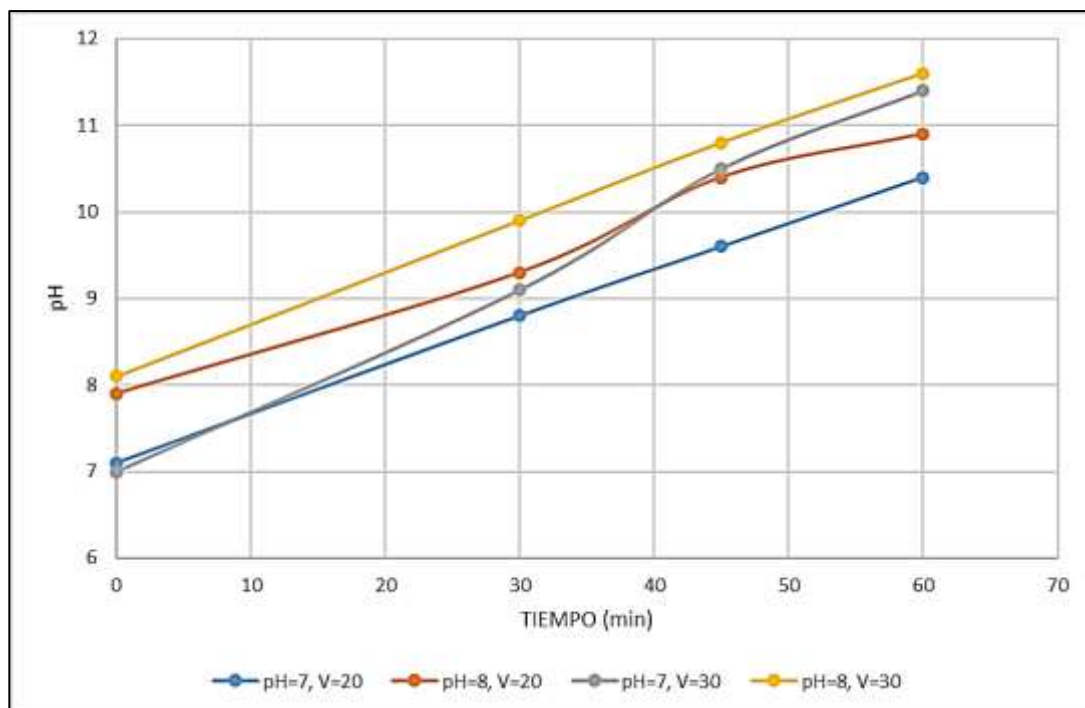
Figura 22: Reducción de la DBO<sub>5</sub>



Fuente: Elaboración propia

En la figura 22, se muestra la disminución del valor de la DBO<sub>5</sub> en las aguas residuales tratadas en el reactor de electrocoagulación, en periodos de tiempo de hasta 60 min y 75 min, con pH 7 y 8, y tensión de corriente de 20 V y 30 V, durante aproximadamente los 30 a 45 minutos iniciales se reduce la mayor cantidad de este parámetro, y en los siguientes minutos los valores se tornan constantes deteniendo la reducción de los valores de la DBO<sub>5</sub>.

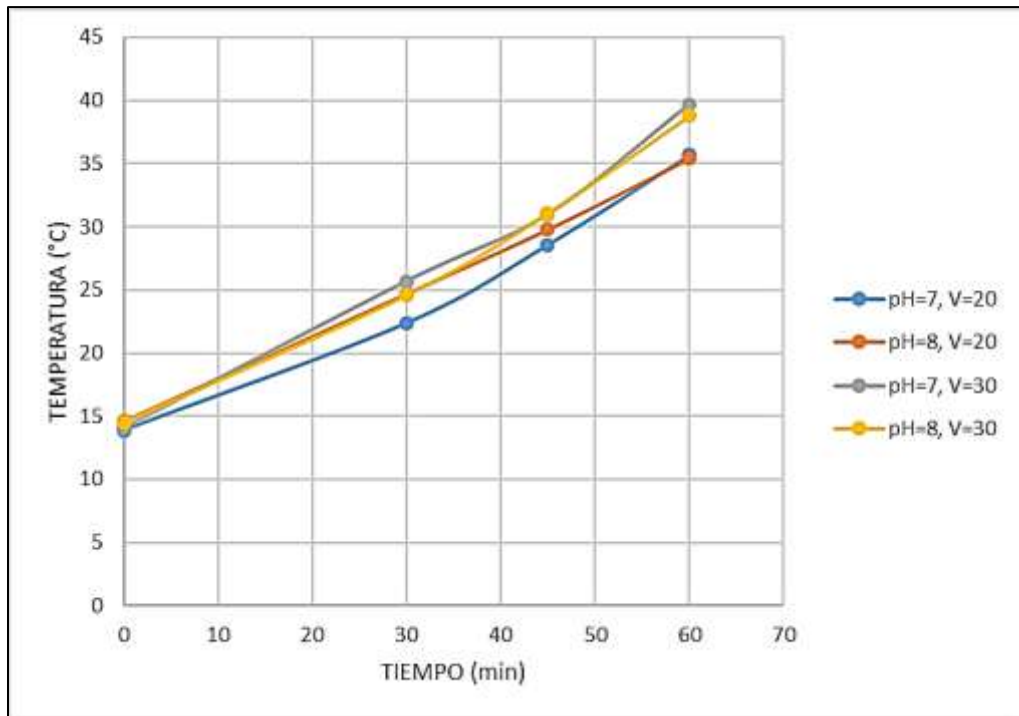
Figura 23: Variación del PH



Fuente: Elaboración propia

En la figura 23, se muestra la variación del valor del pH en las aguas residuales tratadas en el reactor de electrocoagulación, en periodos de tiempo de hasta 60 min, las muestras iniciaron con valores de pH 7 y 8, pero estos fueron incrementándose en forma constante, además se observa que los las muestras donde se aplicó una tensión de corriente de 30 V, tuvo mayor incremento del valor del pH a comparación de las muestras donde se aplicaron tensión de corriente de 20 V.

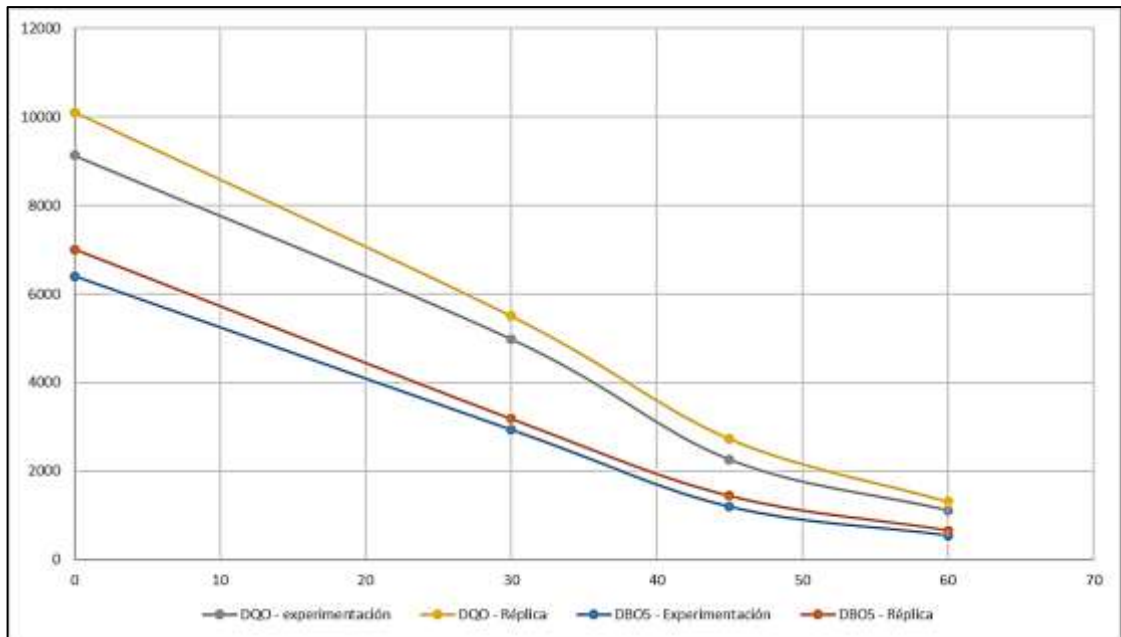
Figura 24: Variación de la Temperatura



Fuente: Elaboración propia

En la figura 24, se muestra la variación de la temperatura en las aguas residuales tratadas en el reactor de electrocoagulación, en periodos de tiempo de hasta 60 min, las muestras incrementaron su temperatura en forma constante, además se observa que los las muestras donde se aplicó una tensión de corriente de 30 V, tuvo mayor incremento de temperatura a comparación de las muestras donde se aplicaron tensión de corriente de 20 V.

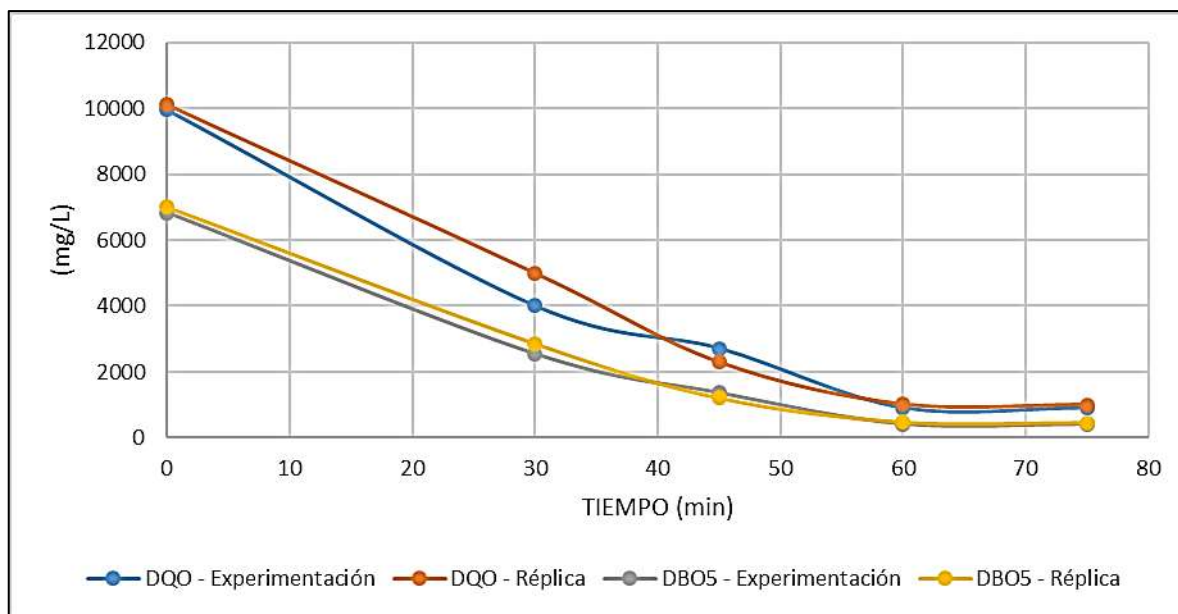
Figura 25: Reducción de DBO<sub>5</sub> y DQO con pH 8 y Tensión de corriente de 30 V



Fuente: Elaboración propia

En la figura 25 se muestra el comportamiento de la reducción de la DBO<sub>5</sub> y DQO, esta experimentación que tuvieron mayor cantidad de reducción en los valores de DBO<sub>5</sub> y DQO respectivamente, con parámetros de pH inicial de 8, tensión de corriente de 30 V y en un tiempo de 60 minutos. Se observa que en las corridas experimentales y en las réplicas el comportamiento es el mismo, donde la caída de los valores se da hasta los 45 minutos aproximadamente y después ésta disminuye hasta tender a ser constante lo cual indica que ya no hay reducción de los valores.

Figura 26: Reducción de Materia Orgánica con pH 8 y tensión de corriente de 20 V



Fuente: Elaboración propia

En la figura 26 se muestra el comportamiento de la reducción de la DBO<sub>5</sub> y DQO, en otra experimentación que tuvo mayor cantidad de reducción en los valores de DBO<sub>5</sub> y DQO respectivamente, con parámetros de pH inicial de 8, tensión de corriente de 20 V y en un tiempo de 75 minutos. Se observa que en las corridas experimentales y en las réplicas el comportamiento es el mismo, con poca diferencia en la línea media de la DQO, pero llegando al mismo resultado al final de la curva. La caída de los valores se da hasta los 45 a 50 minutos aproximadamente y después ésta disminuye hasta tender a ser constante lo cual indica que ya no hay reducción en los valores de los parámetros mencionados.

## 4.2 Discusión de resultados

Tabla 17: Cálculos de DQO y DBO<sub>5</sub> con pH 7 y Tensión de corriente 20 V

TIEMPO	pH	% DQO	% DBO <sub>5</sub>	Relación DBO/DQO
0	7,1	0,0	0,0	0,685
30	8,8	51,6	56,9	0,610
45	9,6	74,4	79,1	0,559
60	10,4	82,5	87,4	0,492

Fuente: Elaboración propia

La tabla 17 muestra los porcentajes de la reducción de la materia orgánica en las pruebas experimentales con parámetros de pH 7 y tensión de corriente de 20 V, los tiempos aplicados llegaron hasta los 60 min, el valor del pH se incrementó de 7,1 hasta 10,4, el porcentual de la reducción de la DQO llegó hasta 82,5 % y la DBO<sub>5</sub> hasta un 87,4 %, proporcionando una degradabilidad de la materia orgánica DBO / DQO inicial de 0,685 y final de 0,492.

Tabla 18: Cálculos de DQO y DBO<sub>5</sub> con pH 8 y Tensión de corriente 20 V

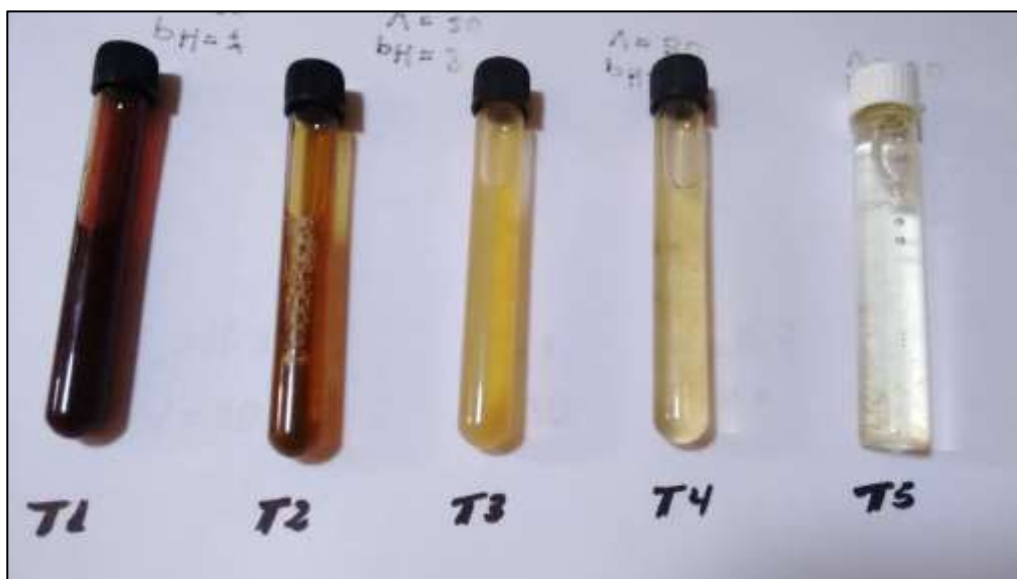
TIEMPO	pH	% DQO	% DBO <sub>5</sub>	Relación DBO/DQO
0	7,9	0,0	0,0	0,685
30	9,3	59,8	62,7	0,634
45	10,4	72,8	80,1	0,501
60	10,9	90,9	94,0	0,457
75	11	91,0	94,1	0,450

Fuente: Elaboración propia

La tabla 18 muestra los porcentajes de la reducción de la materia orgánica en las pruebas experimentales con parámetros de pH 8 y tensión de corriente de 20 V, los tiempos aplicados llegaron hasta los 75 min, el valor del pH se elevó de 7,9 hasta 11, la reducción de la DQO llegó hasta 91 % y de la DBO<sub>5</sub> hasta 94,1 %, obteniendo como degradabilidad de la materia orgánica DBO/DQO, de 0,685 hasta 0,450.



Figura 27: Muestras obtenidas en distintos tiempos de tratamiento



La figura 27, muestra el cambio de color y la reducción de sólidos en el agua residual tratada, en los tiempos de 0, 30, 45, 60 y 75 min, en el tiempo T1 se presentó la muestra sin tratamiento, y en el tiempo T5 el agua después de 75 min de tratamiento con el método de la electrocoagulación, quedó del color transparente y con mínima cantidad de sólidos suspendidos.

Tabla 19: Cálculos de DQO y DBO<sub>5</sub> con pH 7 y Tensión de corriente 30 V

TIEMPO	pH	% DQO	% DBO <sub>5</sub>	Relación DBO/DQO
0	7	0,0	0,0	0,701
30	9,1	55,0	61,6	0,598
45	10,5	73,5	81,1	0,500
60	11,4	86,6	90,6	0,489

Fuente: Elaboración propia

La tabla 19 muestra los porcentajes de la reducción de la materia orgánica en las pruebas experimentales con parámetros de pH 7 y tensión de corriente de 30 V, los tiempos aplicados llegaron hasta los 60 min, el valor del pH se incrementó desde 7 hasta 11,4 la reducción de la DQO llegó hasta

86,6 % y de la DBO<sub>5</sub> hasta 90,6 %, teniendo la degradabilidad de la materia orgánica DBO/DQO desde 0.701 hasta un valor final de 0.489.

Tabla 20: Cálculos de DQO y DBO<sub>5</sub> con pH 8 y Tensión de corriente 30 V

TIEMPO	pH	% DQO	% DBO <sub>5</sub>	Relación DBO/DQO
0	8,1	0,0	0,0	0,701
30	9,9	45,4	54,1	0,590
45	10,8	75,3	81,3	0,532
60	11,6	87,8	91,4	0,497

Fuente: Elaboración propia

La tabla 20 muestra los porcentajes de la reducción de la materia orgánica en las pruebas experimentales con parámetros de pH 8 y tensión de corriente de 30 V, los tiempos llegaron hasta los 60 min, el valor del pH se elevó de 8,1 hasta 11,6, la reducción de la DQO fue hasta un máximo de 87,8 % y de la DBO<sub>5</sub> hasta 91,4 %, la degradabilidad de la materia orgánica DBO/DQO fue desde 0,701 hasta un valor final de 0,497.

Figura 28: Resultados después del tratamiento según parámetros



La figura 28 muestra los resultados de las pruebas experimentales según los parámetros aplicados a los 60 min de tratamiento en la celda de electrocoagulación. El mejor resultado según lo observado fue la muestra

tratada con pH inicial 8 y tensión de corriente de 20 V, porque presenta menor cantidad de sólidos y un color mucho más transparente.

Tabla 21: Réplica de Cálculos DQO y DBO<sub>5</sub> con pH 8 y Tensión de corriente 20 V

<b>TIEMPO</b>	<b>pH</b>	<b>% DQO</b>	<b>% DBO<sub>5</sub></b>	<b>Relación DBO/DQO</b>
0	8	0,0	0,0	0,692
30	9,6	50,5	59,2	0,571
45	10,3	77,3	82,7	0,527
60	11	89,9	93,2	0,465
75	11,2	90,0	93,4	0,459

Fuente: Elaboración propia

La tabla 21 muestra los porcentajes de la reducción de la materia orgánica en las réplicas de las pruebas experimentales con parámetros de pH 8 y tensión de corriente de 20 V, en comparación con los primeros resultados observamos que los tiempos llegaron hasta los 75 min, el valor del pH tuvo el mismo comportamiento, se elevó en 3 unidades de 8 a 11,2, la reducción de la DQO llegó hasta 90 % y de la DBO<sub>5</sub> hasta 93,4 % y la degradabilidad de la materia orgánica DBO/DQO varió de 0,692 a 0,465; valores que son similares a los resultados ya obtenidos con los mismos parámetros.

Tabla 22: Réplica de Cálculos DQO y DBO<sub>5</sub> con pH 8 y Tensión de corriente 30 V

<b>TIEMPO</b>	<b>pH</b>	<b>% DQO</b>	<b>% DBO<sub>5</sub></b>	<b>Relación DBO/DQO</b>
0	7,9	0,0	0,0	0,693
30	9,5	45,5	54,6	0,578
45	10,7	73,0	79,4	0,528
60	11,4	87,0	90,5	0,506

Fuente: Elaboración propia

La tabla 22 muestra los porcentajes de la reducción de la materia orgánica en las réplicas de las pruebas experimentales con parámetros de pH 8 y tensión de corriente de 30 V, en comparación con los primeros resultados

el tiempo fue el mismo hasta 60 min, el valor del pH tuvo el mismo comportamiento de 7,9 y se elevó a 11,4; la reducción de la DQO fue hasta 87 %, de la DBO<sub>5</sub> hasta 90,5 % y la degradabilidad de la materia orgánica DBO/DQO cambió de 0,693 hasta 0,506, valores que tuvieron también el mismo comportamiento de los primeros resultados con estos parámetros.

#### **4.2.1 Tiempo de retención hidráulica**

Se obtiene que, a mayor tiempo de retención hidráulica, es mayor la remoción, en nuestro estudio se observa según las figuras 21 y 22 que hasta los 60 minutos la curva tiene tendencia a disminuir, siendo este tiempo el óptimo encontrado, a partir de los 60 min ya no se presenta remoción significativa.

La eficiencia de remoción incrementa con el incremento de corriente y el tiempo (Arango Ruiz & Garcés Giraldo, Diseño de una Celda de Electrocoagulación, 2007), por lo que, a mayor valor del tiempo de retención, 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, pero también tener en cuenta que las variaciones en el tiempo resultan estadísticamente menos significativas que las variaciones de pH. (Aguilar Ascon, 2015).

#### **4.2.2 pH**

Estudios anteriores nos dicen que los efectos del pH en el agua se ven reflejados en la eficiencia de la corriente y en la solubilidad de los hidróxidos metálicos, encontrándose el valor óptimo para una mejor eficiencia de remoción de pH cercanos a 7. (Chen G. , 2004).

Lo mismo nos dice: (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006) , (Ilhan, Kunt, Apaydin, & Talha Gonullu, 2008) y (Holt, Barton, & Mitchell, 1999) donde 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.

En el estudio se utilizó valores de pH 7 y 8, se obtuvo el incremento de este parámetro en todas las pruebas experimentales a valores alcalinos, porque se utilizó electrodos de hierro y este material tiende a incrementar el valor del pH; este comportamiento lo encontramos en diferentes investigaciones donde 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, dependiendo de la naturaleza del contaminante el pH influye sobre la eficiencia del proceso. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006).

Otras investigaciones nos dicen que el pH del medio cambia durante el proceso y este cambio depende del tipo de material del electrodo y del pH inicial, en el caso del aluminio, el pH final es mayor para un pH inicial  $<8$ , y por encima de este punto el pH final es menor. Además, para el hierro, el pH final siempre es más alto que el pH inicial. La diferencia entre los valores de pH inicial y final disminuye para el pH inicial  $>8$ . Estos resultados sugieren que la electrocoagulación exhibe cierta capacidad de tamponamiento del pH, especialmente en un medio alcalino. (Kobyas, Can, & Bayramoglu, 2003).

Los mejores resultados de remoción se obtuvieron con el valor de pH 8, lo cual se respalda con la investigación que nos dice que el

hierro es más eficiente en medio neutro y alcalino, especialmente entre 6 <pH <9. (Koby, Can, & Bayramoglu, 2003).

#### 4.2.3 Tensión de corriente

La mejor remoción de la materia orgánica en las pruebas experimentales fue con 20 V, junto a un pH 8; la densidad de corriente producida con estos parámetros es de 178,38 A / m<sup>2</sup>.

Las variables eléctricas tienen mayor influencia en el proceso de electrocoagulación, la eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementa con el incremento de densidad de corriente, en altos consumos de energía se presentan pérdidas por la transformación de energía eléctrica en calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio acuoso. (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al<sup>+3</sup> ó hierros Fe<sup>+2</sup>, liberados por los respectivos electrodos, Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficacia (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006), esta sería la razón por la que las pruebas experimentales con 20 V, tuvieron mayor remoción que con 30 V.

### 4.3 Contrastación de Hipótesis

Tabla 23: Porcentaje de remoción en pruebas con 20 V y pH 8.

Voltaje=20 V pH=8			Replica	
TIEMPO	% DQO	% DBO <sub>5</sub>	% DQO	% DBO <sub>5</sub>
30	59,8%	62,7%	50,5%	59,2%
45	72,8%	80,1%	77,3%	82,7%
60	90,9%	94,0%	89,9%	93,2%
75	91,0%	94,1%	90,0%	93,4%

Fuente: Elaboración propia

## One-way ANOVA: Porcentaje DQO vs TIEMPO

```
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
TIEMPO          4  30; 45; 60; 75
Analysis of Variance
Source  DF    Adj SS    Adj MS    F-Value    P-Value
TIEMPO   3  0,168127  0,056042    41,23     0,002
Error    4  0,005437  0,001359
Total    7  0,173564
Model Summary
          S    R-sq    R-sq(adj)    R-sq(pred)
0,0368680  96,87%    94,52%    87,47%
```

Según los resultados obtenidos de las pruebas experimentales de DQO se realizó estadísticamente con el software Minitab 17, utilizó una prueba de ANOVA de TUKEY, los datos ingresados fueron el porcentaje de remoción de DQO como respuesta del tratamiento, resultando el valor P-value = 0,002 siendo menor al valor de significancia del 0,05 propuesto en la prueba; según este resultado podemos rechazar la hipótesis que la variación del tiempo de retención hidráulica no influyen significativamente en la remoción de DQO, por lo tanto se aceptara la hipótesis alterna que si existe diferencia significativa en la remoción de DQO con la variación del tiempo de retención hidráulica en el proceso de electrocoagulación con voltaje de 20 V y pH 8.

```
Means
TIEMPO  N      Mean    StDev      95% CI
30      2  0,5515  0,0658  ( 0,4791; 0,6239)
45      2  0,7505  0,0318  ( 0,6781; 0,8229)
60      2  0,90400 0,00707 (0,83162; 0,97638)
75      2  0,90500 0,00707 (0,83262; 0,97738)
Pooled StDev = 0,0368680
```

## Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

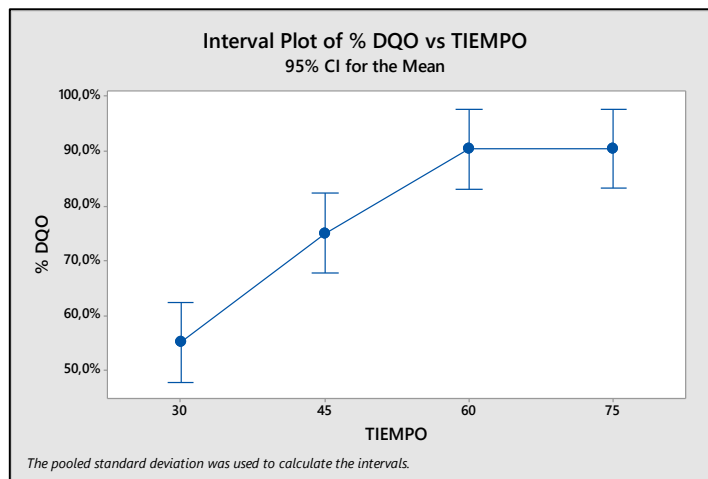
```
TIEMPO  N      Mean  Grouping
75      2  0,90500  A
60      2  0,90400  A
45      2  0,7505   B
30      2  0,5515   C
```

Means that do not share a letter are significantly different.

La comparación de Tukey con el software Minitab 17 de los datos de DQO tratados se presentaron en tres grupos A, B y C para los diferentes

tiempos según sus medias obtenidas, lo que nos indica que para el tiempo de 75 y 60 minutos no existe variación significativa en los resultados por lo tanto pertenecen al grupo A en comparación con los tiempos de 45 y 30 minutos que si existe variación significativa debido a este pertenecen a los grupos B y C.

Figura 29: Intervalo del porcentaje de DQO vs TIEMPO - 20 V y pH 8



En la Figura 29, se observa la diferencia de las medias en los tres primeros tiempos de 30, 45 y 60, siendo esta significativa respecto al porcentaje de remoción de DQO, en los dos últimos tiempos la variación no es significativa y el porcentaje de remoción no tiene mucha variación en el tratamiento de las aguas de camal mediante el proceso de electrocoagulación.

### One-way ANOVA: Porcentaje DBO<sub>5</sub> vs TIEMPO

```

Method
Null hypothesis          All means are equal
Alternative hypothesis   At least one mean is different
Significance level      α = 0,05
Equal variances were assumed for the analysis.
Factor Information
Factor  Levels  Values
TIEMPO    4  30; 45; 60; 75
Analysis of Variance
Source  DF    Adj SS    Adj MS    F-Value    P-Value
TIEMPO   3  0,143073  0,047691  189,44     0,000
Error    4  0,001007  0,000252
Total    7  0,144080
Model Summary
S      R-sq  R-sq(adj)  R-sq(pred)
0,0158666  99,30%   98,78%    97,20%
  
```



Según los resultados obtenidos de las pruebas experimentales de DBO<sub>5</sub>, se realizó estadísticamente con el software Minitab 17, donde se utilizó una prueba de ANOVA de TUKEY, los datos ingresados fueron el porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub> como respuesta del tratamiento, resultando el valor P-value = 0,000 siendo menor al valor de significancia del 0,05 propuesto en la prueba; según este resultado podemos rechazar la hipótesis que la variación del tiempo de retención hidráulica no influyen significativamente en la remoción de DBO<sub>5</sub>, por lo tanto se aceptara la hipótesis alterna que si existe diferencia significativa en la remoción de DBO<sub>5</sub> con la variación del tiempo de retención hidráulica en el proceso de electrocoagulación con voltaje de 20 V y pH 8.

```
Means
TIEMPO  N      Mean    StDev      95% CI
30      2    0,6095    0,0247  ( 0,5783; 0,6407)
45      2    0,8140    0,0184  ( 0,7828; 0,8452)
60      2    0,93600   0,00566 (0,90485; 0,96715)
75      2    0,93750   0,00495 (0,90635; 0,96865)
Pooled StDev = 0,0158666
```

### Tukey Pairwise Comparisons

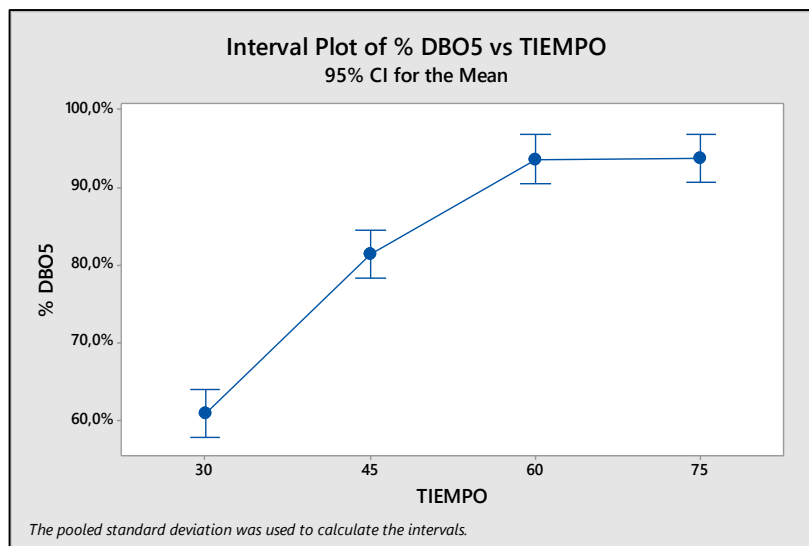
Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

```
TIEMPO  N      Mean  Grouping
75      2    0,93750  A
60      2    0,93600  A
45      2    0,8140   B
30      2    0,6095   C
```

Means that do not share a letter are significantly different.

La comparación de Tukey con el software Minitab 17 de los datos de DBO<sub>5</sub> tratados se presentaron en tres grupos A, B y C para los diferentes tiempos según sus medias obtenidas, lo que nos indica que para el tiempo de 75 y 60 minutos no existe variación significativa en los resultados por lo tanto pertenecen al grupo A en comparación con los tiempos de 45 y 30 minutos que si existe variación significativa debido a este pertenecen a los grupos B y C.

Figura 30: Intervalo del porcentaje de DBO<sub>5</sub> vs TIEMPO - 20 V y pH 8



En la Figura 30, se observa que la diferencia de las medias en los tres primeros tiempos de 30, 45 y 60, siendo esta significativa respecto al porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub>, en los dos últimos tiempos la variación no es significativa y el porcentaje de remoción no tiene mucha variación en el tratamiento de las aguas de camal mediante el proceso de electrocoagulación.

Tabla 24: Porcentaje de remoción en prueba con 30 V y pH 8

Voltaje=30 v Y pH=8			Replica	
TIEMPO	% DQO	% DBO <sub>5</sub>	% DQO	% DBO <sub>5</sub>
30	45,4%	54,1%	45,5%	54,6%
45	75,3%	81,3%	73,0%	79,4%
60	87,8%	91,4%	87,0%	90,5%

Fuente: Elaboración propia

### One-way ANOVA: Porcentaje DQO vs TIEMPO

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  
 TIEMPO 3 30; 45; 60  
 Analysis of Variance  
 Source DF Adj SS Adj MS F-Value P-Value  
 TIEMPO 2 0,183937 0,091968 928,97 0,000

Error	3	0,000297	0,000099
Total	5	0,184234	
Model Summary			
	S	R-sq	R-sq(adj)
	0,0099499	99,84%	99,73%
			R-sq(pred)
			99,36%

Según los resultados obtenidos de las pruebas experimentales de DQO se realizó estadísticamente con el software Minitab 17, se utilizó una prueba de ANOVA de TUKEY, los datos ingresados fueron el porcentaje de remoción de DQO como respuesta del tratamiento, resultando el valor P-value = 0,000 siendo menor al valor de significancia del 0,05 propuesto en la prueba; según este resultado podemos rechazar la hipótesis que la variación del tiempo de retención hidráulica no influyen significativamente en la remoción de DQO, por lo tanto se aceptara la hipótesis alterna que si existe diferencia significativa en la remoción de DQO con la variación del tiempo de retención hidráulica en el proceso de electrocoagulación con voltaje de 30 V y pH 8.

Means				
TIEMPO	N	Mean	StDev	95% CI
30	2	0,454500	0,000707	(0,432110; 0,476890)
45	2	0,7415	0,0163	( 0,7191; 0,7639)
60	2	0,87400	0,00566	( 0,85161; 0,89639)
Pooled StDev = 0,00994987				

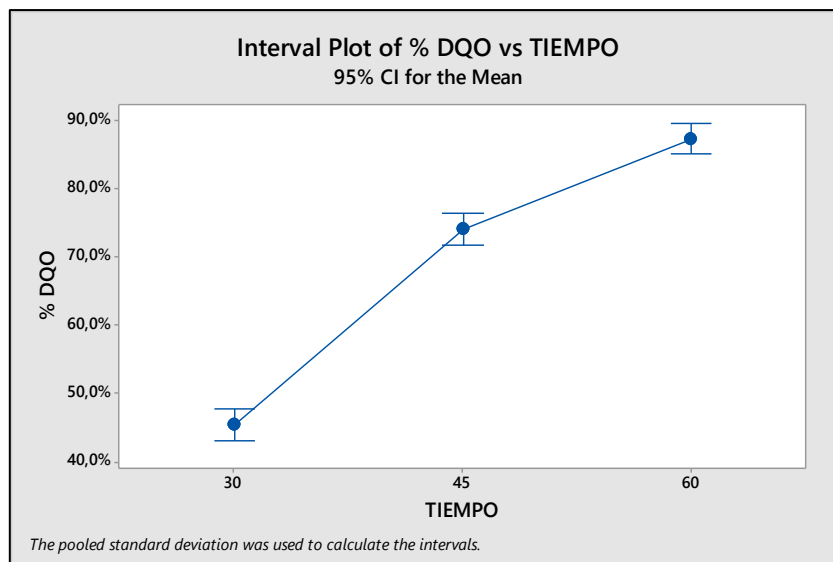
### Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence			
TIEMPO	N	Mean	Grouping
60	2	0,87400	A
45	2	0,7415	B
30	2	0,454500	C

Means that do not share a letter are significantly different.

La comparación de Tukey con el software Minitab 17 de los datos de DQO tratados se presentaron en tres grupos A, B y C para los diferentes tiempos según sus medias obtenidas existiendo una variación significativa en el porcentaje de remoción de DQO, obteniendo la mayor remoción a los 60 minutos del tratamiento.

Figura 31: Intervalo del porcentaje de DQO vs TIEMPO - 30 V y pH 8



En la Figura 31, se observa que la diferencia de las medias en los tres tiempos de 30, 45 y 60 minutos, siendo esta significativa respecto al porcentaje de remoción de DQO, en el tratamiento de las aguas de camal mediante el proceso de electrocoagulación.

### One-way ANOVA: Porcentaje DBO<sub>5</sub> vs TIEMPO

```

Method
Null hypothesis          All means are equal
Alternative hypothesis   At least one mean is different
Significance level      α = 0,05
Equal variances were assumed for the analysis.
Factor Information
Factor  Levels  Values
TIEMPO    3    30; 45; 60
Analysis of Variance
Source  DF    Adj SS    Adj MS    F-Value    P-Value
TIEMPO  2    0,141861  0,070931   911,31     0,000
Error   3    0,000233  0,000078
Total   5    0,142095
Model Summary
S      R-sq    R-sq(adj)  R-sq(pred)
0,0088223  99,84%   99,73%    99,34%
    
```

Según los resultados obtenidos de las pruebas experimentales de DBO<sub>5</sub> se realizó estadísticamente con el software Minitab 17, se utilizó una prueba de ANOVA de TUKEY, los datos ingresados fueron el porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub> como respuesta del tratamiento, resultando el valor P-value = 0,000 siendo menor al valor de significancia del 0,05 propuesto

en la prueba; según este resultado podemos rechazar la hipótesis que la variación del tiempo de retención hidráulica no influyen significativamente en la remoción de DBO<sub>5</sub>, por lo tanto se aceptara la hipótesis alterna que si existe diferencia significativa en la remoción de DBO<sub>5</sub> con la variación del tiempo de retención hidráulica en el proceso de electrocoagulación con voltaje de 30 V y pH 8.

Means

TIEMPO	N	Mean	StDev	95% CI
30	2	0,54350	0,00354	(0,52365; 0,56335)
45	2	0,80350	0,01344	(0,78365; 0,82335)
60	2	0,90950	0,00636	(0,88965; 0,92935)

Pooled StDev = 0,00882232

### Tukey Pairwise Comparisons

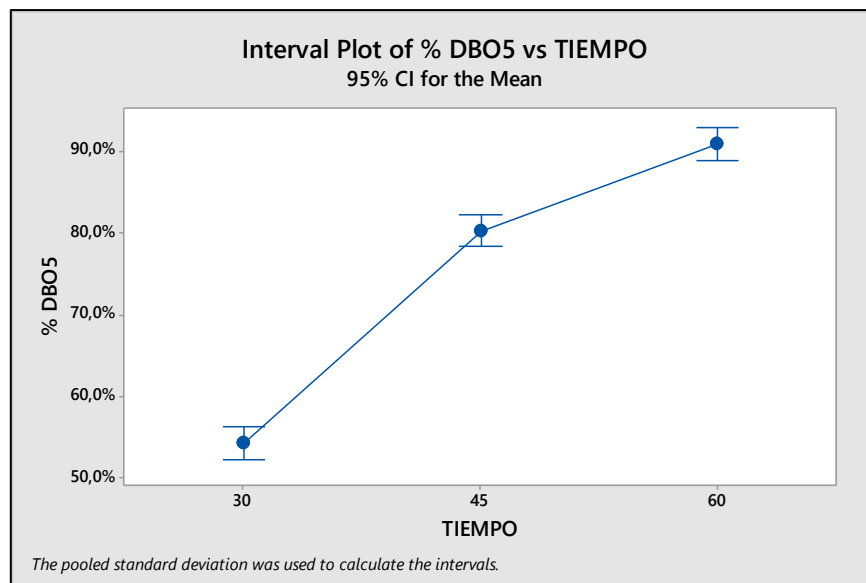
Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

TIEMPO	N	Mean	Grouping
60	2	0,90950	A
45	2	0,80350	B
30	2	0,54350	C

Means that do not share a letter are significantly different.

La comparación de Tukey con el software Minitab 17 de los datos de DQO tratados se presentaron en tres grupos A, B y C para los diferentes tiempos según sus medias obtenidas existiendo una variación significativa en el porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub>, obteniendo la mayor remoción a los 60 minutos del tratamiento.

Figura 32: Intervalo del porcentaje de DBO<sub>5</sub> vs TIEMPO - 30 V y pH 8



En la Figura 31, se observa que la diferencia de las medias en los tres tiempos de 30, 45 y 60 minutos, siendo esta significativa respecto al porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub>, en el tratamiento de las aguas de camal mediante el proceso de electrocoagulación.

## CONCLUSIONES

- Se logró una reducción de la DQO en 90,9% y de la DBO<sub>5</sub> de 94% con el método de la electrocoagulación para las aguas residuales del camal municipal de Chupaca.
- La composición físico química de las aguas residuales del Camal municipal de Chupaca contienen sólidos disueltos de 1905 mg/L, sólidos suspendidos de 1597 mg/L, Sólidos totales 4297 mg/L, DQO de 9962,6 mg/L, DBO<sub>5</sub> de 6822,5 mg/L y un pH de 7,6.; por la presencia principalmente de restos de sangre, grasas, heces y pelos de los animales que son sacrificados en el lugar.
- El tiempo de retención hidráulica óptimo obtenido es de 60 min, después de este tiempo la reducción de la carga orgánica ya no es significativa, para el tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Chupaca.
- El pH es uno de los parámetros que influye en la reducción de materia orgánica mediante el método de la electrocoagulación, en este trabajo se encontró que el mejor valor es de 8, el cuál durante el proceso tiende a incrementarse por la producción de hidróxidos al usar electrodos de hierro en el ánodo.
- La tensión de corriente óptima es de 20 voltios, junto al tiempo de retención hidráulica óptimo de 60 min y el valor óptimo de pH 8, son los parámetros que logran mejores resultados para el tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Chupaca mediante el método de electrocoagulación.

## RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis físico químicos de los sólidos restantes en la celda de electrocoagulación después del tratamiento, para su evaluación y definir su utilización y disposición final.
- No se debe exceder el voltaje a valores mayores de los 30 V, porque podría ocurrir sobrecarga en la celda lo cual ocasiona incendio, además la sobre carga también disminuye la eficiencia del proceso.
- Es necesario realizar un tratamiento adicional a las aguas tratadas, su valor aún alto y está fuera de los parámetros de los LMP de carga orgánica para que sean factible su vertimiento hacia el río Cunas que tiene aguas clasificadas como Clase 3.



## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar Ascon, E. A. (2015). *Tesis: Evaluacion de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio en el tratamiento de agua*. Lima.
- Arango Ruiz, A. (2005). La electrocoagulación: Una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigacion*, 49 - 56.
- Arango Ruiz, A., & Garcés Giraldo, L. F. (2007). Diseño de una Celda de Electrocoagulación. *Revista Universidad EAFIT*, 56 - 67.
- Chen, G. (2004). Electrochemical Technologies in wastewater treatment. *ELSEVIER*, 11-41.
- Chen, X., Chen, G., & Lock Yue, P. (2000). Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *ELSEVIER*, 65-76.
- Chupaca, M. P. (10 de 07 de 2017). *Municipalidad Provincial de Chupaca*. Obtenido de <http://www.munichupaca.gob.pe/>
- Ecosystem SA. (22 de 05 de 2002). *Tratamiento de aguas residuales mediante "Electrocoagulación"*. Obtenido de <http://www.ecofield.com.ar/archivo/a-011.htm>
- Gonzalo Motante G. (2002). Electrocoagulación de aguas residuales. *Revista Colombiana de Física*, 484 - 487.
- Guerrero E., J., & Ramirez F., I. (2004). Manejo Ambiental de Residual en Mataderos de Pequeños Municipios. *Redalyc.org*, 199-204.
- Hernandez Lehmann, P. S. (2011). *Tesis: Investigacion Sobre Procesos Avanzados de Tratamiento y Depuración de las Aguas Mediante Electrocoagulación*. Madrid.
- Holt, P., Barton, G., & Mitchell, C. (1999). Electrocoagulation as a wastewater treatment. *the third annual australian environmental engineering research event*, 23-26.
- Ilhan, F., Kunt, U., Apaydin, O., & Talha Gonullu, M. (2008). Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminium and iron electrodes. *ELSEVIER*, 381 -389.

- Julio Isasc Maldonado M, J. A. (2006). SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES EN MATADEROS. *REVISTA AMBIENTAL - AGUA, AIRE Y SUELO*, 34 - 47.
- Kobya, M., Can, O. T., & Bayramoglu, M. (2003). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *ELSEVIER*, 163-178.
- Marcos Hernandez, A., Cuadros Blazquez, F., Lopez Rodriguez, F., García Rodriguez, J., Martinez Salazar, E., & Moral García, F. (2002). *Caracterizacion y Depuracion Biológica anaerobia de efluentes de aguas residuales de Matadero*. España: Area de proyectos de ingeniería - universidad de extremadura.
- Mariz Medeiros, D. (2011). *Investigacion Sobre la Eliminacion de olores en Depuradoras*. Madrid.
- Molinet Coll, V., & Pigem comeselle, R. (2004). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN MATADEROS. *Selección de Ingeniería Sanitario y Ambiental*, 21 - 24.
- Moreno, B. (2006). *Higiene e Inspeccion de Carnes I*. España: Edígrafos.
- Muñoz, D. M. (2005). Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de Matadero: para una población menor a 2000 Habitantes. *Facultas de ciencias Agropecuarias Vol.3*, 88-98.
- ONU medio ambiente. (28 de 04 de 2017). *Oficina regional de America Latina y el Caribe*. Obtenido de <http://www.unep.org/americalatinacaribe/>
- Ortiz Arce, J. M. (1995). Tratabilidad de aguas residuales de mataderos con filtros. *Ingeniería e Investigación*, 24 - 35.
- Ovalles, F. A. (2006). *Manejo Sustentable de los Recursos Naturales en América Latina y el Caribe: Oportunidades y Desafíos de Investigación y Desarrollo Tecnológico para la Cooperación*. Maracaibo, Venezuela.
- Piña Soberanis, M., Martín dominguez, A., & Gonzale, A. (2011). Revision de Variables de Diseño y condiciones de Operacion en la Electrocoagulation. *Revista mexicana de Ingeniería Química*, 257 - 271.

- Restrepo Mejía, A. P., Arango Ruiz, Á., & Garcés Giraldo, L. F. (2006). La Electrocoagulación: Retos y Oportunidades en el Tratamiento de Aguas. *Revista Produccion Limpia*, 58 - 77.
- Salas C., G., & Condorhuamán C., C. (2008). Tratamiento de las Aguas Residuales de un Centro de Beneficio o Matadero de ganado. *Revista Peruana Química*, 29 - 35.
- Sierra Ramirez, D. C., & Vivas Albarracin, C. (2005). *Tesis - Diseño e implementacion de una unidad Piloto de Tratamiento Biológico no convencional para los vertimientos generados en el matadero de Macanal (Corpochivor)*. Bogotá.

## **ANEXOS**

## **REPORTES DE ANÁLISIS DE AGUAS**

## Anexo 1



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ  
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO



### REPORTE DE ANÁLISIS DE AGUA

SOLICITA: ÁNGELA VELÁZQUEZ SOLIER

MUESTRA	: Agua Residual de Camal	ANÁLISIS N° 114-c-2016
LUGAR	: Camal Municipal de Chupaca	FECHA DE MUESTREO: 20/10/2016
DISTRITO	: Chupaca	HORA DE MUESTREO: 10:30 a.m.
PROVINCIA	: Chupaca	FECHA DE ANÁLISIS : 20/10/2016
REGIÓN	: Junín	MUESTREADO: Ángela Velázquez Solier

MÉTODOS NORMALIZADOS PARA ANÁLISIS DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL, APHA, AWWA, WPCF

Parámetros	Método	Resultados
Sólidos disueltos	MS-2540-C-Secado a 180°C	1918,0 mg/L
Sólidos suspendidos	MS-2540-C-Secado a 103°C-105°C	1554,4 mg/L
Sólidos totales	MS-2540-C-Secado a 103°C-105°C	4301,2 mg/L
O <sub>2</sub>	MS-5220-D- reflujo	0 mg/L
pH	MS-4500-H+B-Electrométrico	7,4
Conductividad	MS-2540-C-Secado a 180°C	3665,0 $\mu\text{Sm/cm}$
DQO	MS-5220-D-reflujo cerrado colorimétrico	94001,4 mg/L
DBO <sub>5</sub>	MS-5210-B-ROD 5 días	6615,1 mg/L

Huancayo, 21 de noviembre 2016

  
  
Dr. Demetrio Salazar Mauricio  
Responsable del LAQ

## Anexo 2



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ  
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO



### REPORTE DE ANÁLISIS DE AGUA

SOLICITA: ÁNGELA VELÁZQUEZ SOLIER


MUESTRA	: Agua Residual de Camal	ANÁLISIS N° 114-c-2016
LUGAR	: Camal Municipal de Chupaca	FECHA DE MUESTREO: 20/10/2016
DISTRITO	: Chupaca	HORA DE MUESTREO: 10:30 a.m.
PROVINCIA	: Chupaca	FECHA DE ANÁLISIS : 20/10/2016
REGIÓN	: Junín	MUESTREADO: Ángela Velázquez Solier

#### MÉTODOS NORMALIZADOS PARA ANÁLISIS DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL, APHA, AWWA, WPCF

Parámetros	Método	Resultados
Sólidos disueltos	MS-2540-C-Secado a 180°C	1918,0 mg/L
Sólidos suspendidos	MS-2540-C-Secado a 103°C-105°C	1554,4 mg/L
Sólidos totales	MS-2540-C-Secado a 103°C-105°C	4301,2 mg/L
O <sub>2</sub>	MS-5220-D- reflujo	0 mg/L
pH	MS-4500-H+-B-Electrométrico	7,4
Conductividad	MS-2540-C-Secado a 180°C	3665,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$
DQO	MS-5220-D-reflujo cerrado colorimétrico	94001,4 mg/L
DBO <sub>5</sub>	MS-5210-B-ROD 5 días	6615,1 mg/L

Huancayo, 21 de noviembre 2016



  
Dr. Demetrio Salazar Mauricio  
Responsable del LAQ

### Anexo 3



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ  
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO



## REPORTE DE ANÁLISIS DE AGUA

SOLICITA: ÁNGELA VELÁZQUEZ SOLIER

MUESTRA	: Agua Residual de Camal	ANÁLISIS N° 114-2016
LUGAR	: Camal Municipal de Chupaca	FECHA DE MUESTREO: 16/10/2016
DISTRITO	: Chupaca	HORA DE MUESTREO: 10:30 a.m.
PROVINCIA	: Chupaca	FECHA DE ANÁLISIS : 16/10/2016
REGIÓN	: Junín	MUESTREADO: Ángela Velázquez Solier

### MÉTODOS NORMALIZADOS PARA ANÁLISIS DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL, APHA, AWWA, WPCF

Parámetros	Método	Resultados
Sólidos disueltos	MS-2540-C-Secado a 180°C	1905,0 mg/L
Sólidos suspendidos	MS-2540-C-Secado a 103°C-105°C	1597,0 mg/L
Sólidos totales	MS-2540-C-Secado a 103°C-105°C	4297,0 mg/L
O <sub>2</sub>	MS-5220-D- reflujo	0 mg/L
pH	MS-4500-H+-B-Electrométrico	7,6
Conductividad	MS-2540-C-Secado a 180°C	3620,0 $\mu\text{Sm/cm}$
DQO	MS-5220-D-reflujo cerrado colorimétrico	9962,6 mg/L
DBO <sub>5</sub>	MS-5210-B-ROD 5 días	6822,5 mg/L

Huancayo, 21 de noviembre 2016



Dr. Demetrio Salazar Mauricio  
Responsable del LAQ



## Anexo 4



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ  
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO



### REPORTE DE ANÁLISIS DE AGUA

SOLICITA: ÁNGELA VELÁZQUEZ SOLIER

MUESTRA	: Agua Residual de Camal	ANÁLISIS N° 114_I-2016
LUGAR	: Camal Municipal de Chupaca	FECHA DE MUESTREO: 21/10/2016
DISTRITO	: Chupaca	FECHA DE ANALISIS :21/10/2016
PROVINCIA	: Chupaca	MUESTREADO: Ángela Velázquez Solier
REGIÓN	: Junín	

MÉTODOS NORMALIZADOS PARA ANÁLISIS DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL, APHA, AWWA, WPCF

Tratamiento con pH 7 y tensión de corriente 20 V

Tratamiento	DQO (mg/L)	DBO5 (mg/L)	pH
1	9962,4	6822,1	7,1
2	4821,6	2940,3	8,8
3	2546,5	1422,8	9,6
4	1748,2	859,3	10,4

Tratamiento con pH 8 y tensión de corriente 20 V

Tratamiento	DQO (mg/L)	DBO5 (mg/L)	pH
1	9962,4	6822,1	7,9
2	4005,7	2541,3	9,3
3	2712,1	1358,2	10,4
4	902,9	412,2	10,9
5	900	405	11

Huancayo, 21 de noviembre 2016



Dr. Demétrio Salazar Mauricio  
Responsable del LAQ

## Anexo 5



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ  
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO



### REPORTE DE ANÁLISIS DE AGUA

SOLICITA: ÁNGELA VELÁZQUEZ SOLIER

MUESTRA	: Agua Residual de Camal	ANÁLISIS N° 114_II-2016
LUGAR	: Camal Municipal de Chupaca	FECHA DE MUESTREO: 27/10/2016
DISTRITO	: Chupaca	FECHA DE ANÁLISIS :27/10/2016
PROVINCIA	: Chupaca	MUESTREADO: Ángela Velázquez Solier
REGIÓN	: Junín	

MÉTODOS NORMALIZADOS PARA ANÁLISIS DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL, APHA, AWWA, WPCF

Tratamiento con pH 7 y tensión de corriente 30 V

Tratamiento	DQO (mg/L)	DBO5 (mg/L)	pH
1	9125,3	6399,5	7
2	4109,8	2458,9	9,1
3	2415,6	1208,3	10,5
4	1225,1	598,7	11,4

Tratamiento con pH 8 y tensión de corriente 30 V

Tratamiento	DQO (mg/L)	DBO5 (mg/L)	pH
1	9125,3	6399,5	8,1
2	4978,1	2935,7	9,9
3	2256,8	1199,5	10,8
4	1109,2	551	11,6

Huancayo, 21 de noviembre 2016



Dr. Demetrio Salazar Mauricio  
Responsable del LAQ

## Anexo 6



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ  
LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO



### REPORTE DE ANÁLISIS DE AGUA

SOLICITA: ÁNGELA VELÁZQUEZ SOLIER

MUESTRA	: Agua Residual de Camal	ANÁLISIS N° 114_III-2016
LUGAR	: Camal Municipal de Chupaca	FECHA DE MUESTREO: 04/11/2016
DISTRITO	: Chupaca	FECHA DE ANÁLISIS :04/11/2016
PROVINCIA	: Chupaca	MUESTREADO: Ángela Velázquez Solier
REGIÓN	: Junín	

MÉTODOS NORMALIZADOS PARA ANÁLISIS DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL, APHA, AWWA, WPCF

Réplica del Tratamiento con pH 8 y tensión de corriente 20 V

Tratamiento	DQO (mg/L)	DBO5 (mg/L)	pH
1	10102,8	6992,3	8
2	4998,2	2854,7	9,6
3	2298,2	1211,5	10,3
4	1023,2	475,8	11
5	1007,5	462,9	11,2

réplica del Tratamiento con pH 8 y tensión de corriente 30 V

Tratamiento	DQO (mg/L)	DBO5 (mg/L)	pH
1	10102,8	7005,8	7,9
2	5501,2	3181,1	9,5
3	2732,1	1442,6	10,7
4	1311,4	664,2	11,4

Huancayo, 21 de noviembre 2016



Dr. Debuerto Salazar Mauricio  
Responsable del LAQ

## **GALERÍA DE IMÁGENES**

**Imagen 1: Celda de Electrocoagulación construida para realizar el trabajo de investigación.**



**Imagen 2: Filtración simple del agua residual de Camal**



**Imagen 3: Calibración de multiparametro, antes del trabajo**



**Imagen 4: Medición de pH y Temperatura de la muestra antes de iniciar el tratamiento.**



**Imagen 5: Electrodo de Hierro y Aluminio, que fueron utilizados en la celda de electrocoagulación.**



**Imagen 6: Fuente de poder utilizado en la investigación, con regulador de Voltaje y medidor de Amperaje.**





**Imagen 7: Armado del equipo de electrocoagulación para puesta en marcha de las pruebas experimentales.**



**Imagen 8: Iniciando con el proceso de la Electrocoagulación.**



**Imagen 9: Comportamiento de la muestra durante el proceso de electrocoagulación.**



**Imagen 10: Finalizando el tratamiento de la muestra de aguas residuales de camal, en la celda de electrocoagulación.**



**Imagen 11: Extracción del agua tratada de la celda de electrocoagulación.**



**Imagen 12: Cambio de composición en la muestra antes, durante y al finalizar el tratamiento de la electrocoagulación.**

