

# Tratamiento de aguas residuales con cámaras de electrocoagulación a escala de laboratorio

Jose Ayuque-Rojas  
Johnny Esteban-Carhuapoma  
Jorge Huere

Cesareo Ayuque-Laurento  
Carlos Dueñas  
Russbelt Yaulilahua



**DOI: 10.35622/inudi.b.060**

EDITADA POR  
INSTITUTO  
UNIVERSITARIO  
DE INNOVACIÓN CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA INUDI PERÚ





# **Tratamiento de aguas residuales con cámaras de electrocoagulación a escala de laboratorio**

**DOI: <https://doi.org/10.35622/inudi.b.060>**

**Jose Ayuque-Rojas**

**<https://orcid.org/0000-0002-8735-4105>**

**[jayuque@unah.edu.pe](mailto:jayuque@unah.edu.pe)**

**Johnny Esteban-Carhuapoma**

**<https://orcid.org/0000-0002-3095-3705>**

**[Johnny.esteban@unh.edu.pe](mailto:Johnny.esteban@unh.edu.pe)**

**Jorge Huere**

**<https://orcid.org/0000-0002-3114-8134>**

**[jorge.huere@unh.edu.pe](mailto:jorge.huere@unh.edu.pe)**

**Cesareo Ayuque-Laurente**

**<https://orcid.org/0000-0002-8378-1521>**

**[sancesareon97@gmail.com](mailto:sancesareon97@gmail.com)**

**Carlos Dueñas**

**<https://orcid.org/0000-0003-3933-3964>**

**[carlos.duenas@unh.edu.pe](mailto:carlos.duenas@unh.edu.pe)**

**Russbelt Yaulilahua**

**<https://orcid.org/0000-0002-7007-3059>**

**[russbeltyauli24@gmail.com](mailto:russbeltyauli24@gmail.com)**

**Instituto Universitario  
de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú**

Tratamiento de aguas residuales con cámaras de electrocoagulación a escala de laboratorio

Jose Carlos Ayuque Rojas  
Johnny Angel Esteban Carhuapoma  
Jorge Luis Huere Peña  
Cesareo Ayuque Laurente  
Carlos Dueñas Jurado  
Russbelt Yaulilahua Huacho  
(Autores)

ISBN: 978-612-5069-49-8 (PDF)

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2022-12267

DOI: <https://doi.org/10.35622/inudi.b.060>

Editado por Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C  
Urb. Ciudad Jardín Mz. B3 Lt. 2, Puno – Perú

RUC: 20608044818

Email: [editorial@inudi.edu.pe](mailto:editorial@inudi.edu.pe)

Teléfono: +51 973668341

Sitio web: <https://editorial.inudi.edu.pe>

Primera edición digital

Puno, noviembre de 2022

Libro electrónico disponible en

<https://doi.org/10.35622/inudi.b.060>

**Editores:**

Wilson Sucari / Patty Aza / Antonio Flores

*Las opiniones expuestas en este libro es de exclusiva responsabilidad del autor/a y no necesariamente reflejan la posición de la editorial.*

*Publicación sometida a evaluación de pares académicos (Peer Review Doubled Blind)*

Publicado en Perú / *Posted in Peru*



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.





## Contenido

SINOPSIS.....	9
ABSTRACT.....	10
INTRODUCCIÓN .....	11
CAPÍTULO I.....	13
CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	13
1.1 Descripción del problema.....	13
1.2 Justificación.....	16
1.3 Formulación del problema de investigación .....	18
1.4 Formulación de los objetivos .....	18
1.5 Formulación de hipótesis.....	19
CAPITULO II .....	20
MARCO TEÓRICO .....	20
2.1 Antecedentes .....	20
2.1.1 A nivel internacional .....	20
2.1.2 A nivel nacional .....	22
2.1.3 A nivel local .....	28
2.2 Bases teóricas.....	29
2.2.1. Teoría del tratamiento de aguas residuales .....	29
2.2.2. Agua residual industriales.....	30
2.2.3. Aguas residuales de industrias cárnicas .....	30
2.2.4. Tratamiento de aguas residuales .....	33
2.2.5. Normatividad para aguas residuales de camales .....	48
2.3 Bases conceptuales .....	50
CAPÍTULO III.....	53
MARCO METODOLÓGICO .....	53
3.1 Ámbito de estudio .....	53
3.2 Población y muestra .....	53
3.3 Tipo, método y diseño de investigación.....	54
3.4 Técnicas e instrumentos .....	57
3.5 Procedimiento.....	62
CAPÍTULO IV .....	70
RESULTADOS, DISCUSIONES Y CONCLUSIONES .....	70
4.1 Análisis descriptivo .....	70

4.1.1 Resultado Pretest.....	70
4.1.2 Resultado Post test.....	71
4.1.3 Prueba de hipótesis.....	131
4.2 Discusión.....	144
4.3 Conclusiones .....	147
4.4 Recomendaciones .....	148
REFERENCIAS.....	149
ANEXOS.....	153





## SINOPSIS

Este libro es una adaptación de una investigación presentada a la Universidad Nacional de Huancavelica que buscó determinar el grado de influencia que tiene el uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica en Perú. La investigación fue de tipo aplicada, nivel explicativo, el método de investigación fue científico, diseño pretest y post test con un solo grupo, la técnica fue la observación experimental y el instrumento utilizado fue la ficha de registro de datos, la población se conformó por las aguas residuales del camal municipal de Huancavelica, la muestra se conformó por 2 litros de agua residual del mismo camal, en donde el muestreo fue muestreo no probabilístico (no aleatoria) de tipo intencional, según los resultados el tiempo de retención y la densidad de corriente en la cámara de electrocoagulación influyen significativamente en las características fisicoquímicas del agua residual, donde al incrementar la densidad de corriente y el tiempo en el proceso de electrocoagulación aumenta el porcentaje de remoción de contaminantes en más de 92.5 % respecto al parámetro DBO<sub>5</sub>. Y de acuerdo al parámetro pH se logró incrementar los H<sup>+</sup> de acuerdo a los Límites Máximos Permisibles de ácido a neutro.

**Palabras clave:** eficiencia, electrocoagulación, tratamiento, agua.

## ABSTRACT

This book is adapted from an investigation presented to the National University of Huancavelica that sought to determine the degree of influence that the use of an electrocoagulation chamber on a laboratory scale has on the treatment of wastewater from the municipal slaughterhouse in the district of Huancavelica in Peru. The research was of the applied type, explanatory level, the research method was scientific, pretest and posttest design with a single group, the technique was experimental observation and the instrument used was the data record sheet, the population was made up of the wastewater from the municipal camal of Huancavelica, the sample was made up of 2 liters of residual water from the same camal, where the sampling was non-probabilistic (non-random) sampling of an intentional type, according to the results, the retention time and the density of The current in the electrocoagulation chamber significantly influence the physicochemical characteristics of the residual water, where by increasing the current density and the time in the electrocoagulation process, the percentage of contaminant removal increases by more than 92.5% with respect to the BOD<sub>5</sub> parameter. And according to the pH parameter, it was possible to increase the H<sup>+</sup> according to the Maximum Permissible Limits from acid to neutral.

**Keywords:** efficiency, electrocoagulation, treatment, water.

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso fundamental para el desarrollo de la población en todas partes del mundo, este elemento es necesario para la vida a la vez es un recurso que está siendo atacado por las diferentes actividades que desarrolla el hombre.

El camal Municipal de Huancavelica, ubicado en el distrito de Huancavelica; Centro Poblado: Chuñuranra a una altitud de a 3715 msnm, cuenta con una Planta de Tratamiento de Agua Residual, el cual tiene varias deficiencias para el tratamiento del efluente, debido al deficiente dimensionamiento de las operaciones unitarias que compone la planta de tratamiento, sumado a ello el aumento de la demanda de la población.

Como consecuencia del vertido sin tratamiento al ambiente del agua residual del camal municipal de Huancavelica, se contaminan los suelos y los cuerpos de agua, además de incrementar el riesgo de la salud por la proliferación de malos olores.

La industria cárnica genera gran cantidad de aguas residuales con parámetros de contaminación orgánica muy elevados. Por tal razón la investigación científica realizada, busca alternativas técnicas de solución de bajo costo a la problemática del tratamiento, disposición y reúso inadecuado de las aguas residuales del Camal Municipal de Huancavelica.

Se están realizando diversos métodos de tratamiento, para lo cual un método común de ser tratadas es mediante la coagulación, una operación orientada a la desestabilización de los contaminantes del medio acuoso, mediante su interacción con un reactivo (generalmente, sales de Al y de Fe).

Para ello, se utilizó una cámara de electrocoagulación para el tratamiento de las aguas residuales del camal municipal, se trabajó con placas de aluminio como ánodo y cátodo de una celda de electrocoagulación donde se controló el comportamiento de las características fisicoquímicas de la muestra modificando la intensidad de corriente y tiempos de exposición.

El proceso de electrocoagulación es muy similar a un tratamiento químico típico de coagulación, pero utilizando energía eléctrica. Ambos procesos tienen

por objetivo la desestabilización de los coloides contenidos en un agua y se diferencian en el modo de adición del reactivo: en coagulación convencional el reactivo se añade como sal y en electrocoagulación se genera a partir de un metal.

## CAPÍTULO I

### CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

#### 1.1 Descripción del problema

La SUNASS (2016) en el Perú afirma lo siguiente:

Dentro del ámbito de la EPS (Empresas Prestadoras de Servicios), hasta diciembre del 2013, 17,5 millones de habitantes contaban con servicio de agua potable y 16 millones con servicio de alcantarillado:

Las EPS produjeron un promedio de 3,78 millones de m<sup>3</sup> de agua potable al día; es decir, una producción de agua potable per cápita de 216 l/hab/día. Para el cálculo del agua residual vertida al alcantarillado, se considera 20% de pérdida del agua potable producida y otras pérdidas técnicas, lo cual resulta en un caudal diario de 30.000 l/s o 2,59 millones de m<sup>3</sup>, que equivale a 162 l/hab/día. En promedio, 2,59 millones de m<sup>3</sup> de aguas residuales son vertidas al alcantarillado y requieren tratamiento antes de su disposición en el medio ambiente o su reúso.

El reactor tipo Batch es un reactor donde no existe flujo de entrada ni de salida, es simplemente un reactor con un agitador que homogeneiza la mezcla. Es esencialmente un tanque en el que se ha permitido que ocurra una reacción. Considerando la diferencia de habitantes con servicio de agua potable y con servicio de alcantarillado (1,5 millones de habitantes), se puede calcular que actualmente no se captan 238.000 m<sup>3</sup> por día de agua residual en el sistema de alcantarillado. En la actualidad, de las 253 localidades del ámbito de las EPS, 89 no cuentan con tratamiento de aguas residuales, por lo que el agua residual cruda de estas localidades se vierte directamente a los ríos, mares, pampas o drenes y de las 164 localidades restantes, todas o parte de las aguas residuales vertidas al alcantarillado son conducidas hacia una planta de tratamiento de aguas residuales (pp. 16-17).

Villanueva et al. (2013) menciona que las actividades que dan origen a las aguas residuales pueden tener uno o diversos orígenes (doméstico, industrial,

urbano, pecuario, agrícola, recreativo, entre otras), los cuales determinan sus características fisicoquímicas y biológicas que estas aguas puedan tener.

El tratamiento de los desechos y eliminación de las aguas residuales provenientes de camales de índole estatal (municipal) o privado, representa una necesidad económica y de saneamiento público.

Carrasquero et al. (2015) sostiene que las principales fuentes de contaminación de las aguas residuales de los camales, se originan de las heces y orina, sangre, pelusa, lavazas y residuos de la carne y grasas de los camales, los suelos, los utensilios, alimentos no digeridos por los intestinos, las tripas de los animales sacrificados y de vapor condensado procedente del tratamiento de los despojos (p. 88).

Estos desechos de camales municipales varían considerablemente, según que existan o no un sistema adecuado de canales de captación de estas aguas. Cuando no hay una adecuada y formal práctica de limpieza, el número de coliformes y carga orgánica tienden a aumentar debido a parámetros principales como DBO<sub>5</sub>, pH, SST, Aceites y Grasa, Coliformes Totales, Amoniac, Turbiedad, SDT, Color; Tóxicos que en su gran variedad están representados de forma biológica, química y física en las aguas residuales descargadas.

Estos camales municipales hoy en día, están obligados a utilizar grandes cantidades de agua, lo que constituye un factor importante del costo de obtención. La descarga final en vertederos aceptables aumenta a un más los gastos generales y cabe mencionar que algunas de ellas no cuentan con una planta de tratamiento y si lo tienen éstas se encuentran en condiciones deplorables y no están sujeto al sostenimiento de las normativas ambientales del país.

Hernández (2010) enfatiza en la viabilidad económica de proyectos con efectos ambientales es muy importante no considerar sólo los costes y beneficios internos sino también las externalidades ambientales derivadas, ya que, la mayoría de estos no tienen un precio regulado en el mercado por el impacto ambiental que se tiene (p. 1).

Por lo que Carrasquero et al. (2015) proponen un pretratamiento o de un tratamiento completo adecuado que suele disponer de varios medios de eliminación como los procesos biológicos, procesos físicos y químicos, y en ocasiones se presentan ambos que permiten la depuración del agua a un nivel muy profundo (p. 88).

Hoy en día se puede encontrar múltiples procesos de tratamiento de aguas residuales de acuerdo al tipo de procedencia. La electroquímica es una tecnología que en las últimas décadas ha tenido muchas aplicaciones industriales y se ha desarrollado rápidamente ofreciendo varias alternativas que compiten ventajosamente con distintos procesos. 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.

La promulgación de normativas en el país, es cada vez más estricta respecto a límites de vertido de distintas sustancias en las aguas residuales, así como la mejora en los estándares de calidad del agua potable, han hecho que diversos tipos de tratamiento sean aplicables, tales como el caso de los procesos electroquímicos, que en las últimas dos décadas está tomando mayor importancia.

De acuerdo a Suarez (2015) argumenta que hoy en día, estos procesos electroquímicos han alcanzado un momento en el cual no son solamente comparables desde el punto de vista económico con otros procesos, sino que también son más eficientes, compactos y automatizables (p. 2).

La descripción actual de este proceso tecnológico permitirá aplicar el proceso de electrocoagulación como tratamiento primario, la cual es una tecnología de muy poca aplicación en el país y escasa en la localidad de Huancavelica, que tiene como ventajas no usar coagulantes químicos como el sulfato de aluminio, ferroso o férrico, así como polímeros sintéticos los cuales incrementan los costos del tratamiento. Es por ello que su utilización en el proceso de tratamiento de agua, se hace necesario e imprescindible de acuerdo a las realidades socio económicas de nuestra localidad.



En tal situación esta investigación pretende utilizar el proceso electrocoagulación a través del diseño de una cámara electrocoagulación como una tecnología de tratamiento primario de agua residual proveniente del camal municipal de la ciudad de Huancavelica, reduciendo los impactos ambientales y buscando una mejor calidad de agua y su respectiva reutilización.

## 1.2 Justificación

### **Justificación Social**

El tratamiento inadecuado de las aguas residuales provenientes del camal municipal de la localidad de Huancavelica genera la contaminación del agua, aire y suelo. El objetivo principal del tratamiento de aguas residuales es la recuperación y reutilización de materias primas, los métodos de tratamientos son de muchas opciones naturales y tecnológicas, ya que el bajo nivel de soluciones avanzadas en el campo de las aguas residuales indica que existe una necesidad urgente de investigación y nuevas tecnologías que mejoren el tratamiento de las aguas residuales.

La electrocoagulación, una tecnología conocida desde principios del siglo XX, ha evolucionado, siendo eficazmente aplicada en la actualidad para el tratamiento de las aguas residuales, de la industria del papel, la minería y la industria de metales pesados. Una de estas opciones es reducir la carga de contaminante en aguas residuales del camal municipal de la localidad de Huancavelica; reteniendo los residuos del proceso de evisceración y de la recolección de estiércol, recuperando las grasas en separadores y procesando mejor la sangre, las cerdas y el pelo.

### **Justificación Económica**

Los procesos físico químico demanda una inversión a un más mayor para las etapas de tratamiento, basada en el uso de coagulantes como el Sulfato de Aluminio y polímeros sintéticos (policloruro de aluminio), así como algunas sales de fierro los cuales encarecen el tratamiento, además en algunas plantas de tratamiento no se aplica la dosis óptima de estos coagulantes o polímeros, realizando una sobredosificación de estos productos y su uso indiscriminado puede incrementar la concentración de aluminio en el agua tratada;

ocasionando problemas en el cultivo de agua categoría III (Riego de vegetales y bebida de animales - ECA).

### **Justificación Sanitaria**

Teniendo en cuenta estas consideraciones esta investigación busca nuevas alternativas en la depuración de aguas residuales en el país siendo una de estas la electrocoagulación, la cual es una tecnología que tiene como proceso la desestabilización de los contaminantes del agua ya estén en suspensión, emulsionados o disueltos, mediante la acción de corriente eléctrica directa de bajo voltaje y por la acción de electrodos metálicos de sacrificio, normalmente aluminio/hierro. Se trata de un equipo compacto que opera en continuo, mediante un reactor de especial diseño donde se hallan las placas o electrodos metálicos para producir la electrocoagulación. En este proceso se genera una elevada carga de cationes que desestabilizan los contaminantes del agua residual, se forman hidróxidos complejos, estos tienen capacidad de adsorción produciendo agregados (flóculos) con los contaminantes. La electrocoagulación permite la eliminación de contaminantes (aceites y grasas, metales pesados, coloides, moléculas orgánicas, color, etc.) en suspensión, disueltos o emulsionados de aguas residuales muy diversas.

La electrocoagulación es una operación sencilla que requiere de equipos relativamente simples, ya que los flocs formados por electrocoagulación contienen poca agua superficial, son ácido-resistentes y son más estables, por lo que pueden ser separados más fácilmente por filtración.

El comportamiento de la eficiencia de la remoción durante el proceso de tratamiento se produce en la transformación de compuestos y no necesariamente la desaparición de la materia orgánica por la degradación, En cuanto a los sólidos en la espuma, estos resultados están muy vinculados a la densidad de corriente, pues al incrementar los valores de ésta, los procesos en los electrodos aumentan proporcionalmente a la misma, acelerándose el proceso de desprendimiento de gases, lo cual favorece el ascenso de los sólidos en la espuma y dificulta el proceso de formación de los flóculos, por lo que le hace una tecnología de bajo costo y que necesita poca inversión en mantenimiento.

## **Justificación Ambiental**

Además de ser una técnica para el tratamiento de aguas residuales, la electrocoagulación también resultar ser un proceso muy interesante para ser aplicado en camales municipales, ya que facilita el proceso de desalinización del agua a tratar logrando así el cumplimiento de la normativa ambiental vigente en el país LMP (Límites Máximos Permisibles).

### **1.3 Formulación del problema de investigación**

#### **Problema General**

¿Cuál es el grado de influencia del uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica?

#### **Problemas Específicos**

- ¿Cuál es el grado de influencia del uso de la cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio en la DBO<sub>5</sub>, del tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica?
- ¿Cuál es el grado de influencia del uso de la cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio del pH, del tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica?

### **1.4 Formulación de los objetivos**

#### **Objetivo General**

Determinar el grado de influencia que tiene el uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.

#### **Objetivos Específicos**

- Estimar el grado de influencia del uso de la cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio en la DBO<sub>5</sub>, del tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.
- Estimar el grado de influencia del uso de la cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio del pH, del tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.

## 1.5 Formulación de hipótesis

### **Hipótesis General**

El uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio influye significativamente en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.

### **Hipótesis Específicas**

- El uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio influye significativamente en la  $DBO_5$  del tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.
- El uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio influye significativamente en el pH del tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.

### **Descripción de la prueba de hipótesis**

Según Sampieri (2014) las hipótesis científicas se someten a prueba o escrutinio empírico para determinar si son apoyadas o refutadas de acuerdo a lo que el investigador observa. “Esto significa que mientras exista mayor información que avale la investigación, mayor credibilidad tendrá el contraste de aceptar o rechazar la Hipótesis nula” (p. 117).

Para contrastar y probar la hipótesis general y específica de la investigación se realizará la prueba de normalidad de Shapiro – Wilk: “Prueba la hipótesis nula de que una muestra aleatoria procede de una población distribuida normalmente, eligiendo un nivel de significancia de confianza del 95%, debería rechazarse la hipótesis nula exactamente en un 5% de los casos de esta prueba, que es la que se utiliza con más frecuencia para probar la homogeneidad de los datos.” (Correa, 2006).

Lo planteado determinará si la cámara de electrocoagulación es eficiente en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Huancavelica de acuerdo a la Norma: Decreto Supremo N° 005-2019-MINAM.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes

##### 2.1.1 A nivel internacional

Hernández (2019) en su tesis de maestría titulado “Evaluación del sistema de electrocoagulación para disminuir la carga contaminante a escala de laboratorio”, de la Universidad de América Bogotá Colombia, con el de evaluar el método de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la empresa PMP, cuyos vertimientos se caracterizan por el contenido de alta carga orgánica. Se encontró que estos vertimientos tenían un valor de grasas y aceites igual a 1 264 mg/l, sólidos suspendidos igual a 17 814 mg/l, sólidos sedimentables igual a 24 007 mg/l, DQO igual a 85229 mg/l O<sub>2</sub>, DBO<sub>5</sub> igual a 12 308 mg/l O<sub>2</sub>. Posterior al diagnóstico se definieron las variables del método de electrocoagulación: pH, densidad de corriente, temperatura, material de los electrodos y tiempo de reacción. Se realizó dos experimentaciones, para la primera experimentación fue necesario hacer una prueba preliminar donde se evaluó el método de electrocoagulación en un tiempo de 15 y 60 minutos con un voltaje de 2V, esto con el fin de identificar si para remover la carga contaminante de los vertimientos de PMP es suficiente este tiempo, el resultado de esta prueba preliminar no fue el esperado por esta razón se decide realizar la primera experimentación en un tiempo de 1, 2, 3, 4, 5 y 6 horas, con un voltaje de 2V y electrodos de hierro y aluminio, como resultado se obtuvo que el tiempo adecuado para la remoción de contaminantes de la empresa es 4 horas obteniendo una remoción mayor al 80% . Segunda experimentación donde se evaluó el método utilizando electrodos de hierro, un voltaje de 2,7V, 7,7V y 12,6V y un tiempo de 5, 15 y 30 minutos, se obtuvo como resultado que para un voltaje de 12,6 V y un tiempo de 30 min se removió más del 90% para los parámetros DQO, DBO<sub>5</sub>, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables y grasas y aceites. La celda de electrocoagulación para el caso particular, corresponde a una cuba electrolítica con capacidad para tratar un total de 2,2 L de agua residual, de 14 cm de largo, 11 cm de ancho y 18 cm de alto; con un total de 6 placas metálicas electrodos en forma de “T”, que actúan como

electrodos, de los cuales 3 son de hierro y 3 de aluminio, conectados a una fuente regulable de voltaje, con la que el porcentaje de remoción de cromo total obtenido es de 99,4%.

Suárez (2014) con su tesis “Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales provenientes de las descargas de un centro comercial de la ciudad de Quito mediante procesos de electrocoagulación y adsorción en carbón activado”, de la Escuela Politécnica Nacional, Suárez, Quito, Ecuador, tuvo como objetivo realizar un diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales provenientes de un centro comercial en la que se utilizaran electrocoagulación como tratamiento primario y para complementar el tratamiento adsorción en carbón activado para la remoción de los contaminantes, logrando cumplir con la ordenanza municipal 404 del Distrito Metropolitano de Quito para la descarga de efluentes líquidos. Como resultado se puede observar que para el ensayo con electrodos de aluminio se alcanzó la mayor remoción de la DQO (71 mg·L<sup>-1</sup>) al igual que la de sólidos suspendidos (101 mg·L<sup>-1</sup>). Para el ensayo con los electrodos de hierro se obtuvo una menor remoción de la DQO (340 mg·L<sup>-1</sup>) al igual que los sólidos suspendidos (150 mg·L<sup>-1</sup>). Para el ensayo en el que se utilizó los electrodos de hierro y aluminio se obtuvieron resultados de remoción altos para la DQO (96 mg·L<sup>-1</sup>) y sólidos suspendidos (126 mg·L<sup>-1</sup>). De este ensayo se nota con esta que las remociones alcanzadas están entre las obtenidos usando solo aluminio hierro. Concluyendo que Se alcanzó remociones de la DQO (90%) y sólidos suspendidos (56%) en 30 minutos, en los ensayos de electrocoagulación con una densidad de corriente de 12,5 A·m<sup>-2</sup> y una distancia entre los electrodos de 1,5 cm. Sin necesidad de modificar el pH inicial del agua residual.

Prieto (2012) con su artículo científico “Electrocoagulación: una alternativa para depuración de lactosuero residual de la revista Universidad Nacional Autónoma de México”, con el objetivo de recopilar, la información de la aplicabilidad de la técnica de electrocoagulación en la remoción de agentes contaminantes en disoluciones acuosas, así como la potencialidad de ser aplicada en la reducción de las elevadísimas cargas orgánicas que presenta el suero derivado de la industria láctea en la elaboración de quesos. Se hace una revisión de la electrocoagulación, discutiendo los retos y oportunidades de esta

tecnología, presentando su potencial de aplicación, además de sus ventajas y, finalmente, se plantean los mecanismos de reacción y el diseño y operación de los reactores. El presente trabajo concluye al recopilar la información más relevante y de actualidad acerca de la factibilidad de aplicaciones de la técnica de electrocoagulación (EC) en la remoción de agentes contaminantes en disoluciones acuosas. También se ha encontrado información acerca de la potencialidad de la EC para ser aplicada en la reducción de las elevadísimas cargas orgánicas que presenta el suero derivado de la industria láctea en la elaboración de quesos.

### 2.1.2 A nivel nacional

Cueva y Pereda (2020) en el trabajo de investigación denominado “Efecto del amperaje y tiempo del proceso de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales del camal de José Leonardo Ortiz”, de la Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo, con el objetivo, determinar la influencia del Amperaje y Tiempo del proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales del camal ubicado en José Leonardo Ortiz Chiclayo. Se aplicó el método de electrocoagulación a un total de 27 muestras de agua residual provenientes del Camal Municipal de José Leonardo Ortiz, utilizando celda electrolítica tipo Bach con electrodos de acero 304 (cátodo) y aluminio (ánodo), con variaciones de intensidad de corriente eléctrica de 8, 10 y 12 Amperios con tiempos de 20, 25 y 30 minutos; los datos obtenidos en los ensayos mencionados se analizaron para determinar la influencia del proceso. Obteniendo un tiempo y amperaje óptimo de 30 min a 12 Amperios, donde se logró una remoción de DQO de un 94.27%, DBO<sub>5</sub> de un 87.78 %, SDT de un 88.45%, Grasas y aceites de un 98.22% y Turbidez de un 90.06%, confirmando que el proceso de electrocoagulación disminuye notoriamente los parámetros de contaminación orgánicos.

Rivas y Rojas (2020) en el trabajo de investigación que desarrollaron titulado “Tratamiento de aguas residuales por el método de electrocoagulación del sistema PTAR de la laguna de estabilización”, de la Universidad Nacional “Pedro Ruíz Gallo San José, Lambayeque con el objetivo de evaluar el mecanismo de reacción de los efluentes con tratamientos más efectivos como es el método de electrocoagulación sobre la calidad de las aguas residuales del

Sistema PTAR en el Distrito de San José, Lambayeque; monitorear en el tiempo los parámetros físico-químicos y microbiológicos de las aguas residuales en los laboratorios EPSEL, Chiclayo, tratadas con electrólisis química, con el fin de monitorear algunos de los cambios fisicoquímicos, que ocurrirán en PTAR Aguas Residuales, luego de la aplicación del efecto, la relación entre los parámetros evaluados y estos con la calidad del agua. Entre los parámetros analizados tenemos: Temperatura, pH, Turbidez, Conductividad, Sólidos Sedimentables, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), Aceites y Grasas, Coliformes Termotolerantes. De acuerdo con la comparación en los resultados obtenidos antes y después del tratamiento, se observó la reducción eficiente de las partículas en suspensión presentes en las Aguas Residuales (materia orgánica), la claridad del efluente, la reducción de olores desagradables. Se pudo observar los cambios ocurridos en el transcurso de dicho proceso de tratamiento sobre los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de las aguas residuales. Conclusión, Se determinó los mejores parámetros de funcionamiento para el sistema de electrocoagulación los cuales fueron 5A, 60 min, el pH oscilo de 7.37 - 9.13. este valor depende del sistema de electrocoagulación mientras más tiempo y amperaje el pH se vuelve más alcalino. Se determinó la calidad del agua residual tratada por el sistema de electrocoagulación obteniéndose una disminución considerable de la mayoría de parámetros, La temperatura incremento esto se debe al mismo proceso, pero está dentro de los LMP, solo estando el pH fuera de rango respecto a los LMP en 0.5. Podemos notar que la turbiedad y conductividad tuvieron una considerable disminución respecto a su valorización inicial.

Alvino (2019) en el trabajo de investigación titulado “Eficiencia de la electrocoagulación a nivel de laboratorio para tratamiento del agua residual del matadero municipal de Tingo María”, de Universidad Nacional Agraria de la Selva, con el objetivo, determinar la eficiencia de la electrocoagulación a nivel de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales del matadero municipal de Tingo María. Llegando a las siguientes conclusiones: La electrocoagulación al usar 75 °C de temperatura, 5 A de intensidad de corriente y con tiempos de 10 y 15 min, logra una eficiencia en la remoción de la DBO<sub>5</sub> en 96.28% y 93.85% respectivamente. La electrocoagulación logra una



eficiencia en la remoción de ST en un 97.8%, al usar 75 °C de temperatura, 5 A de intensidad de corriente y 15 min de tiempo. La electrocoagulación logra una eficiencia en la remoción de nitratos en un 70.2%, al usar 75 °C de temperatura, 5 A de intensidad de corriente y 15 min de tiempo. La electrocoagulación logra una eficiencia en la remoción de fosfatos en un 63%, al usar 75 °C de temperatura, 5 A de intensidad de corriente y 15 min de tiempo.

Baca (2019) en el trabajo de investigación titulado “Evaluación de un sistema de tratamiento continuo por electrocoagulación para los efluentes domésticos y su reúso en el riego de jardines y áreas verdes”, de Universidad Nacional del Callao, con el objetivo de diseñar el sistema de tratamiento por electrocoagulación para los efluentes domésticos generados en las viviendas, residencias u otras unidades familiares que permita su reúso en el riego de las áreas verdes y jardines de las propias viviendas, residencias u otras unidades familiares, y proponer el mismo para su implementación. Para ello se hace necesario, utilización de las técnicas analíticas de los Métodos Normalizados para análisis de agua potable y residual, diseñar y operar el Sistema de Tratamiento Continuo por Electrocoagulación, caracterizar los efluentes tratados, utilización de técnicas estadísticas y pruebas de hipótesis. Llegando a las siguientes conclusiones: Los resultados tienen que ver con las condiciones de operación, de modo que se tendrán mejores resultados para cuando se trabaje a mayor densidad de corriente como los realizados por Barboza (2011), 12.5 mA/cm<sup>2</sup> y 21 – 23 V, mientras el presente trabajo se realizó a una densidad de corriente de 4 mA/cm<sup>2</sup>, Amperaje de 20 A y Voltaje de 5 V. El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al<sup>+3</sup> o 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. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación como pH y temperatura.

Gamboa (2019) en el trabajo de investigación denominado “La electrocoagulación en relación a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) en aguas residuales”, el objetivo general de esta investigación fue Reducir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) de las aguas residuales del mercado

Ciudad de Dios en San de Juan Miraflores mediante la electrocoagulación. La Metodología de análisis estadístico es un diseño factorial es un tipo de experimento diseñado que permite estudiar los efectos que varios factores pueden tener en una respuesta. Los resultados que tuvieron en mayores porcentajes de reducción de la DBO<sub>5</sub> corresponden a una densidad de corriente de 50 Amp/m<sup>2</sup> y un tiempo de 30 min, para la carga mayor diluida. Los tratamientos del grupo C (TRAT-EC-03- TRAT-EC-04- TRAT-EC-08) obtuvieron un promedio de reducción de 88%, siendo el valor más alto el correspondiente al tratamiento “TRAT-EC-04” de combinación de valores tiempo de reacción a 20 minutos y una densidad de corriente de 50, concluye: El valor inicial de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) fue de 1725mg/Lt, el cual se redujo en el grupo D hasta 100.70 mg/Lt, que representa una eficiencia de reducción del 94%. La densidad de corriente óptima es de 50 Amp/m<sup>2</sup>, con respecto a la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>). El tiempo de reacción óptimo es de 30 minutos, determinado que el mayor tiempo de reacción aumentara la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>). Los residuos líquidos obtenidos de los procesos del desangrado, escaldado, pelado, lavado y eviscerado, aumenta significativamente la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), influyendo de manera significativamente en el tratamiento de electrocoagulación.

Paitan y Sifuentes (2018) con el proyecto de investigación titulado “Remoción de contaminantes de aguas residuales de un matadero de equinos por el método de electrocoagulación a nivel de laboratorio”, con el objetivo de evaluar la influencia de la densidad de corriente y el tiempo de exposición, en las características fisicoquímicas del agua residual tratada de un matadero de equinos por electrocoagulación. El método para el cálculo de la Demanda Bioquímica de Oxígeno fue el método respirométrico recomendado por American Public Health Association [A.P.H.A] (2014). Los porcentajes de remoción que reportan los análisis de DBO<sub>5</sub> de las aguas residuales de matadero tratadas por electrocoagulación se ve que a medida que se incrementa la densidad de corriente y el tiempo de operación va aumentando el % de reducción del DBO<sub>5</sub> hasta un 96,8 %. La investigación llegó a las siguientes principales conclusiones: La densidad de corriente y el tiempo de

exposición influyen en las características fisicoquímicas del agua residual de matadero de equinos, donde al incrementar la densidad de corriente y el tiempo en el proceso de electrocoagulación aumenta el porcentaje de remoción de contaminantes en más de 90 %. La densidad de corriente que obtuvo una mayor reducción de contaminantes en las características fisicoquímicas de agua recuperada en el proceso de electrocoagulación de residuos hídricos de matadero de equinos fue de 33.88A/m<sup>2</sup>. El tiempo de exposición con una mayor reducción de contaminantes en las características fisicoquímicas de agua recuperada en el proceso de electrocoagulación de residuos hídricos de matadero de equinos fue de 30 minutos.

Cisneros (2017) en el trabajo de investigación denominado “Uso de la tecnología de electrocoagulación para el tratamiento de efluentes de camal avícola a nivel de laboratorio, SJL 2017”, con el objetivo de evaluar el uso de la tecnología de electrocoagulación en el tratamiento de efluente de camal avícola a nivel de laboratorio, SJL 2017. Los métodos de análisis fueron normalizados para cada tipo de prueba estos se tendrán que llevar a cabo en el transcurso de una semana ya que se está trabajando con muestras de alto contenido orgánico. Como resultados de DBO<sub>5</sub> obtenidos al aplicar los tratamientos de electrocoagulación, como se observa la muestra sin tratamiento presenta 4 839,29 mg/L de DBO<sub>5</sub> luego de aplicar los tratamientos se observa que, en el tratamiento 8 (253010) en la cual se utilizó 25 voltios con una concentración 10 mg/L por 30 minutos de operación, el valor de DBO<sub>5</sub> desciende a 1 139,03 mg/L. la investigación llegó a las siguientes principales conclusiones: el uso de la tecnología de electrocoagulación es un proceso óptimo y aplicable en el tratamiento de efluente de camal avícola ya que se reduce considerablemente contaminantes contenidos en el efluente de camal avícola, el voltaje estimado fue de 25 voltios para el tratamiento de efluente de camal avícola a nivel de laboratorio ya que con esta medida se logra obtener mayor porcentaje de remoción en los parámetros físicos y químicos del efluente, el tiempo de operación fue de 30 minutos para el tratamiento de efluente de camal avícola a nivel de laboratorio determinado por el mejor tratamiento el cual fue el tratamiento número 8.

Aguilar (2015) con su tesis “Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua”, de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú con el objetivo, determinar la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de aguas. Se llegó a los resultados buenos llegándose a reducirla hasta 17 UNT en un tiempo de 15 minutos. La eficiencia promedio obtenida con el proceso de electrocoagulación fue del 97% en la remoción de turbiedad. Concluye en su investigación en base a los resultados obtenidos al realizar el tratamiento del efluente con electrocoagulación, se determinó una eficiencia promedio del 87 % en la remoción de la DQO. Estos valores óptimos de operación se obtuvieron con una intensidad de corriente  $I = 5$  Amperios, con el pH natural del efluente de 7,12 y un tiempo de tratamiento de 15 minutos, con lo cual se cumple la normativa ambiental vigente en el país. Otro aspecto importante observado en este estudio fue la calidad del lodo producido en el tratamiento, de aspecto mucho más compacto que un lodo físico químico o biológico (Ascon y Alejandro 2015).

Camarena (2014) con su tesis titulada “Sistema de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales urbanas del anexo de Cajas Chico – La Ribera – Huancayo”, de la Universidad Alas Peruanas, Huancayo, Perú con el objetivo, diseñar un sistema de tratamiento por electrocoagulación de aguas residuales domesticas provenientes del anexo de Cajas Chico en el distrito la Rivera – Huancayo, departamento de Junín, para este propósito se tuvieron que encontrar las condiciones óptimas de operación previa caracterización de las aguas residuales. La metodología utilizada en el estudio se realizó mediante la experimentación en un sistema construido para este propósito a nivel de prototipo con una capacidad de 3 litros hecho de fibra de vidrio, para tratar las aguas residuales descritas mediante el proceso denominado electrocoagulación, que permitió depurar el agua en cuanto a su carga orgánica y turbidez. Los resultados encontrados fueron que se obtuvo un 75.08% de remoción de carga orgánica para tal efecto evaluó en función a la DQO, también se obtuvo un porcentaje de remoción de turbidez del 96.09%, estos datos fueron procesados con el software estadístico SPSS 20.0 para finalmente validarlos estadísticamente aceptando con un 95% de confianza la hipótesis de la investigación planteada en el inciso 1.5, para la variable porcentaje de

remoción de carga orgánica y con un 99% de confianza para la variables porcentaje de remoción de turbidez.

Riccio (2010) con su tesis “Remoción de aceites y grasas de aguas residuales de la universidad nacional del centro del Perú, por electrocoagulación, a nivel de laboratorio”, de la Universidad Nacional de Trujillo con el objetivo de eliminar los aceites y grasas de las aguas residuales de la Universidad Nacional del Centro del Perú, en cuya caracterización se encontró que tiene elevada carga orgánica puesto de manifiesto en su DBO<sub>5</sub> que alcanza 1 647.0 mg/L, una DQO de 4 436.8 mg/L, sólidos totales en 3 716 mg/L y una importante concentración de aceites y grasas de 1 600 mg/L. los métodos utilizados fueron métodos normalizados. Los resultados mostraron que para niveles altos de trabajo (+ +), densidad de corriente de 20 A y distancia entre electrodos de 3 cm, se consiguen los más altos porcentajes de remoción de aceites y grasas. Esta tesis concluye que Se logró remover los aceites y grasas de las aguas residuales de la Universidad Nacional del Centro del Perú, utilizando el proceso de electrocoagulación, en un 93.9 %, con una densidad de corriente de 20 A/m<sup>2</sup>, 3 cm de distancia entre electrodos, y un tiempo de 60 minutos.

### 2.1.3 A nivel local

Farfán (2019) con su tesis de maestría titulado “Influencia de la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico sobre la remoción de plomo por electroremediación de relave de la empresa minera paredones”, de la Universidad Nacional de Huancavelica con el objetivo de tratar los suelos contaminados, y eliminar metales pesados, como el plomo presente en relaves de mina de la empresa minera Paredones. Para la remoción de este metal pesado, se hizo uso del proceso de electroremediación, colocando como variables en este proceso la densidad de corriente de 10, 20 y 30 mA/cm<sup>2</sup> y con concentraciones de ácido oxálico de 5, 10, 15 mol/L y con un tiempo de residencia de 24 horas como mínimo y según antecedentes. Se realizaron mediciones de pH, entre la distancia de los electrodos, observando que el pH se incrementa del ánodo hacia el cátodo, considerando una distancia de 10 cm entre ambos. De los resultados obtenidos se concluyó que la eficiencia máxima en la remoción de metal pesado de Pb, presentes en relave fue del 83.77%, con variables de 30 mA/cm<sup>2</sup> densidad de corriente y de ácido oxálico al 15M, y por

último el análisis estadístico confirma que la variable de mayor influencia en el presente proceso de tratamiento de suelo, fue la densidad de corriente.

## 2.2 Bases teóricas

### 2.2.1. Teoría del tratamiento de aguas residuales

Desde el punto de vista de Metcalf y Eddy (2005) las aguas residuales recogidas en comunidades y municipios deben ser conducidas, en última instancia, a cuerpos de aguas receptores o al mismo terreno. La compleja pregunta de qué contaminantes contenidos en el agua residual y a qué nivel deben ser eliminados de cara a la protección del entorno, requiere una respuesta específica en cada caso concreto. Para establecer dicha respuesta es preciso analizar las condiciones y necesidades locales en cada caso, y aplicar tanto los conocimientos científicos como la experiencia previa de la ingeniería, respetando la legislación y las normas reguladoras de la calidad del agua existente. Aunque la captación y drenaje de aguas pluviales datan de tiempos antiguos, la recogida de aguas residuales no aparece hasta principios del siglo XIX, mientras que el tratamiento sistemático de las aguas residuales data de finales del siglo pasado y principios del presente. El desarrollo de la teoría del germen a cargo de Koch y Pasteur en la segunda mitad del siglo XIX marco el inicio de una nueva era en el campo del saneamiento. Hasta ese momento se había profundizado poco en la relación entre contaminación y enfermedades, y no se había aplicado al tratamiento de aguas residuales la bacteriología, disciplina entonces en su inicio. Las operaciones unitarias son aquellos métodos de tratamiento en los que predominan los fenómenos físicos, mientras que aquellos métodos en los que la eliminación de los contaminantes se realiza en base a procesos químicos o biológicos se conoce como procesos unitarios. En la actualidad, las operaciones y procesos unitarios se agrupan entre sí para constituir así los llamados tratamiento primario, secundario y terciario (o tratamiento avanzado) (pp. 16-17).

### **Naturaleza cambiante de las aguas residuales**

Metcalf y Eddy (2005) el número de compuestos orgánicos que se han podido sintetizar desde principios del siglo pasa hoy en día del medio millón, y aparecen unos 10.000 compuestos cada año. Estos compuestos aparecen en las aguas residuales de la mayoría de los municipios y comunidades. Hoy en

día es de gran importancia para los sistemas de recogida y tratamiento de las aguas residuales la presencia en las mismas de compuestos orgánicos volátiles (COV) y compuestos orgánicos volátiles tóxicos (COVT). En las redes de alcantarillado y en las plantas de tratamiento también es importante el control de los olores y, en particular, el control de la generación de sulfuro de hidrogeno. Parte del incremento en la generación de sulfuro en las redes de alcantarillado se atribuye a la considerable reducción de la cantidad de metales presentes en los residuos industriales, consecuencia a su vez de la implantación de un programa efectivo de pretratamiento y control de los vertidos de origen industrial previo a la descarga a las redes de alcantarillado municipales (p .21).

#### 2.2.2. Agua residual industriales

Son aquellas que resultan del desarrollo de un proceso productivo, incluyéndose a las provenientes de la actividad minera, agrícola, energética, agroindustrial, entre otras (Ryder, 2017).

#### 2.2.3. Aguas residuales de industrias cárnicas

Se incluyen entre estas industrias los mataderos y las plantas trasformadoras de embutidos, fiambres, conservas, etc. Algunas de las características de este sector influyen directamente sobre las posibilidades de tratamiento de sus vertidos. Siempre que sea posible es preciso extremar al máximo la separación previa de los contaminantes pues en caso de que estos se incorporen a las aguas, proporcionan valores muy altos de la DBO<sub>5</sub>. Este es por ejemplo el caso de la sangre cuyo vertido parcial puede llegar a ser del orden de los 30 000 mg/L de DBO<sub>5</sub>. Las grasas y sólidos pueden separarse antes de proceder al tratamiento propiamente dicho. Los productos incorporados a las aguas son orgánicos con alto contenido de nitrógeno, pero biodegradables (Paitan y Sifuentes, 2018).

**Tabla 1***Características de las aguas residuales en industrias cárnicas*

Industria	Volumen	DBO <sub>5</sub> mg/l	ST mg/l	Grasas mg/l
	l/kg peso en camal			
Mataderos	4 - 7	650 - 2200	930 - 3000	200 - 1000
Plantas de empaquetamiento	6 - 29	400 - 3000	230 - 3000	200 - 1000
Plantas de proceso	8 - 33	200 - 800	200 - 800	100 - 300

*Nota.* Tomado de Paitan y Sifuentes (2018).

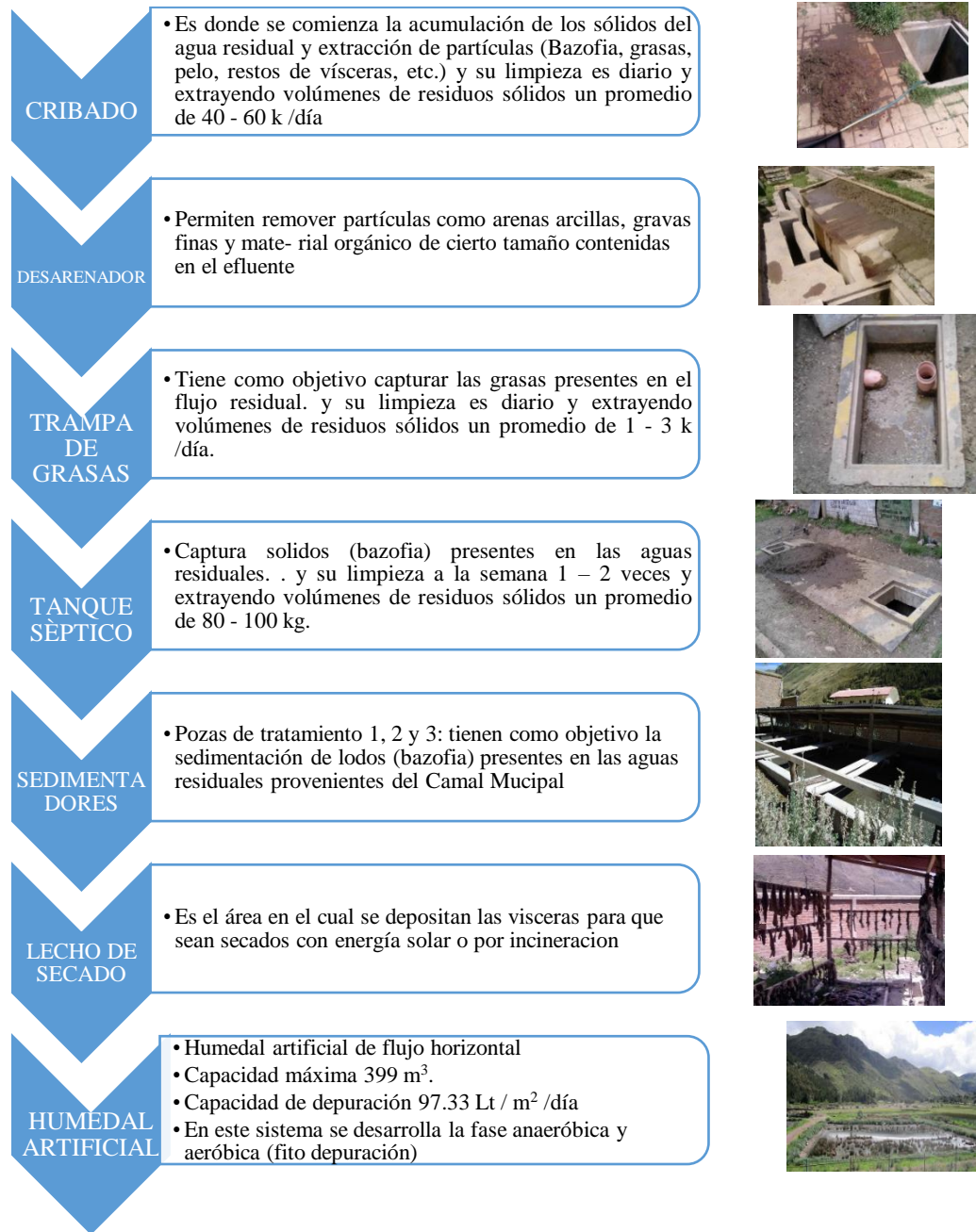
**Aguas residuales del camal municipal**

El camal Municipal de Huancavelica, ubicado en el distrito de Huancavelica; Centro Poblado: Chuñuranra tiene una Planta de Tratamiento de Agua Residual, el cual tiene las siguientes operaciones y procesos unitarios:



**Figura 1**

*Procesos unitarios del camal municipal*



El sistema de tratamiento tiene varias deficiencias en el diseño de las operaciones y procesos unitarios como son el dimensionamiento incorrecto de estos. Ya que a la fecha la cantidad de animales que se mata al día viene aumentado debido a la mayor demanda y crecimiento de la población en la ciudad de Huancavelica.

El camal municipal de Huancavelica tiene una zona importante, dedicada a bovinos y a porcinos; cada una está conformada por las siguientes etapas:

- **Recepción y almacenamiento de los animales en corrales:** Lugar donde encierran con anticipación a los animales para su posterior sacrificio e inspección ante - mortem.
- **Matanza:** en esta etapa el animal pierde la conciencia y queda inmovilizado (con puntilla).
- **Sangría:** La muerte del animal se provoca mediante un corte en las arterias del cuello.
- **Desollado:** Se corta la cabeza y cuernos del animal procediendo a la separación del tejido subcutáneo.
- **Faenado:** Corte longitudinal en el pecho para extraer vísceras.
- **Procesamiento final:** Las carnes se cortan, clasifican y preparan para distribución y despacho.
- **Limpieza y desinfección de maquinaria y lugares de trabajo:** Se efectúa diariamente al finalizar la jornada.

Estas actividades generan una gran cantidad de desechos sólidos y líquidos provenientes del efluente del sacrificio de los animales. Esta carga de contaminantes del agua residual del camal municipal se puede reducir realizando un mejor tratamiento de estas aguas residuales.

#### 2.2.4. Tratamiento de aguas residuales

Las tecnologías de tratamiento de aguas residuales podrían clasificarse en tres grupos principales: procesos físicos, químicos o biológicos; Ejemplos de operaciones unitarias de cada categoría podemos observar en la siguiente ilustración. Una planta de tratamiento de aguas residuales típica consiste en una combinación de operaciones de unidades físicas, químicas y biológicas para apuntar a la eliminación de diferentes componentes contaminantes. Las operaciones de la unidad física dependen exclusivamente de la separación física de los contaminantes de aguas residuales sin causar un cambio significativo en las características químicas o biológicas del agua tratada.

Los procesos químicos se denominan procesos aditivos, ya que requieren la adición de productos químicos para reaccionar con los contaminantes deseados y eliminarlo. La naturaleza aditiva de los procesos químicos los hace

menos atractivos en comparación con otros procesos, ya que aumentar los componentes netos disueltos en las aguas residuales y hacer que poco práctico para reutilizar en otras aplicaciones. Procesos biológicos unitarios utilizar microorganismos para la biodegradación de contaminantes en aguas residuales, y el objetivo principal de estos procesos es reducir el Contenido orgánico y nutrientes en las aguas residuales. Las unidades biológicas son generalmente clasificadas en aeróbico, anaeróbico o facultativo dependiendo sobre la disponibilidad de oxígeno disuelto en aguas residuales (Moussa et al., 2017).

**Figura 2**

*Clasificación de operaciones unitarias típicas en las PTAR*

Physical processes	Chemical Procoesses	Biological Processes
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Screening</li> <li>• Floatation</li> <li>• Filtration</li> <li>• Sedmintation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coagulation/Flocculation</li> <li>• Chlorination</li> <li>• Adsorption</li> <li>• Ion exchange</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trickling filters</li> <li>• Aerated lagoons</li> <li>• Activated sludge</li> <li>• Rotating biological contactors</li> </ul>

*Nota.* Tomado de la Revista Universidad EAFIT (2007).

Durante las últimas dos décadas, tecnologías electroquímicas de tratamiento de aguas residuales comenzaron a recuperar la importancia como una opción ecológica que genera lodo mínimo, no requiere aditivos químicos y huella mínima sin comprometer la calidad del tratamiento agua (Moussa et al., 2017).

## **Tratamiento de agua residuales por electrocoagulación**

### ***Electrocoagulación***

La electroquímica es una tecnología que en las últimas décadas ha tenido muchas aplicaciones industriales y se ha desarrollado rápidamente ofreciendo varias alternativas que compiten ventajosamente con distintos procesos (Ninan y Zambrano, 2019).

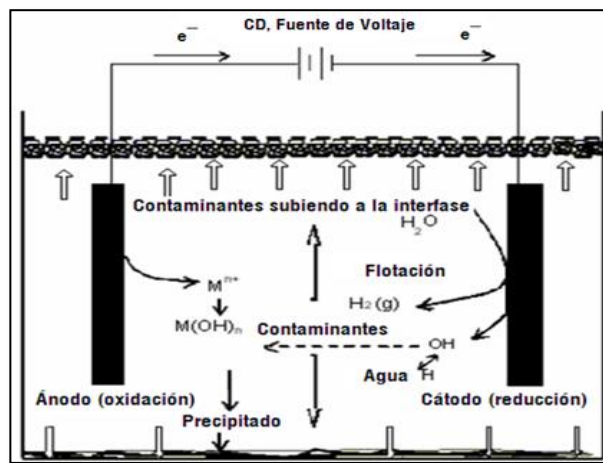
Los efluentes líquidos de diferentes procesos industriales se han tratado por electrocoagulación obteniendo resultados alentadores en la remoción de contaminantes, hecho que ha despertado el interés de la industria por investigar e implementar esta tecnología en el tratamiento de sus aguas residuales. Tradicionalmente los contaminantes presentes en las aguas residuales han sido eliminados por coagulación química, mediante la adición

de agentes químicos que propician la neutralización de las cargas de partículas que se encuentran suspendidas o en forma coloidal, dando como resultado la disminución de las repulsiones entre partículas, que son aglomeradas para su posterior precipitación (Quispe, 2015).

La electrocoagulación es una alternativa a la coagulación química. En los procesos electrolíticos el coagulante se forma por las reacciones de óxido reducción que ocurren entre los electrodos y el medio acuoso y son promovidas por la corriente eléctrica.

### Figura 3

*Modelo de una celda de electrocoagulación, reactor batch*



*Nota.* Tomado de la Revista Universidad EAFIT (2007).

La celda electroquímica para realizar 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 (Niño et al., 2013).

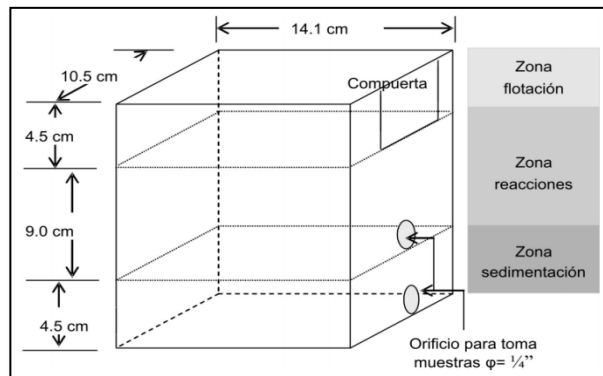
- El volumen de la celda ocupada por los electrodos se define como zona de reacción, en esta se dan los procesos de desestabilización de partículas, coagulación y sedimentación. Los lodos formados pueden depositarse en la parte superior de la celda cuando su densidad es baja o precipitar cuando su densidad es alta, para luego ser removidos.
- El reactor tipo Batch es un reactor donde no existe flujo de entrada ni de salida, es simplemente un reactor con un agitador que

homogeneiza la mezcla. Es esencialmente un tanque en el que se ha permitido que ocurra una reacción.

- El reactor tipo batch tiene importancia a nivel de laboratorio ya que permite el estudio del proceso y los parámetros a ser controlados.

#### **Figura 4**

*Zonas de una celda de electrocoagulación*



*Nota.* Tomado de la Revista Universidad EAFIT (2007).

#### **Procesos en la electrocoagulación**

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 (Mejía et al., 2012).

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 (Mejía et al., 2012).

Para Ruíz (2014) 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 (p. 85).

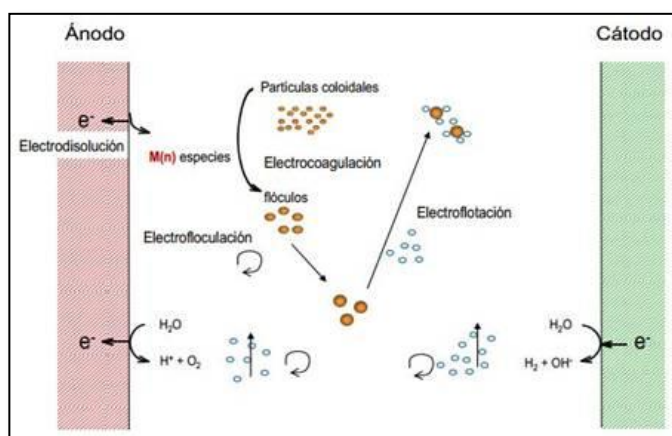
Las reacciones más importantes que pueden sufrir las partículas de contaminantes son:

- Hidrólisis, electrólisis, reacciones de ionización, formación de radicales libres.

Estas reacciones cambian las propiedades del sistema agua contaminantes, que con lleva a la eliminación de la carga contaminante del agua (Mejía et al., 2012).

## Figura 5

*Reacciones en el proceso de electrocoagulación*



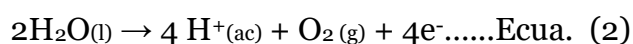
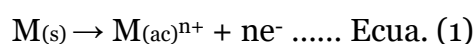
*Nota.* Tomado de la Revista Universidad EAFIT (2007).

## Reacciones en el proceso de electrocoagulación

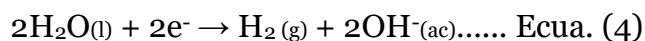
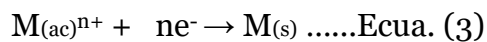
Los metales más comúnmente utilizados como electrodos en la electrocoagulación son hierro y aluminio porque ambos metales generan hidróxidos insolubles probados extensamente como agentes coagulantes de una gran variedad de componentes del agua natural. Por esta razón se tratarán de manera especial las reacciones que se desarrollan manteniendo electrodos de aluminio en la celda (Ruíz, 2014).

### Sea un metal “M”:

*En el ánodo se presentan las siguientes reacciones de oxidación*



*En el cátodo se presentan las siguientes reacciones de reducción:*

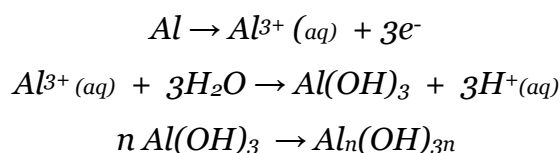


### Reacciones en el aluminio

La disolución del ánodo produce especies como  $Al^{3+}$ ,  $Al(OH)_3$  los cuales producen espontáneamente los respectivos hidróxidos o polihidróxidos; estos dependen del pH de la solución iónica. Los hidróxidos y polihidróxidos formados en estas reacciones electroquímicas tienen una gran afinidad por partículas dispersas e iones, lo que permite la coagulación. Y los gases formados son los que realizan la flotación del material coagulado (Mejía et al., 2012).

#### Formula general:

##### En el ánodo:



##### En el cátodo:



Los iones  $Al^{3+}$  en combinación con los  $OH^{-}$  reaccionan para formar algunas especies monoméricas como  $Al(OH)^{2+}$ , y otras poliméricas tales como  $Al_6(OH)^{153+}$ ,  $Al_7(OH)^{144+}$ ,  $Al_8(OH)^{204+}$ ,  $Al_{13}O_4(OH)^{247+}$  y  $Al_{13}(OH)^{345+}$  que por procesos de precipitación forman el  $Al(OH)_3(s)$ , como se muestra en la reacción de ánodo. El  $Al(OH)_3(s)$  es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso (Mejía et al., 2012).

### Cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio

Para el proyecto en mención se optó por realizar el proceso de electrocoagulación con placas de aluminio ya que en la investigación realizada por (Piña-Soberanis et al., 2011) menciona que aluminio como ánodo de sacrificio sigue siendo el mayormente utilizado para el tratamiento de aguas residuales.

**Tabla 1**

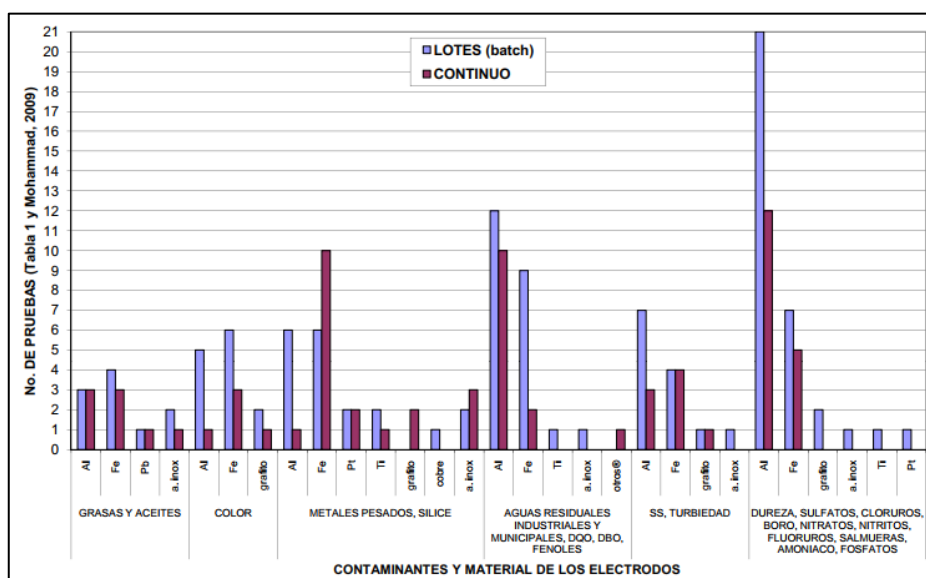
*Estudios según el tipo de contaminante, material y tipo de flujo*

Tipo	Contaminante		Material de electrodos		
	Orgánico	Inorgánico	Hierro	Aluminio	Otros
Lotes (batch) (%)	29.8	36.2	21.4	28.6	17.9
Continuo (%)	17	17	7.1	12.5	12.5

*Nota.* Tomado de la Revista Mexicana de Ingeniería Química (2011).

**Figura 6**

*Contaminante removido según el material y tipo de flujo*



*Nota.* Tomado de la Revista Mexicana de Ingeniería Química (2011).

## Operaciones en las celdas de electrocoagulación.

### 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 (Yauri, 2010, p.23).

### Desgaste de electrodos

El desgaste de material está directamente relacionado con la corriente aplicada al sistema (amperaje) y el tiempo del agua residual en la celda de electrocoagulación. Se estima un mínimo reemplazo de los electrodos de una a dos veces por año (Yauri, 2010).



## **Condiciones de operación**

El sistema de electrocoagulación puede funcionar de forma automática, mediante controles electrónicos que regulan la corriente y el voltaje, de acuerdo con los cambios en la calidad del agua residual a tratar, dados por su resistividad (Coronel y Vera, 2013).

## **Producción de lodos**

La generación o producción de lodos está directamente relacionado con el nivel de contaminación del agua residual y de las especies catiónicas (aluminio, hierro) que se disuelven en el agua de acuerdo con 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 aluminio o hierro) con un nivel de humedad entre 97 a 99% (Coronel y Vera, 2013).

En realidad, las condiciones de operación de un sistema de electrocoagulación son altamente dependientes de las condiciones químicas del medio acuoso, especialmente de la conductividad y el pH, pero también influyen el tamaño de partículas, el tipo de electrodos, el tiempo de residencia en el reactor, el espaciamiento entre los electrodos y la concentración de los contaminantes. El tratamiento general de las aguas residuales requiere aplicaciones bajas de voltaje, generalmente de 50 Volts, con amperaje variable, de acuerdo con las características químicas del agua (Yauri, 2010).

## **Factores que afectan la electrocoagulación**

Los factores tienen mayor influencia sobre el proceso y son:

- **pH:** El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar. El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. En contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer y,

dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso (Mejía et al., 2012).

- **Densidad de corriente:** El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio  $\text{Al}^{3+}$  o iones hierro  $\text{Fe}^{2+}$  liberados por los respectivos electrodos. 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 (Ruíz, 2014).

En general un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante. Una densidad de corriente demasiado grande producirá una disminución significativa de la eficacia. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación, como pH y temperatura (Ruíz, 2014).

#### **Formula de densidad de corriente ( $\delta$ ):**

$$\delta = \frac{I}{S} \left( \frac{\text{Amp}}{\text{m}^2} \right)$$

#### **Donde:**

- $\delta$  = densidad de corriente
- S = superficie de contacto
- I = intensidad de corriente

Para Gamboa (2019):

La intensidad de corriente es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la resistencia, por lo tanto, para mantener una densidad de corriente constante se fijará como constante el amperaje esto demanda regular el voltaje para mantener la intensidad de corriente constante (p. 44).

La energía eléctrica que se suministra a la celda electroquímica puede ser mediante corriente alterna (CA) o bien como corriente directa (CD). cuando se suministra corriente directa se produce en el cátodo una impermeabilización, lo que causa una menor eficiencia en la remoción.

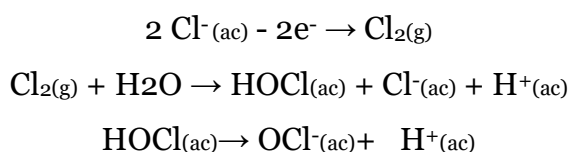
## **Conductividad**

Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. La adición de algunos electrólitos tales como NaCl o  $\text{CaCl}_2$  genera un aumento en la conductividad del agua residual (Mejía et al., 2012).

### **Presencia de NaCl.**

La sal aumenta la conductividad del agua residual. Se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{=}$ , pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos que aumentaría el potencial entre éstos, decreciendo así la eficiencia de la corriente. Se recomienda, sin embargo, que para un proceso de electrocoagulación normal se mantenga cantidades de  $\text{Cl}^-$  alrededor del 20% (Ruíz, 2014).

La presencia de sal también ayuda a disminuir el consumo de energía al aumentar la conductividad y, además, cuando hay cloruros en el agua se puede presentar las reacciones siguientes en presencia de una corriente eléctrica, lo que favorece la desinfección:



## **Temperatura**

Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente se incrementa inicialmente hasta llegar a  $60^\circ\text{C}$ , punto donde se hace máxima para luego decrecer. El incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuido al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo (Ruíz, 2014).

## **Ventajas y desventajas de la electrocoagulación**

### **Ventajas:**

- 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.

### **Desventajas:**

- 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 (Quispe, 2015).

## **Reactor para la electrocoagulación**

### **Reactor tipo Batch**

Está formado por una celda electroquímica con un ánodo y un cátodo dispuestos en forma vertical y conectada a una fuente de energía externa. (Lecca y Lizama, 2014).

El material anódico se corroe eléctricamente debido a la oxidación, mientras que el cátodo permanece pasivo.

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

El sistema para la electrocoagulación requiere de una fuente de corriente directa, un regulador de densidad de corriente y de un multímetro para leer los valores de corriente.

- Dependen del contaminante a tratar.
- Dependen de la concentración de contaminante.
- El volumen de operación

### **Configuración monopolar**

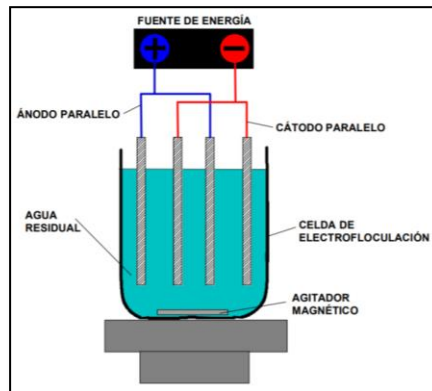
Los electrodos están conectados y sometidos al mismo potencial, lo cual genera mayor gasto de energía.

#### **En Paralelo**

En la disposición monopolar en paralelo la corriente eléctrica se reparte entre todos los electrodos en relación a la resistencia de las células individuales (Ascon y Alejandro, 2015).

**Figura 7**

*Configuración monopolar conectado en paralelo*



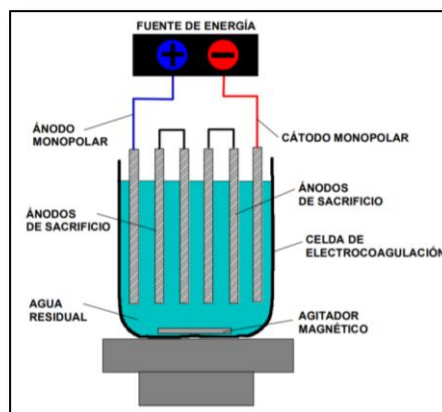
*Nota.* Tomado de Mollah et al. (2001).

### **En Serie**

Los electrodos monopolares disponen que cada par de electrodos de sacrificio está conectado internamente uno con el otro, y no tiene interconexiones con los electrodos externo. Se requiere una diferencia de potencial más alto se requiere para una corriente dada porque las células conectadas en serie tienen una mayor resistencia (Ascon y Alejandro, 2015).

**Figura 8**

*Configuración monopolar en serie*



*Nota.* Tomado de Mollah et al. (2001).

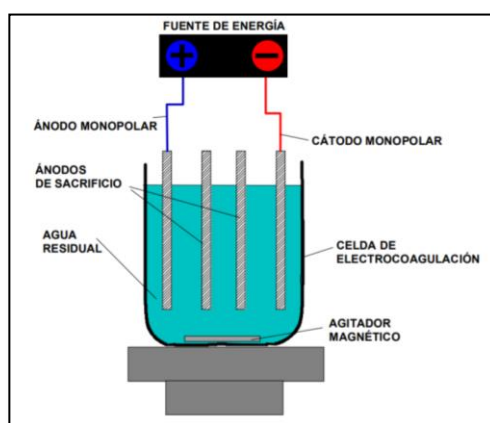
### **Configuración bipolar**

Estas celdas trabajan a menor intensidad y mayor voltaje que la monopolar y tienen la ventaja de la sencillez de su disposición, ya que sólo es necesaria la conexión de dos electrodos (electrodos alimentadores), y por tanto el espacio entre los electrodos puede ser más pequeño. Sin embargo, el elevado potencial

entre los electrodos alimentadores también origina que una parte de corriente fluya a través de la disolución causando un bypass de corriente a los electrodos bipolares y produciendo por tanto pérdidas de corriente, lo que debe ser tenido en cuenta a la hora de prever el efecto sobre la producción y el tiempo de vida de electrodos (Ascon y Alejandro, 2015).

### Figura 9

*Configuración bipolar conectado en paralelo*



*Nota.* Tomado de Mollah et al. (2001).

### Parámetros estudiados

Los parámetros que tuvimos como indicador del efluente del camal municipal del distrito de Huancavelica, fueron:

#### **Demanda biológica de oxígeno**

Se usa como una medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidación de la materia orgánica biodegradable, presente en la muestra de agua, como resultado de la acción de oxidación aerobia.

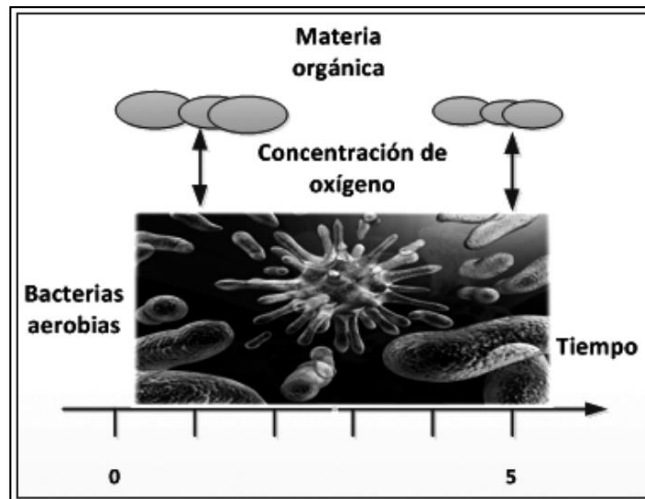
En condiciones normales de laboratorio, la  $DBO_5$  se determina a una temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  en un tiempo de 5 días, siendo expresado en  $\text{mg/l O}_2$  y es conocido como  $DBO_5$ .

Este procedimiento fue adoptado en 1936 por la Asociación Americana de Salud Pública, y desde entonces ha permanecido como un indicador de la contaminación.

La  $DBO_5$  es uno de los indicadores más importantes en la medición de la contaminación en aguas residuales, como también en el control del agua potable (Lecca & Lizama, 2014).

## Figura 10

### Configuración de oxígeno residual



*Nota.* Tomado de Revistas UNMSM (2010).

Las bacterias aerobias requieren de oxígeno para consumir la materia orgánica degradable presente en las aguas residuales. La cantidad consumida de oxígeno, se mide en la diferencia entre el oxígeno al principio y final de la prueba (ver figura 10).

Entre otras aplicaciones para la  $DBO_5$ , se mencionan:

- Medición de la calidad en las aguas superficiales y aguas residuales.
- Establecimiento de Límites Máximos Permisibles (LMP).
- Evaluación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales o PTAR.
- Diseño de unidades de tratamiento biológicos.

La  $DBO_5$  de cinco días, es la cantidad total de oxígeno consumida por los microorganismos durante los primeros cinco días de biodegradación.

En su forma más simple, la prueba  $DBO_5$ , es poner una muestra de residuo en una botella cerrada y medir la concentración de oxígeno disuelto (OD) en la muestra al principio de la prueba y al cabo de cinco días; la diferencia de OD dividida por el volumen de desperdicio (P) es  $DBO_5$  (Lecca & Lizama, 2014).

$$DBO_{final} = \frac{OD_{inicio} - OD_{final}}{P}$$



## Potencial de Hidrogeno

El pH es una medida de la acidez o basicidad de una solución. El pH es la concentración de iones o cationes hidrógeno  $[H^+]$  presentes en determinada sustancia (la sigla significa potencial de hidrógeno).

El pH se mide entre 0 a 14 en solución acuosa, siendo acidas las soluciones con pH menores de 7 y básicamente las mayores de 7. El pH igual a 7 indica la neutralidad de una sustancia. Las aguas naturales pueden tener pH ácido debido al  $SO_2$  y  $CO_2$  disueltos en la atmósfera,  $CO_3$  de los suelos calizos, porque provienen de los seres vivos o por el ácido sulfúrico procedente de algunos minerales. Las aguas contaminadas con zonas de descargas industriales pueden tener un pH muy ácido (Choque & Daysee, 2020).

Por definición pH es el logaritmo inverso de la concentración de ión hidrogeno. La medida del pH tiene amplia aplicación en el campo de las aguas naturales y residuales. Es una propiedad básica e importante que afecta a muchas reacciones químicas y biológicas. Valores extremos de pH pueden originar la muerte de peces, drásticas alteraciones en la flora y fauna, reacciones secundarias dañinas (Choque & Daysee, 2020).

### 2.2.5. Normatividad para aguas residuales de camales

Ministerio del Ambiente en coordinación con los sectores correspondientes ha elaborado propuestas normativas correspondientes sobre Límites Máximos Permisibles:

- LMP de emisiones atmosféricas y efluentes para la industria siderúrgica.
- LMP de efluentes de infraestructura de residuos sólidos.
- LMP para efluentes de actividades agroindustriales tales como planta de camales y plantas de beneficio.
- LMP transversales de efluentes para todas las actividades del sub sector industria.

**Tabla 2***LMP para efluentes de actividades agroindustriales*

	<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>LMP</b>	<b>Método de ensayo</b>
I	<b>Generales</b>			
1	pH	-	6,0 – 9,0	APHA 4500-H+ - B, págs. 4-90 a 4-94, 21. <sup>a</sup> edición. 2005
2	Sólidos suspendidos totales	mg/L	300	APHA 2540-D, págs. 2-58 a 2-59, 21. <sup>a</sup> edición. 2005
II	<b>Orgánicos</b>			
3	Demanda bioquímica de oxígeno -DBO <sub>5</sub> , 20 °C	mg/L	250	APHA ED. 21 TH. 2005 - AWWA WEF-5210 B,
4	Demanda química de oxígeno -DQO	mg/L	500	EPA 410.2.1999
III	<b>Inorgánico</b>			
5	Fosforo total	mg/L	40	Standard methods for the examination of water and wastewater, 21° Edition SM 4500-P-E. 2005
6	Nitrógeno total	mg/L	50	Standard Methods for the examination of water and wastewater, Ed. 21 cap. 4500 B B. 2005

*Nota.* Tomado de MINAM (2009).

Con la finalidad de controlar excesos en los niveles de concentración de sustancias físicas, químicas y biológicas presentes en efluentes o emisiones, para evitar daños a la salud y al ambiente, el Ministerio del Ambiente publicó el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, por el cual se aprueban los Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR), para el sector Vivienda Ambiental.

**Tabla 3***LMP para efluentes de PTAR*

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10,000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	unidad	6.5-8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mL/L	150
Temperatura	°C	<35

*Nota.* Tomado de MINAM (2009).

## 2.3 Bases conceptuales

### **Amperaje**

Cantidad de flujo de electrones o de corriente en un circuito eléctrico (Bauer, 2011).

### **Ánodo**

Es el electrodo hacia el cual fluye la corriente de electrones liberados por el cátodo (W.S.Hu, 2005) .

### **Cátodo**

Es un electrodo que produce la liberación masiva de electrones por efecto del calor. En la mayoría de las válvulas el cátodo se caldea para producir esta emisión termoiónica (W.S.Hu, 2005).

### **Coloide**

Suspensión de partículas diminutas de una sustancia, llamada fase dispersada, en otra fase llamada continua o medio de dispersión (NORMA OS.90, 2006).

## **Electrocoagulación**

La electrocoagulación es una técnica que se usa para tratar aguas residuales. Los contaminantes de muy diversos efluentes son removidos aplicando el principio de coagulación, pero en este caso no se hace uso de un coagulante químico. Podemos entonces definir la electrocoagulación como un proceso en el cual son desestabilizadas las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados (Arango, 2005).

## **Electrodo**

Los conductores eléctricos de metal o carbono sumergidos en electrolitos (Gilpavas, 2008).

## **Electrolito**

Es una sustancia que se disocia en agua o en otro disolvente apropiado, produciendo una disolución conductora de electricidad (Tippens, 2007).

## **Electroforesis**

Fenómeno de migración que presentan las partículas cargadas cuando se someten a la acción de un campo eléctrico (Tippens, 2007).

## **Iones**

Partícula cargada eléctricamente obtenida a partir de un átomo o grupo de átomos enlazados químicamente al añadir o eliminar electrones (Gammon & Ebbing, 2009).

## **Multiparametro**

El medidor portátil mide los parámetros de calidad del agua importantes sin la necesidad de tener que usar muchos instrumentos (Wilson, 2007).

## **Coagulación**

La coagulación es un paso de neutralización de carga que involucra el acondicionamiento de la materia suspendida, coloidal y disuelta al añadir coagulantes (Mihelcic y Zimmerman, 2019).

## **Floculación**

La floculación involucra la agregación de partículas desestabilizadas y la formación de partículas más grandes conocidas como flóculo (Mihelcic y Zimmerman, 2019).

## **Sedimentación**

La sedimentación es el proceso en el que la mayoría de las partículas se asentarán por la gravedad dentro de un tiempo razonable y se removerán. Las partículas con densidades más grandes de 1 000 kg/m<sup>3</sup> se asentarán finalmente, y las partículas con densidades menores a 1 000 kg/m<sup>3</sup> flotarán hacia la superficie del agua (Mihelcic y Zimmerman, 2019).

## **Flotación**

La flotación es lo opuesto a la sedimentación, usando flotabilidad para separar las partículas sólidas como grasas, aceites y lubricantes, lo cual no se conformaría por sedimentación. Las burbujas de aire se elevan hacia la superficie en donde son removidas por desnate (Mihelcic y Zimmerman, 2019).

## **Voltaje**

Medida que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico, entendido como presión eléctrica, fuerza electromotriz presión eléctrica gradiente de potencial y diferencia de potencial (Tippens, 2007).

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1 Ámbito de estudio

##### **Ámbito temporal**

La investigación comenzó el mes de abril del 2019 con el diseño de la cámara de electrocoagulación y respectivas pruebas piloto hasta el mes de setiembre. Por motivos de pandemia el COVID 19, no se pudo realizar las pruebas a escala de laboratorio en el año 2020. Las pruebas de tratamiento se realizaron a partir del mes de febrero al mes de abril de manera *insitu* las pruebas de pre-test y siendo enviadas las pruebas de post-test a laboratorio ALAB (Analytic Laboratory) de la ciudad de Lima en el año 2021.

##### **Ámbito espacial**

La recolección de muestras se realizó en el Centro Poblado de Chuñuranra, lugar donde se sitúa el camal Municipal de la localidad de Huancavelica, motivo de estudio de sus aguas residuales. Para el proceso y análisis de tratamiento a escala de laboratorio se acondiciono un lugar semejante a un laboratorio.

#### 3.2 Población y muestra

##### **Población**

La población en la investigación desarrollada fue el efluente del beneficio de animales del Camal Municipal de Huancavelica lo cual presenta un caudal promedio de 19500 l/día.

Se entiende por población o universo a la totalidad de elementos o unidades de análisis (Millones & Barreno, 2015).

##### **Muestra**

Las muestras para el tratamiento de electrocoagulación, fueron tomadas después del cribado, que es uno de los procesos que realizan para el tratamiento del efluente del Camal Municipal del Distrito de Huancavelica. Se requirieron 2 litros de muestra para cada tratamiento debido a las dimensiones de la cámara de

electrocoagulación a escala de laboratorio, se realizó 9 tratamientos, los cuales fueron posteriormente enviadas para su análisis al laboratorio ANALYTICAL LABORATORY E.I.R.L, optamos por este laboratorio debido a que se encuentra acreditado por INACAL (instituto nacional de calidad) y así acreditar nuestros resultados.

Las muestras son aquellas que se define como el listado de elementos, unidades de análisis, a partir del cual se seleccionó (Velázquez & Rey, 2013).

### **Muestreo**

El muestreo del agua residual para las pruebas experimentales fue no probabilístico y por conveniencia, también llamadas muestras dirigidas, suponen un procedimiento de selección orientado por las características de la investigación, más que por un criterio estadístico de generalización (Sampieri, 2014).

Esto debido a que el horario donde realizan las actividades donde generan mayor cantidad de aguas residuales en el camal municipal es desde las 8:00 am a 1:00 pm.

Los métodos de muestreo no probabilísticos, a diferencia de los probabilísticos, no permiten determinar el error de muestreo, no es posible determinar el nivel de confianza sobre la presentación de la muestra, y no permiten realizar inferencia sobre la población. El camal municipal de Huancavelica cuenta con una pequeña planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que sus aguas tratadas por el método convencional son vertidas al río Ichu sin ningún control alguno de acuerdo a las normas vigentes relacionadas a efluentes de PTAR.

### **3.3 Tipo, método y diseño de investigación**

#### **Tipo de Investigación**

De acuerdo con los propósitos inmediatos que persigue la investigación es de tipo “Básica”. Según Espinoza, (2014), tiene como propósito ampliar el conocimiento científico a partir de la observación del funcionamiento de los fenómenos de la realidad. Sus niveles son la descripción y explicación. (p. 43).

En estricto sentido la investigación pura o teórica permitirá ampliar los nuevos conocimientos planteados en la presente investigación.

## **Nivel de Investigación**

El nivel de investigación es de tipo explicativo. Según Niño (2017), tiene como objetivo responder a la pregunta ¿Por qué? Esta investigación intenta ir más allá de la investigación exploratoria y descriptiva para identificar las causas reales de un problema, que incluyen explicar las cosas en detalle y no sólo informar, construir y ampliar las razones detrás de la teoría (p. 34).

La Investigación permitirá identificar y cuantificar las causas de los efectos dentro del estudio de las variables de estudio y permitirá responder a las interrogantes formuladas en la investigación.

## **Método Científico**

Desde el punto de vista de Muñoz (2016), el método científico se reproduce y multiplica, pues estimula la creación y desarrollo de elementos para cuestionar y garantizar la validez de lo que pretende demostrar. Asimismo, incorpora constantemente nuevos elementos de juicio, pues está en permanente cuestionamiento. Así, cuando se resuelven las dudas o los cuestionamientos surgidos en su aplicación, los incorpora, perfeccionándose a sí mismo; de donde deriva que, al igual que la ciencia, su carácter sea progresivo (p. 91).

## **Método General**

El método experimental, garantiza llegar al verdadero conocimiento de la realidad. Para Ramírez (2009), el considera que el conocimiento debe partir de la observación de las características contenidas en ella, independientes de las opiniones que podamos formular, para ello hacemos uso de las reglas de la percepción, que nos permite, mediante el razonamiento, descubrir cómo son real y verdaderamente las cosas (p. 189).

## **Método Específico**

El método comparativo, consiste en la generalización empírica y la verificación de la hipótesis. La posibilidad de explicarlas o interpretarlas, perfilar nuevos conocimientos, destacar lo peculiar de fenómenos conocidos, sistematizar la información distinguiendo las diferencias con fenómenos o casos similares (Díaz de León, 2012, p. 223).



Los métodos detallados nos permitirán repetir las observaciones en las mismas condiciones para analizar los resultados y también variar las condiciones para ver las diferencias y replicar el experimento. Este efecto supone la manipulación de la variable independiente (cámara de electrocoagulación) y se dispone del máximo control sobre ellas, la utilización del razonamiento hipotético – deductivo para contrastar la hipótesis y así validar su veracidad o no.

### **Diseño general**

La investigación presenta un diseño pre experimental, en razón de que no tienen la capacidad de controlar adecuadamente los factores que influyen contra la validez interna, así como también de la validez externa. Sin embargo, es útil comenzar la discusión y descripción de los diseños por dos razones: primero porque son elementos de los diseños experimentales, segundo porque ilustran la forma en que las variables extrañas pueden influir en la validez interna, es decir nos dan a conocer lo que no se debe de hacer y lo que se deberá hacer (Sánchez & Reyes, 2000).

### **Diseño específico**

El diseño Pre-test y post-test con un solo grupo. Según (Sánchez y Reyes (2000) usa un pre-test, de algún modo proporciona información acerca de la muestra con la que se realiza el estudio y de esta forma se estaría controlando de algún modo la selección de la variable extraña (pp. 87-88).

La ejecución de este diseño implica tres pasos a ser realizado:

- Una medición previa de la variable dependiente a ser estudiada (pre-test).
- Introducción o aplicación de la variable independiente o experimental “X” a los sujetos del grupo “Y”.
- Una nueva medición de la variable dependiente en los sujetos (pot-test).

El diseño de investigación experimental comprende el siguiente modelo:

$$GE : O_1 \quad X \quad O_2$$

**Donde:**

- GE** : Grupo Experimental  
**O<sub>1</sub>** : Pre test (DBO<sub>5</sub>, Ph)  
**X** : Uso de una Cámara de electrocoagulación  
**O<sub>2</sub>** : Post test (DBO<sub>5</sub>, Ph)

### 3.4 Técnicas e instrumentos

**Técnicas**

La observación experimental, es el registro sistemático y válido de datos e informaciones de los hechos observados (Ñaupas & Mejía, 2014). Es fundamentalmente sistemática, objetiva y posee los mecanismos de control que impiden caer en algunos errores propios de la subjetividad, de la ambigüedad y la confusión (Niño Rojas, 2011).

Esta observación que se realiza en la investigación experimental, mediante el uso del método experimental, consistió en examinar atentamente el efecto que produce la manipulación de la variable independiente (cámara de electrocoagulación) sobre la variable dependiente (aguas residuales del camal municipal). Además, se examinan las características del comportamiento de los fenómenos y efectos de los indicadores de las variables (tiempo y densidad de corriente eléctrica), en el experimento.

**Instrumentos****Ficha de registro de campo**

Como afirma Ñaupas & Mejía (2014), se empleó como instrumento de recolección de datos una ficha técnica que consistió en: “Observar atentamente el fenómeno, hecho o caso, tomar información y registrarla para su posterior análisis” (p. 45).

Se realizará en base al Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales (D. S. N° 003-2010-MINAM).

La observación experimental se efectuó en el laboratorio de Biología y Química de la UNH, que consistió en observar atentamente los efectos, producido por la

cámara de electrocoagulación (VI) a intervalos de tiempos y densidades de corriente eléctrica registradas en el rastrillo de observación.

Las opciones de recojo de información de los parámetros de estudio se realizó en la siguiente ficha de registro de campo:

### Ficha de registro de campo pretest

**Tabla 4**

*Ficha pre-test*

Código	Tiempo	Densidad CE	T° C	pH	DBO <sub>5</sub>	Conductividad
Matriz(M 1)						
Matriz(M 2)						
Matriz(M 3)						
Matriz(M 4)						
Matriz(M 5)						
Matriz(M 6)						

### Ficha de registro de campo post-test

**Tabla 5**

*Ficha post-test*

Código	Tiempo	Densidad CE	T° C	pH	DBO <sub>5</sub>	Conductividad
SEMANA 1						
T05V12	05 min	10 Amp/m <sup>2</sup>				
T15V24		30 Amp/m <sup>2</sup>				
T30V36		50 Amp/m <sup>2</sup>				
T05V12	15 min	10 Amp/m <sup>2</sup>				
T15V24		30 Amp/m <sup>2</sup>				
T30V36		50 Amp/m <sup>2</sup>				
T05V12	30 min	10 Amp/m <sup>2</sup>				
T15V24		30 Amp/m <sup>2</sup>				
T30V36		50 Amp/m <sup>2</sup>				
SEMANA 2						
T05V12	05 min	10 Amp/m <sup>2</sup>				
T15V24		30 Amp/m <sup>2</sup>				
T30V36		50 Amp/m <sup>2</sup>				
T05V12	15 min	10 Amp/m <sup>2</sup>				
T15V24		30 Amp/m <sup>2</sup>				
T30V36		50 Amp/m <sup>2</sup>				
T05V12	30 min	10 Amp/m <sup>2</sup>				
T15V24		30 Amp/m <sup>2</sup>				
T30V36		50 Amp/m <sup>2</sup>				
SEMANA 3						
T05V12	05 min	10 Amp/m <sup>2</sup>				
T15V24		30 Amp/m <sup>2</sup>				
T30V36		50 Amp/m <sup>2</sup>				

T05V12		10 Amp/m <sup>2</sup>
T15V24	15 min	30 Amp/m <sup>2</sup>
T30V36		50 Amp/m <sup>2</sup>
T05V12		10 Amp/m <sup>2</sup>
T15V24	30 min	30 Amp/m <sup>2</sup>
T30V36		50 Amp/m <sup>2</sup>
SEMANA 4		
T05V12		10 Amp/m <sup>2</sup>
T15V24	05 min	30 Amp/m <sup>2</sup>
T30V36		50 Amp/m <sup>2</sup>
T05V12		10 Amp/m <sup>2</sup>
T15V24	15 min	30 Amp/m <sup>2</sup>
T30V36		50 Amp/m <sup>2</sup>
T05V12		10 Amp/m <sup>2</sup>
T15V24	30 min	30 Amp/m <sup>2</sup>
T30V36		50 Amp/m <sup>2</sup>
SEMANA 5		
T05V12		10 Amp/m <sup>2</sup>
T15V24	05 min	30 Amp/m <sup>2</sup>
T30V36		50 Amp/m <sup>2</sup>
T05V12		10 Amp/m <sup>2</sup>
T15V24	15 min	30 Amp/m <sup>2</sup>
T30V36		50 Amp/m <sup>2</sup>
T05V12		10 Amp/m <sup>2</sup>
T15V24	30 min	30 Amp/m <sup>2</sup>
T30V36		50 Amp/m <sup>2</sup>

Los parámetros de temperatura y pH fueron analizados en un momento In situ en el camal municipal (pre-test) y la DBO<sub>5</sub> (post-test) fue enviada al laboratorio ALAB (Analytical Laboratory E.I.R.L) para su respectivo análisis mediante la ficha de cadena de custodia.

De acuerdo a los datos obtenidos en el proceso de laboratorio, y las hipótesis tanto generales y específicas planteadas, la investigación se enfocó en realizar una matriz de diseño o arreglo factorial que consiste en determinar un conjunto de puntos experimentales o tratamientos que pueden formarse considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores. El diseño de la investigación comprende 2 factores (parámetros de la DBO<sub>5</sub> y pH), con 3 niveles de aplicación por cada factor, que dan lugar al diseño factorial 3 x 3. Observe que en el nombre del diseño factorial va implícito el número de tratamientos que lo componen. Para obtener el número de corridas experimentales se multiplica el número de tratamientos por el número de réplicas, donde una de éstas se lleva a cabo cada vez que se corre el arreglo completo. Las corridas experimentales de acuerdo a los tratamientos de laboratorio y observación, se desarrollaron durante

5 semanas, dando lugar al modelo de arreglo factorial de 3x3x5, lo cual representa 45 corridas experimentales de tratamiento respecto a los parámetros bioquímicos en estudio.

De acuerdo con Pedrosa y Basterretxea (2014) el uso de pruebas no paramétricas resulta recomendable cuando los datos a analizar no cumplen los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Sin embargo, la suposición de la normalidad de los datos o el empleo de pruebas de bondad de ajuste que no son adecuadas para el tamaño muestral empleado son aspectos habituales (p 245).

La prueba de Shapiro-Wilk es una de las más consolidadas y con mayor potencia estadística entre las existentes actualmente (Arcones & Wang, 2006). Su fundamento estadístico está basado en una gráfica de probabilidad en la que se considera la regresión de las observaciones sobre los valores esperados de la distribución hipotetizada, en donde su estadístico W representa el cociente de dos estimaciones de la varianza de una distribución normal.

La prueba de Shapiro – Wilk, restringió la aplicabilidad para un tamaño de muestra inferior a 50. Esta prueba fue la primera prueba que pudo detectar desviaciones de la normalidad debido a asimetría o curtosis, o ambos (Althouse et al., 1998).

Conforme a las inferencias detalladas, la investigación comprobó las hipótesis planteadas: Donde la Hipótesis general trabajo con las 45 corridas en base a la prueba de Shapiro - Wilk y un arreglo factorial (Efectos principales, interacción de factores, residuos estandarizados, valores ajustados y predicción) y la hipótesis específica 1 y 2 se basó en comparaciones de las 5 semanas con arreglos factorial de 3x3 y la aplicación de un ANOVA para diseño factorial (Efectos principales, interacción de factores). De acuerdo a lo mencionado se plantea la prueba de Shapiro – Wilk.

Dada una muestra aleatoria ordenada,  $y_1 < y_2 < y_3 \dots < y_n$ , el estadístico de prueba de Shapiro - Wilk se define como:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

**Donde:**

- $y_i$ : es el estadístico de i-ésimo orden,
- $\bar{y}$ : es la media muestral

$$a_i = a_1, a_2, \dots, a_n = \frac{m^T V^{-1}}{(m^T V^{-1} V^{-1} m)^{1/2}}$$

- $m = (m_1, m_2, \dots, m_n)^T$  son los valores esperados de las estadísticas de orden de independientes e idénticamente variables aleatorias distribuidas muestradas de la distribución normal estándar y V es la covarianza matriz de esas estadísticas de orden.

El estadístico descriptivo permitió hallar el análisis de varianza. La estadística inferencial, analizo, el nivel real de significancia, el cual es la verdadera probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando es cierta y que en pruebas no exactas es diferente del nivel nominal, o teórico, de significancia, determinados, usualmente a un nivel del 5 %.

El diseño experimental que se utilizó en la investigación es un diseño de arreglos factoriales de dos factores, con diferentes niveles (3 por cada factor, con 5 tratamientos) y la variable de respuesta fue el porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub> y pH.

Las variables que se consideraron como factores para el diseño experimental fueron:

- ✓ Densidad de corriente eléctrica,
- ✓ Tiempo de tratamiento (remoción)

Esto permitió investigar el efecto individual y la interacción entre los factores sobre la variable respuesta, al elaborar un análisis ANOVA de arreglo factorial (3x3x5) con de la información obtenida.

El modelo estadístico fue:

**Para DBO<sub>5</sub>**

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + (\varepsilon)_{ij}$$

Dónde:

- $Y_{ij}$  : es la i-ésima observación del porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub> observado en los niveles i, j de los factores, densidad de corriente y tiempo.
- $\mu$  : es el porcentaje medio de remoción de DBO<sub>5</sub> del modelo.
- $\alpha_i$  : es el efecto del i-ésimo nivel del factor tiempo. k = 5, 15, y 30 min.
- $\beta_j$  : es el efecto del j-ésimo nivel del factor Densidad de corriente 10, 30 y 50 A/m<sup>2</sup>.
- $(\alpha\beta)_{ij}$  : es el efecto de interacción entre los niveles i y j de los factores Densidad de corriente y Tiempo. *Para todo i, j.*
- $(\epsilon)_{ij}$  : es el i-ésimo término de error aleatorio.

### Para pH

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + (\epsilon)_{ij}$$

Dónde:

- $Y_{ij}$  : es la i-ésima observación del porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub> observado en los niveles i, j de los factores, densidad de corriente y tiempo.
- $\mu$  : es el porcentaje medio de tratamiento del pH del modelo.
- $\alpha_i$  : es el efecto del i-ésimo nivel del factor tiempo. k = 5, 15, y 30 min.
- $\beta_j$  : es el efecto del j-ésimo nivel del factor Densidad de corriente 10, 30 y 50 A/m<sup>2</sup>.
- $(\alpha\beta)_{ij}$  : es el efecto de interacción entre los niveles i y j de los factores Densidad de corriente y Tiempo. *Para todo i, j.*
- $(\epsilon)_{ij}$  : es el i-ésimo término de error aleatorio.

## 3.5 Procedimiento

### Análisis experimental

Aguas residuales del Camal Municipal de la localidad de Huancavelica (20 litros x 5 semanas)

### Equipos e instrumentos de laboratorio

#### ➤ Sistema batch

También conocido como proceso por lotes. La cantidad total del agua residual se introduce al sistema al comienzo del proceso, obteniéndose la cantidad total de producto transcurrido un determinado tiempo.

### Condiciones en el proceso batch:

- La disponibilidad del producto a procesar o del servicio caliente o frío no es continua.
- Se requiere un cierto tiempo de retención en el proceso, por ejemplo, para estabilización de las propiedades del producto o desarrollo de reacciones químicas.
- Las labores de mantenimiento y/o limpieza suponen un tiempo importante del proceso.

### **Dimensiones**

Se utilizó en material de vidrio de 25x30x30cm<sup>3</sup> equivalente a 22.5 litros de agua residual en el proceso de tratamiento a escala de laboratorio.

### **Figura 11**

*Recipiente batch de vidrio*



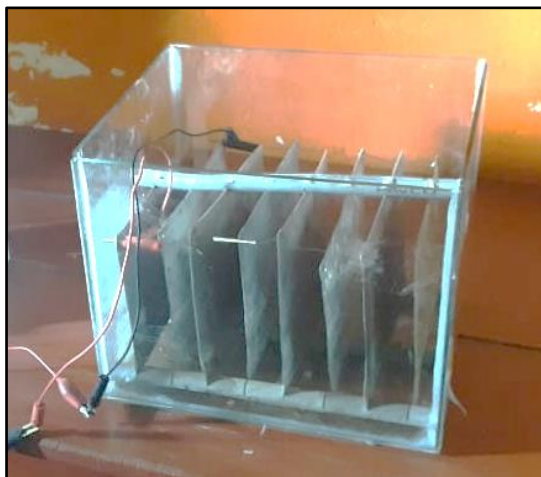
### **➤ Celda de electrocoagulación**

La celda del sistema, opera a un nivel de laboratorio, construida en base a un sistema batch con placas de aluminio, instaladas en paralelo para darle el sentido flujo como un sistema floculador que permitirá la coagulación eléctrica de partículas suspendidas, microorganismos y agentes inorgánicos en las muestras de aguas tratar. Comprende un soporte de tubo PVC a una distancia de 1cm por cada placa y 2 electrodos de entrada y salida de corriente eléctrica (entrada cable negro y rojo salida).



**Figura 12**

*Recipiente batch de vidrio*



De acuerdo Arango y Garcés (2007) en base a su criterio las placas deben ser rectangulares, las placas o láminas de aluminio son de espesor de 2 a 3 mm colocadas en la celda, dispuestas en paralelo. Las placas están separadas en distancias de 1 cm, para permitir de esta forma el flujo de agua residual durante el proceso. Las placas se disponen 4 para ánodos y 4 para cátodos, colocados de manera intercalada en paralelo.

#### ➤ **Electrodos**

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, y en elementos disueltos se busca que el coagulante los adsorba o los retenga mediante algún mecanismo fisicoquímico (Arango y Garcés, 2007).

#### ➤ **Ánodo:**

Electrodo de sacrificio, el que se disuelve, pierde electrones en una reacción de oxidación. Normalmente se vincula al polo positivo del tránsito de la corriente eléctrica, pero no siempre es así. (Mollah y Yousuf, 2004).

Se utilizó 4 placas de aluminio de 20x15cm<sup>2</sup> de superficie y 3mm de espesor (cable negro).

➤ **Cátodo:**

Electrodo que no se disuelve con carga negativa, que en la reacción química sufre una reacción de reducción, donde su estado de oxidación se reduce cuando recibe electrones.

Se utilizó 4 placas de aluminio de 20x15cm<sup>2</sup> de superficie y 2mm de espesor (cable rojo).

**Figura 13**

*Cátodo y ánodo de la celda de electrocoagulación*



Las reacciones que se generen dependerán del suministro del voltaje al sistema, donde se puede trabajar con electrodos bipolares que cumplan funciones tanto como ánodo en una celda y como cátodo en la otra (Mollah y Yousuf, 2004).

➤ **Fuente de poder**

AC/DC Power Supply FA-376 PROMAX (PROMAX ELECTRONICA, S. A., Barcelona, España). El intervalo de trabajo de la fuente es de 0 a 33 V para el voltaje (precisión 0,1 V) y de 0 a 5 A para la intensidad (precisión de 0,01 A).

**Figura 14**

*AC/DC power supply*



### ➤ **Multímetro analógico**

La intensidad de corriente eléctrica que fluye a través de la celda se monitoriza empleando un multímetro analógico de alta precisión YX-360TRF (Vernon Hills, IL, USA), necesario por las bajas intensidades de corriente eléctrica empleadas (1 – 10 Amp).

**Figura 15**

*Multímetro analógico (1-10Amp)*



### ➤ **Multiparametro digital**

El multiparametro de bolsillo TSD/EC/pH/TEMP Meter, 4 en 1, realiza mediciones de cuatro parámetros básicos, de calidad del agua, en un solo dispositivo (pH, conductividad eléctrica, TDS y temperatura).

**Figura 16**

*Multiparametro digital (EMP)*



## **Materiales**

- 02 Probetas graduadas de 250 y 500 mL
- 01 Balanza analítica
- 01 multiparametro
- 01 Cronómetro

- 02 pipetas de 10 mL
- 02 Embudos de vidrio
- 01 Pizeta
- 02 Vasos de precipitación de 1000 mL
- 01 Colador
- 01 Matraz Kitasato
- 01 Embudo Buchner
- 12 frascos de 250 mL
- Papel filtro Whatman N° 4
- Papel indicador de pH
- Papel toalla
- Alcohol para limpieza
- Guantes de látex
- Mascarillas
- Cubre cabellos
- Guardapolvo
- Franelas

## **Método de análisis en laboratorio**

**a) Análisis de la DBO<sub>5</sub>:** Demanda bioquímica de oxígeno (método respirométrico) recomendado por American Public Health Association [A.P.H.A] (2018), técnica basada en la medición de la concentración de oxígeno disuelto antes y después de la incubación desarrollada por microorganismos que trabajan sobre un sustrato orgánico, el cual es degradado y oxidado a CO<sub>2</sub>, la incubación se realiza por 5 días. El análisis lo realizó el laboratorio ALAB (Analytic Laboratory) del Perú SAC acreditado por la INACAL.

## **b) Análisis del pH.**

El pH (método electrométrico) recomendado por A.P.H.A (2018), se utilizó el equipo del pH – metro (multiparametro), donde se determinó la actividad de los iones hidrogeno en la solución. El análisis se realizó de manera insitu en la entrada del efluente del sedimentador.

## **Metodología experimental**

### **Procedimientos en la toma de muestra**

Se realizó un muestreo volumétrico manual (volumen / tiempo) como señala el Protocolo de Monitoreo de la Calidad Sanitaria de los Recursos Hídricos Superficiales DIGESA - 2007. Donde primero se rotularon las botellas para la toma de muestra que se realizó de la poza de recepción, las muestras provienen específicamente de dos líneas: vertimiento 1 y 2, donde el vertimiento 1 proviene del área de desangrado después de su beneficio, y el vertimiento 2 que transporta son aguas resultantes del área de lavado de viseras y limpieza general de la sala de beneficio. Se colocó el recipiente bajo la descarga del efluente de tal manera que reciba un flujo; simultáneamente cada muestra en un promedio de 30 segundos.

### **Metodología prueba INSITU**

Se colectó un aproximado de 20 litros de agua residual de ambas líneas que fueron analizados inmediatamente, los parámetros de pH, STD, Temperatura y Conductividad.

### **Metodología prueba para laboratorio**

Se instaló un prototipo del equipo de electrocoagulación donde se utilizaron 8 electrodos de aluminio ubicadas en paralelo a una distancia de 1cm, 4 electrodos como ánodos y 4 como cátodos en una celda electrolítica. Una vez instalada el equipo, incorporar la fuente de corriente. Por separado se calentó 1 L de muestra a una temperatura de 15 °C, el cual se suministró a la celda electrolítica y se enciende el rectificador de corriente y se observa el proceso. Se trabajó con 3 diferentes densidades de corrientes eléctricas (10, 30 y 50 Amp/m<sup>2</sup>) y tiempos de operación de 05, 15 min y 30 min, una vez concluido el proceso se realizó un filtrado usando papel whatman N°4 para retener coágulos y finalmente se realizó los análisis correspondientes.

### **Análisis de datos**

Consistió en procesar los datos obtenidos de la muestra mediante los programas estadísticos Rstudio V-4.02 y Excel V-2020 como objeto de estudio de la siguiente manera.

- **Paso 1:** Se seleccionó el programa Excel v-2020 que mediante una ficha de registro de campo de pretest y posttest se registró el análisis de recojo de información de los análisis de los parámetros DBO<sub>5</sub> y pH observados respecto a los factores de densidad de corriente eléctrica y tiempo.
- **Paso 2:** Seguidamente se organizó los datos en una matriz de arreglo factorial (Excel) de la forma 3x3x5 (3 niveles del factor densidad, 3 niveles del factor tiempo y 5 tratamientos o replicas) para su respectivo proceso en el programa Rstudio v-4.02.
- **Paso 3:** Se realizó el análisis de prueba de normalidad de datos con el test estadístico de Shapiro - Wilk de los parámetros de DBO<sub>5</sub> y pH.
- **Paso 4:** Se generó el ANOVA con arreglo factorial de las 5 semanas con 45 tratamientos.
- **Paso 5:** Se procedió a generar las gráficas de efectos principales e interacción de factores conjugando con las 5 semanas.
- **Paso 6:** Por último, se realizó el análisis de valores ajustados y reales de los tratamientos de la DBO<sub>5</sub> y pH.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS, DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

#### 4.1 Análisis descriptivo

Los resultados de estimación de la investigación fueron efectuados en primera instancia a partir de ensayos experimentales a nivel de laboratorio. En segunda instancia se realizó la recolección de datos, en base a la hoja de cálculo del programa Excel V-2020, como producto de estudio se efectuó el procesamiento estadístico con el software Rstudio V-4.02. Los procedimientos estadísticos nos permitieron analizar y cuantificar la eficiencia de la cámara de electrocoagulación en base al parámetro de estudio  $\text{DBO}_5$  y pH. Los procesos estadísticos inferenciales, se trabajó con un nivel de significancia de un 5%, prueba de homogeneidad de varianza (Bartlett), la prueba ANOVA para diseño de arreglo factorial de 2 factores con 3 niveles respectivamente y 5 tratamientos acorde al algoritmo de  $(3 \times 3 \times 5)$ , nos permitió evaluar la variación de la variable respuesta ( $\text{DBO}_5$  - pH) y la contrastación de Hipótesis; y para la prueba de normalidad de datos se trabajó con la Prueba de Shapiro-Wilks. La regresión lineal permitió encontrar los coeficientes de la ecuación de regresión para determinar la predicción y la optimización de datos de la variable respuesta y la predicción real y ajustada de los 45 tratamientos.

##### 4.1.1 Resultado Pretest

Representa los resultados de análisis del parámetro Biológico  $\text{DBO}_5$  y pH donde las muestras simples fueron recogidas en el efluente de la cámara de rejillas del Camal Municipal de Huancavelica. Se recogieron un total de 05 muestras, representadas 1 por semana y se procedió a realizar el análisis insitu de los parámetros físico químicos de pH, Temperatura. El análisis Biológico de  $\text{DBO}_5$  se mandó analizar al laboratorio ALAB (Analytical Laboratory E.I.R.L) con una preservación máxima de 48h en un cooler y 5 días de análisis posterior a ello.

La tabla 8 muestra los valores de los parámetros analizados del Camal Municipal respecto a 5 semanas de análisis, las cuales fueron consideradas como fuente de matriz de comparación a los resultados posteriores (post test) al tratamiento de electrocoagulación.

**Tabla 6***Condiciones iniciales del agua residual camal Municipal*

Semanas	Código	T (°C)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	pH
1	M1	12.90	678.80	5.98
2	M2	11.65	690.45	5.95
3	M3	13.16	653.71	6.00
4	M4	12.60	642.95	5.90
5	M5	11.34	654.45	5.90
<b>Promedio</b>		12.33	664.07	5.94

Los parámetros analizados, verifica que la DBO<sub>5</sub> y pH presenta un promedio de 664.07 mg/l, lo cual excede, y un pH de 5.94 unidades de H<sup>+</sup> muy bajo respecto a los Límites Máximos Permisibles ( $\leq 100$  mg/l y  $\geq 6.5$  H<sup>+</sup>) de acuerdo a la RM. N° 036-2010-MINAM, a excepción de la Temperatura que si está en el parámetro permitido de acuerdo los Límites Máximos Permisibles.

**Tabla 7***LMP para efluentes de PTAR*

PARAMETROS	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de agua
Aceites y Grasas	mg/L	20
Sólidos Totales en Suspensión	mL/L	150
(DBO <sub>5</sub> )	mg/L	100
(DQO)	mg/L	200
Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	10 000
(pH)	Unidad de pH	6.5 – 8.5
Temperatura	°C	< 35

*Nota.* Tomado de Norma OS.90, (2010).

Para fines de estudio y análisis respectivo el proyecto está orientado a la reducción del parámetro Biológico DBO<sub>5</sub> y el tratamiento del pH de acuerdo a los parámetros establecidos en la Tabla 9.

#### 4.1.2 Resultado Post test

Representa los resultados de análisis del parámetro Biológico DBO<sub>5</sub> de acuerdo a los efectos de los factores, Tiempo y Densidad de Corriente Eléctrica operados a escala de laboratorio en una cámara de electrocoagulación y su respectivo análisis en el laboratorio ANALYTICAL LABORATORY E.I.R.L.



## Resultados específicos de remoción $DBO_5$

### Semana 1 - 2

La tabla 10 presenta el análisis de datos de la Semana 1 y 2 (primer y segundo tratamiento), registrando en el afluente un promedio de concentración de 684.63 de mg  $DBO_5$ /l, operando a una Densidad de Corriente Eléctrica de 10, 30 y 50 Amp/m<sup>2</sup>, y Tiempos de 5, 15 y 30 minutos respectivamente, en la cámara de electrocoagulación.

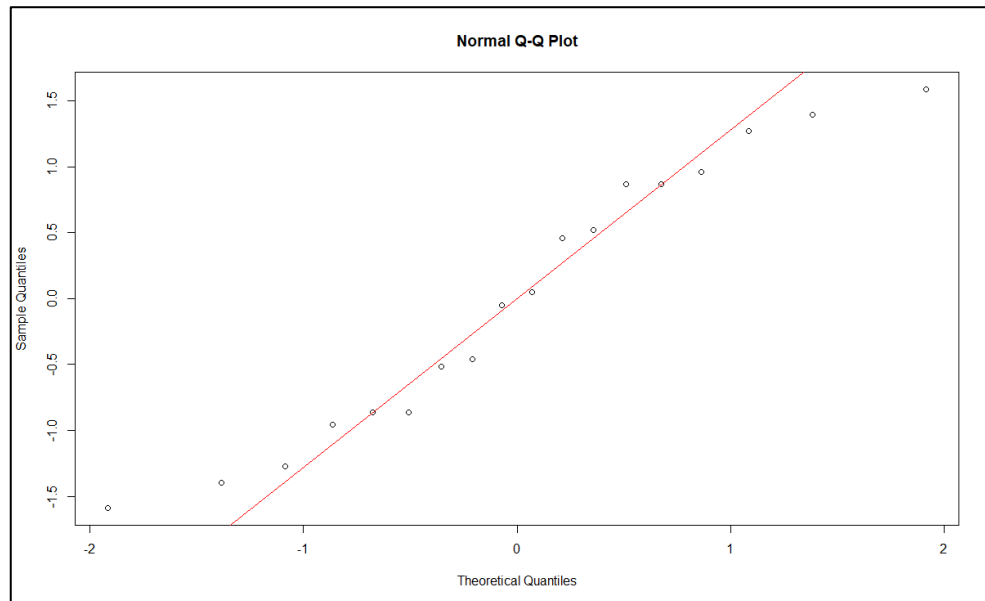
**Tabla 8**

*Tratamiento de la  $BDO_5$  y pH respecto a las semanas 1-2*

Código	$\rho$ (Amp/m <sup>2</sup> )	Tiempo (min)	T (°C)	$DBO_5$ (mg/l)	% Remoción $DBO_5$ (mg/l)	pH	% Incremento pH
M1	-	-	12.90	678.80	-	5.98	-
M2	-	-	12.60	690.45	-	5.95	-
Promedio			12.75	684.63	-	5.97	-
TRATAMIENTO SEMANA 1							
TRAT.01-T05-V12	10	5	13.10	626.77	7.66	6.07	1.51
TRAT.01-T05-V24	30	5	14.72	513.78	24.31	6.15	2.84
TRAT.01-T05-V36	50	5	15.93	335.15	50.63	6.53	9.20
TRAT.01-T15-V12	10	15	13.30	574.74	15.33	7.50	25.42
TRAT.01-T15-V24	30	15	15.63	431.27	36.47	7.60	27.09
TRAT.01-T15-V36	50	15	16.94	220.60	67.50	7.36	23.08
TRAT.01-T30-V12	10	30	13.50	522.71	22.99	6.23	4.18
TRAT.01-T30-V24	30	30	16.54	348.76	48.62	6.10	2.01
TRAT.01-T30-V36	50	30	17.95	106.05	84.38	7.15	19.57
TRATAMIENTO SEMANA 2							
TRAT.02-T05-V12	10	5	12.80	625.21	9.45	6.06	1.85
TRAT.02-T05-V24	30	5	14.40	497.01	28.02	6.17	3.70
TRAT.02-T05-V36	50	5	15.60	307.20	55.51	6.29	5.71
TRAT.02-T15-V12	10	15	13.00	559.97	18.90	7.17	20.50
TRAT.02-T15-V24	30	15	15.30	400.29	42.02	7.46	25.38
TRAT.02-T15-V36	50	15	16.60	179.40	74.02	7.20	21.01
TRAT.02-T30-V12	10	30	13.20	494.73	28.35	6.39	7.39
TRAT.02-T30-V24	30	30	16.20	303.60	56.03	6.49	9.08
TRAT.02-T30-V36	50	30	17.60	51.65	92.52	6.89	15.80

**Figura 17**

Prueba de distribución normal de la DBO<sub>5</sub>



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

**Shapiro-Wilk normality test**

W = 0.94171, p-value = 0.3099

**Pruebas de homogeneidad de varianzas**

Estadística		
Método de prueba	Valor p	
Bartlett	5.63	0.689

La figura 17 muestra que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de 0.3099 > 0.05 y la prueba Bartlett con Valor p = 0.689 > 0.05 determina la homogeneidad de varianzas.

**Figura 18**

ANOVA con arreglo factorial, DBO<sub>5</sub> semanas 1-2

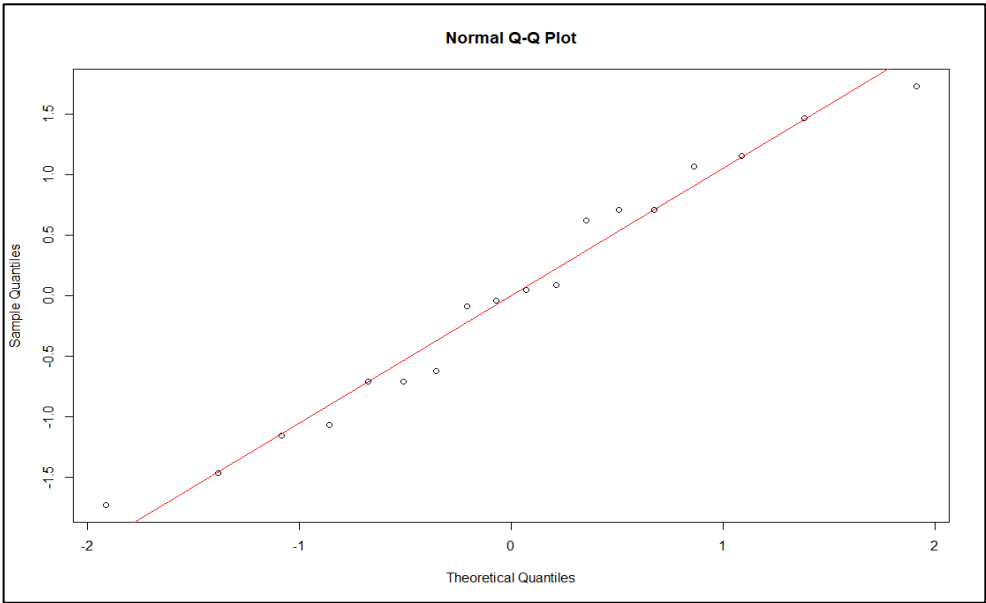
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	410127	205063	392.34	1.76e-09	***
FactorB_Tiempo	2	97312	48656	93.09	9.71e-07	***
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	8008	2002	3.83	0.0437	*
Residuals	9	4704	523			

*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 18 muestra el ANOVA (Tipo III) de los 18 tratamientos y 2 réplicas, referente a la comparación de medias de cuadrados de la Semana 1 y 2, respecto a la reducción del parámetro  $\text{DBO}_5$ , donde se aprecia que los efectos principales del Factor A y B ( $1.76e^{-9}$  y  $9.71e^{-7}$ ) son significativamente eficientes e independientes. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados a Tiempos en el intervalo de 5 a 30 minutos y Densidad de Corriente Eléctrica de 10 a 50  $\text{Amp}/\text{m}^2$  afectan a la variable respuesta con una interacción significativa eficiente de 0.0437.

**Figura 19**

*Prueba de distribución normal del pH*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

**Shapiro-Wilk normality test**

$W = 0.96704$ ,  $p\text{-value} = 0.7406$

**Pruebas de homogeneidad de varianzas**

Estadística		
Método	de prueba	Valor p
Bartlett	8.12	0.421

La figura 19 muestra que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de  $0.7406 > 0.05$  y la prueba Bartlett con  $\text{Valor } p = 0.421 > 0.05$  determina la homogeneidad de varianzas.

**Figura 20**

*ANOVA con arreglo factorial, pH semanas 1-2*

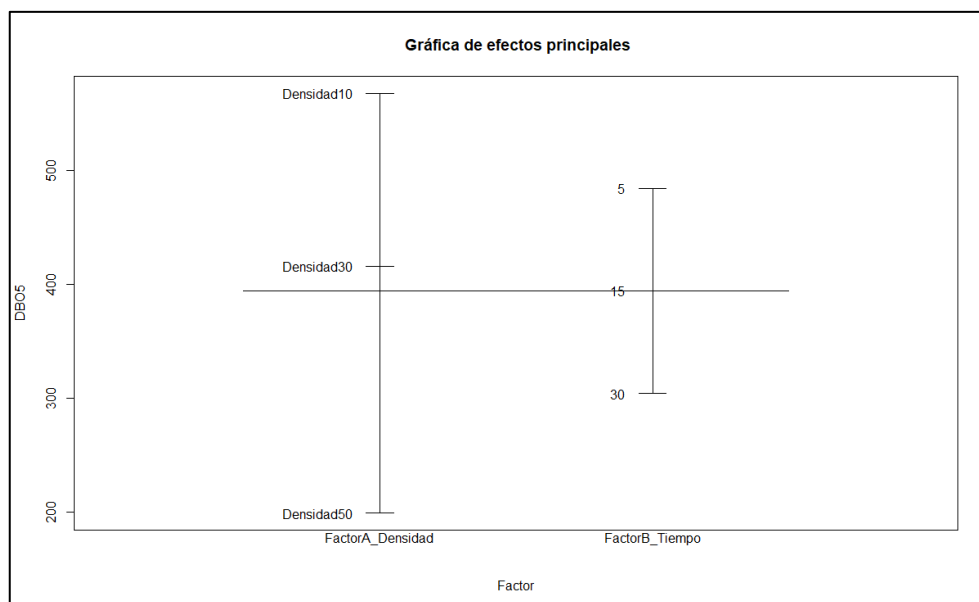
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	4.367	2.1834	85.904	1.37e-06	***
FactorB_Tiempo	2	0.356	0.1779	7.000	0.0147	*
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.527	0.1317	5.182	0.0191	*
Residuals	9	0.229	0.0254			

*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 20 muestra los efectos principales del pH respecto a los Factores A y B, estimando una probabilidad de  $1.37e^{-06}$  y 0.0147 que representa, que están activos o influyen significativamente de forma individual. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados describe una interacción significativa eficiente de 0.0191, es decir ambos factores afectan en el tratamiento del pH.

**Figura 21**

*Efectos principales de la DBO<sub>5</sub>, respecto a las semanas 1-2*



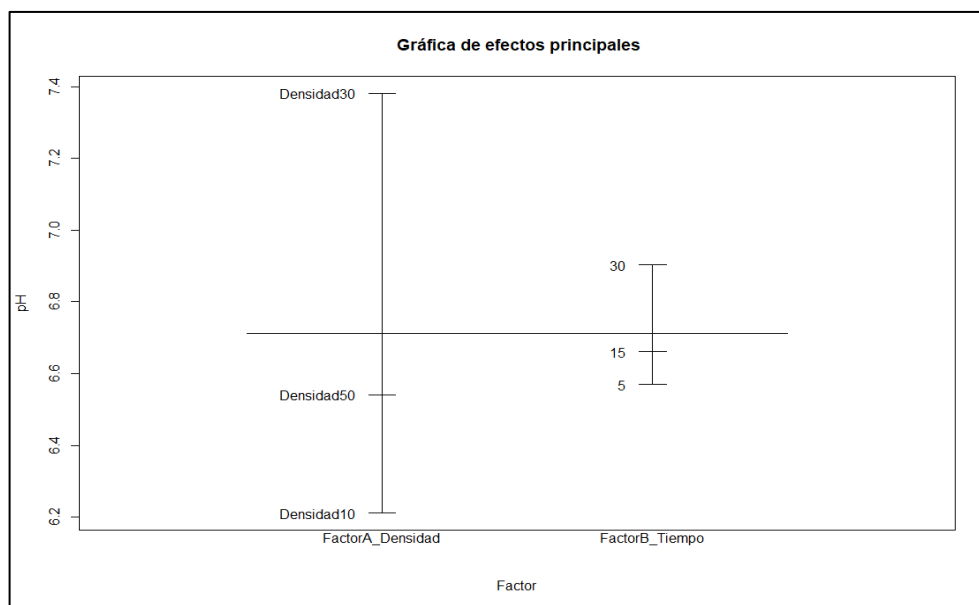
*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 21 muestra los efectos principales de los factores Tiempo y Densidad de CE, respecto al parámetro DBO<sub>5</sub>, donde se aprecia que la Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> tiene una tasa media de reducción mayor que las Densidades de 10 y 30 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en la reducción de la DBO<sub>5</sub>, donde el Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media de reducción mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general,

se ubica en el intervalo de 400 a 200 mg DBO<sub>5</sub>/l y la media del factor Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> está próximo a los 200mg DBO<sub>5</sub>/l.

## Figura 22

*Efectos principales del pH, respecto a las semanas 1-2*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 22 muestra los efectos principales de los factores A y B, respecto al pH, donde se aprecia que a una Densidad de CE de 30 Amp/m<sup>2</sup> el pH muestra un incremento de H<sup>+</sup> por encima de 7.2 unidades de pH, que a comparación de las Densidades de 10 y 50 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en el incremento de H<sup>+</sup>, que en un Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general, se ubica en el intervalo de 6.6 a 6.8 unidades de pH.

## Semana 1-3

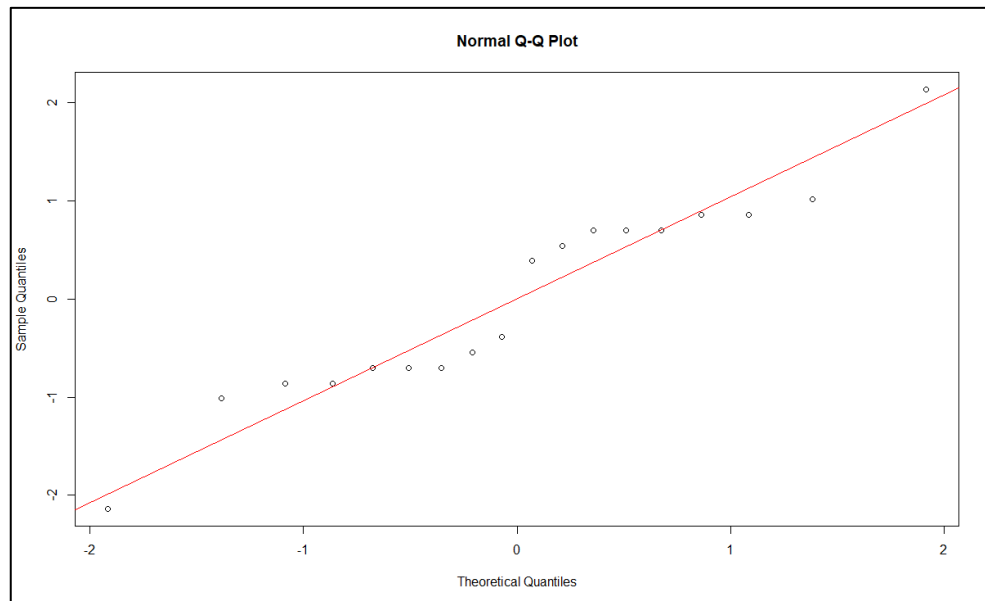
La tabla 11 presenta el análisis de datos de la Semana 1 y 3 (primer y tercer tratamiento), registrando en el afluente un promedio de concentración de 666.26 de mg DBO<sub>5</sub>/l, operando a una Densidad de Corriente Eléctrica de 10, 30 y 50 Amp/m<sup>2</sup>, y Tiempos de 5, 15 y 30 minutos respectivamente, en la cámara de electrocoagulación.

**Tabla 9***Tratamiento de la DBO<sub>5</sub> y pH respecto a las semanas 1-3*

<b>Código</b>	<b><math>\rho</math> (Amp/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>% Remoción DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>pH</b>	<b>% Incremento pH</b>
M1	-	-	12.90	678.80	-	5.98	-
M3	-	-	12.60	653.71	-	6.00	-
Promedio			12.75	666.26	-	5.99	-
<b>TRATAMIENTO SEMANA 1</b>							
TRAT.01-T05-V12	10	5	13.10	626.77	7.66	6.07	1.51
TRAT.01-T05-V24	30	5	14.72	513.78	24.31	6.15	2.84
TRAT.01-T05-V36	50	5	15.93	335.15	50.63	6.53	9.20
TRAT.01-T15-V12	10	15	13.30	574.74	15.33	7.50	25.42
TRAT.01-T15-V24	30	15	15.63	431.27	36.47	7.60	27.09
TRAT.01-T15-V36	50	15	16.94	220.60	67.50	7.36	23.08
TRAT.01-T30-V12	10	30	13.50	522.71	22.99	6.23	4.18
TRAT.01-T30-V24	30	30	16.54	348.76	48.62	6.10	2.01
TRAT.01-T30-V36	50	30	17.95	106.05	84.38	7.15	19.57
<b>TRATAMIENTO SEMANA 3</b>							
TRAT.03-T05-V12	10	5	13.05	605.03	7.45	6.05	0.83
TRAT.03-T05-V24	30	5	14.69	495.39	24.22	6.20	3.33
TRAT.03-T05-V36	50	5	15.91	320.10	51.03	6.25	4.17
TRAT.03-T15-V12	10	15	13.25	556.35	14.89	7.22	20.33
TRAT.03-T15-V24	30	15	15.61	416.23	36.33	7.38	23.00
TRAT.03-T15-V36	50	15	16.93	208.90	68.04	7.59	26.50
TRAT.03-T30-V12	10	30	13.45	507.67	22.34	6.50	8.33
TRAT.03-T30-V24	30	30	16.53	337.10	48.44	6.07	1.17
TRAT.03-T30-V36	50	30	17.95	97.710	85.05	7.10	18.33

## Figura 23

Prueba de distribución normal de la  $DBO_5$



Nota. Tomado de Rstudio V. 4.02.

### Shapiro-Wilk normality test

$W = 0.94595$ ,  $p\text{-value} = 0.3651$

### Pruebas de homogeneidad de varianzas

Estadística		
Método	de prueba	Valor p
Bartlett	0.89	0.999

La figura 23 muestra que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de  $0.3651 > 0.05$  y la prueba Bartlett con Valor  $p = 0.999 > 0.05$  determina la homogeneidad de varianzas.

## Figura 24

ANOVA con arreglo factorial,  $DBO_5$  semanas 1-3

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	386562	193281	840.782	5.86e-11	***
FactorB_Tiempo	2	79553	39777	173.031	6.57e-08	***
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	8079	2020	8.786	0.00358	**
Residuals	9	2069	230			

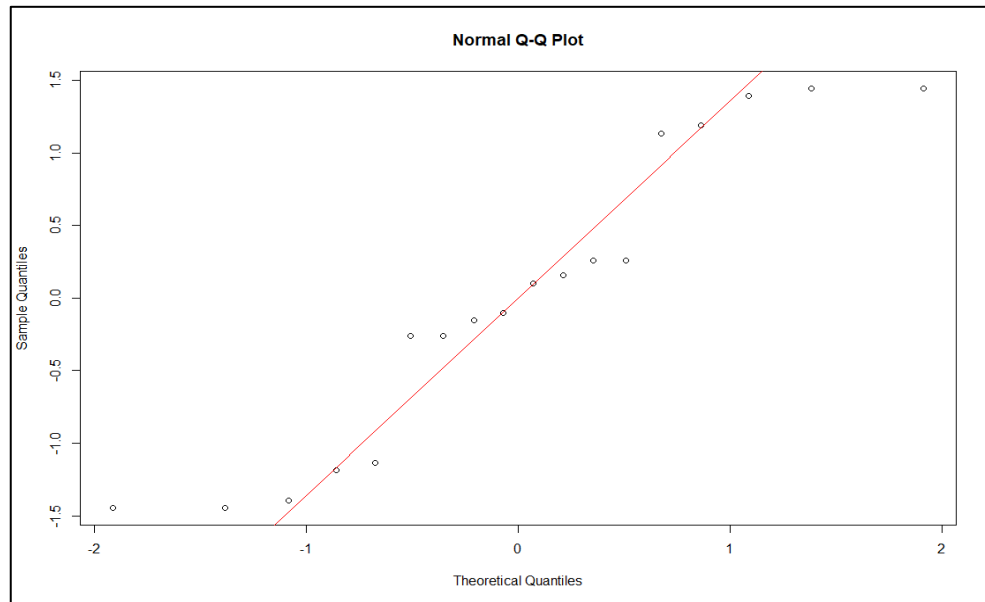
Nota. Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 24 muestra el ANOVA de los 18 tratamientos y 2 réplicas, referente a la comparación de medias de cuadrados de la Semana 1 y 3, respecto a la reducción del parámetro  $DBO_5$ , donde se aprecia que los efectos principales del Factor A y

B ( $5.86e^{-11}$  y  $6.57e^{-8}$ ) son significativamente eficientes e independientes. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados a Tiempos en el intervalo de 5 a 30 minutos y Densidad de Corriente Eléctrica de 10 a 50 Amp/m<sup>2</sup> afectan a la variable respuesta con una interacción significativa eficiente de 0.00358.

### Figura 25

*Prueba de distribución normal del pH*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

### Shapiro-Wilk normality test

W = 0.90315, p-value = 0.06522

### Pruebas de homogeneidad de varianzas

	Estadística	
	Método de prueba	Valor p
Bartlett	7.98	0.435

La figura 25 muestra que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de 0.06522 > 0.05 y la prueba Bartlett con Valor p = 0.435 > 0.05 determina la homogeneidad de varianzas.



**Figura 26**

*ANOVA con arreglo factorial, pH semanas1-3.*

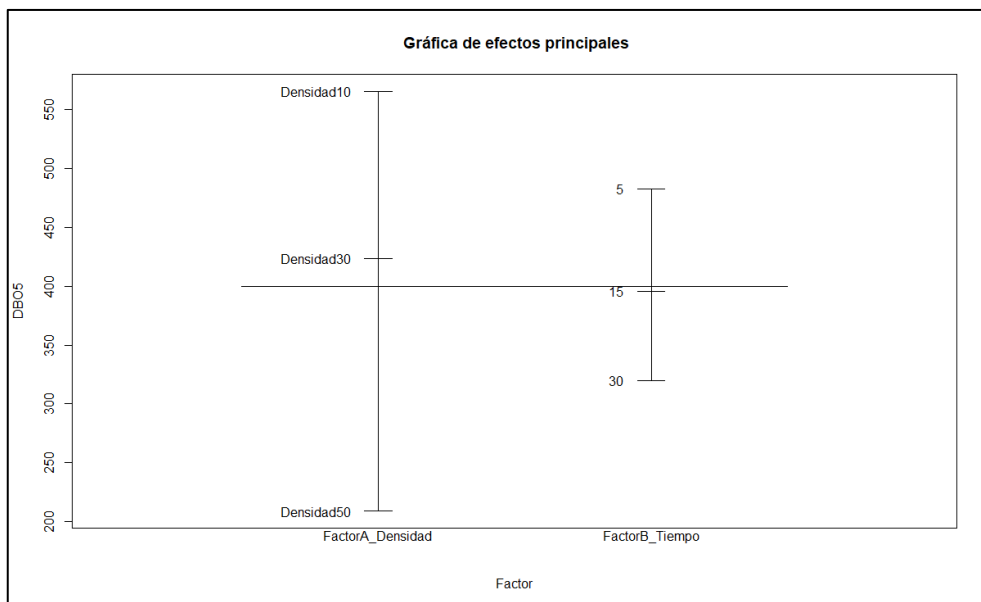
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	4.923	2.4617	131.367	2.19e-07	***
FactorB_Tiempo	2	0.665	0.3323	17.734	0.000755	***
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.626	0.1566	8.355	0.004243	**
Residuals	9	0.169	0.0187			

*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 26 muestra los efectos principales del pH respecto a los Factores A y B, estimando una probabilidad de  $2.19e^{-07}$  y 0.000755 que representa, que están activos o influyen significativamente de forma individual. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados describe una interacción significativa eficiente de 0.004243, es decir ambos factores afectan en el tratamiento del pH.

**Figura 27**

*Efectos principales de la DBO<sub>5</sub>, respecto a las semanas 1-3*



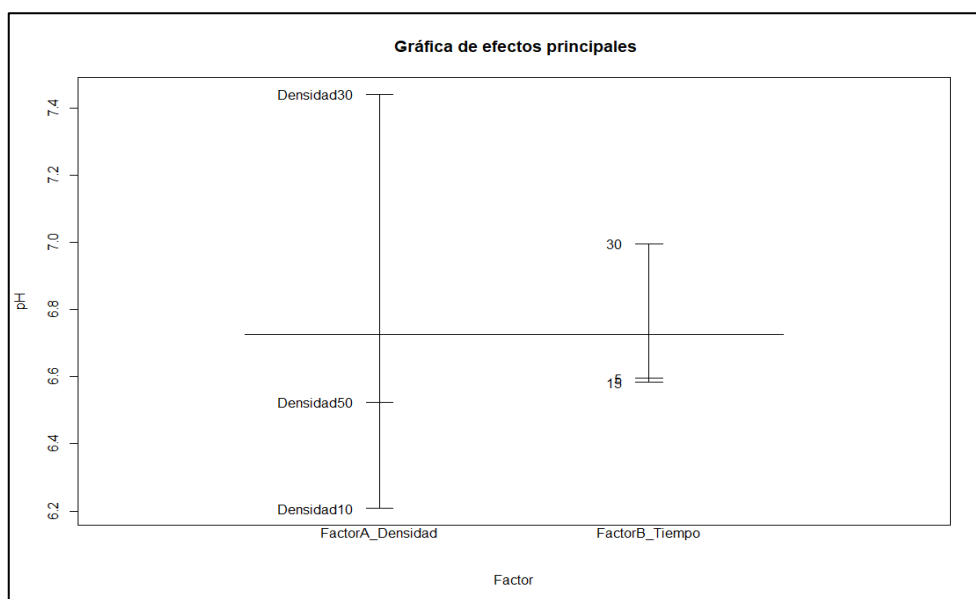
*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 27 muestra los efectos principales de los factores Tiempo y Densidad de CE, respecto al parámetro DBO<sub>5</sub>, donde se aprecia que la Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> tiene una tasa media de reducción mayor que las Densidades de 10 y 30 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en la reducción de la DBO<sub>5</sub>, donde el Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media de reducción mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general,

se ubica en el intervalo de 400 a 350 mg DBO<sub>5</sub>/l y la media del factor Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> está por encima a los 200mg DBO<sub>5</sub>/l.

## Figura 28

*Efectos principales del pH, respecto a las semanas 1-3*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 28 muestra los efectos principales de los factores A y B, respecto al pH, donde se aprecia que a una Densidad de CE de 30 Amp/m<sup>2</sup> el pH muestra un incremento de H<sup>+</sup> por encima de 7.4 unidades de pH, que a comparación de las Densidades de 10 y 50 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en el incremento de H<sup>+</sup>, que en un Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general, se ubica en el intervalo de 6.6 a 6.8 unidades de pH.

## Semana 1-4

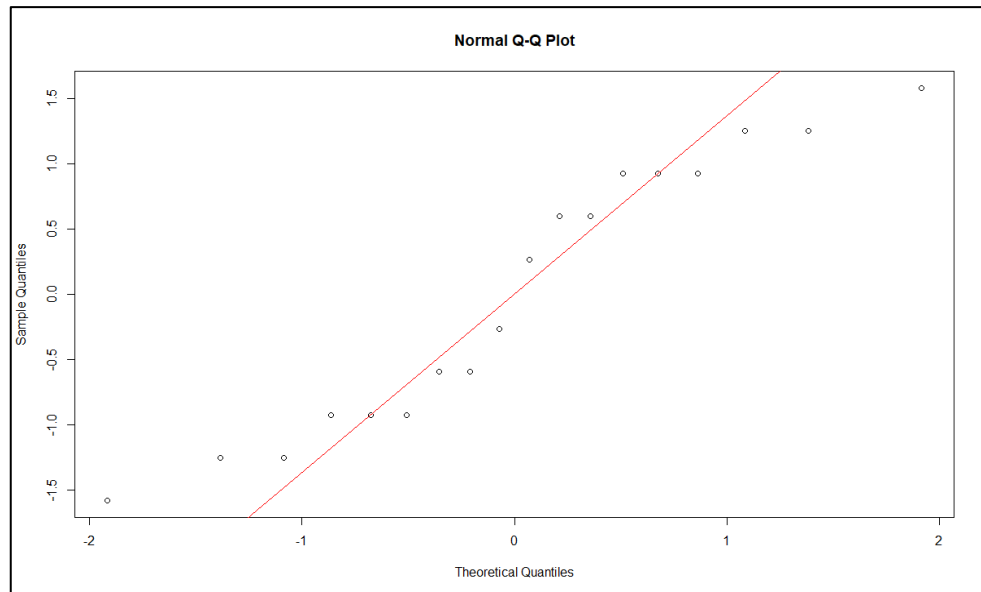
La tabla 12 presenta el análisis de datos de la Semana 1 y (primer y cuarto tratamiento), registrando en el afluente un promedio de concentración de 660.88 de mg DBO<sub>5</sub>/l, operando a una Densidad de Corriente Eléctrica de 10, 30 y 50 Amp/m<sup>2</sup>, y Tiempos de 5, 15 y 30 minutos respectivamente, en la cámara de electrocoagulación.

**Tabla 10***Tratamiento de la DBO<sub>5</sub> y pH respecto a las semanas 1-4*

Código	$\rho$ (Amp/ m <sup>2</sup> )	Tiempo (min)	T (°C)	DBO <sub>5</sub> (mg/ l)	% Remoción DBO <sub>5</sub> (mg/l)	pH	% Increment o pH
M1	-	-	12.9 0	678.8 0	-	5.98	-
M4	-	-	12.8 5	642.9 5	-	5.90	-
Promedio			12.8 8	660.8 8	-	5.94	-
TRATAMIENTO SEMANA 1							
TRAT.01-T05-V12	10	5	13.1 0	626.7 7	7.66	6.07	1.51
TRAT.01-T05-V24	30	5	14.7 2	513.7 8	24.31	6.15	2.84
TRAT.01-T05-V36	50	5	15.9 3	335.1 5	50.63	6.53	9.20
TRAT.01-T15-V12	10	15	13.3 0	574.7 4	15.33	7.50	25.42
TRAT.01-T15-V24	30	15	15.6 3	431.2 7	36.47	7.60	27.09
TRAT.01-T15-V36	50	15	16.9 4	220.6 0	67.50	7.36	23.08
TRAT.01-T30-V12	10	30	13.5 0	522.7 1	22.99	6.23	4.18
TRAT.01-T30-V24	30	30	16.5 4	348.7 6	48.62	6.10	2.01
TRAT.01-T30-V36	50	30	17.9 5	106.0 5	84.38	7.15	19.57
TRATAMIENTO SEMANA 4							
TRAT.04-T05-V12	10	5	13.0 5	597.09	7.13	6.15	4.24
TRAT.04-T05-V24	30	5	14.6 7	490.27	23.75	6.22	5.42
TRAT.04-T05-V36	50	5	15.8 8	317.80	50.57	6.26	6.10
TRAT.04-T15-V12	10	15	13.2 5	551.23	14.27	7.27	23.22
TRAT.04-T15-V24	30	15	15.5 8	413.93	35.62	7.40	25.42
TRAT.04-T15-V36	50	15	16.8 9	209.40	67.43	7.68	30.17
TRAT.04-T30-V12	10	30	13.4 5	505.37	21.40	6.37	7.97
TRAT.04-T30-V24	30	30	16.4 9	337.60	47.49	6.04	2.37
TRAT.04-T30-V36	50	30	17.9 0	101.10	84.28	7.23	22.54

**Figura 29**

*Prueba de distribución normal de la DBO<sub>5</sub>*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

**Shapiro-Wilk normality test**

W = 0.91981, p-value = 0.1283

**Pruebas de homogeneidad de varianzas**

	Estadística	
Método	de prueba	Valor p
Bartlett	2.46	0.963

La figura 29 muestra que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de 0.1283 > 0.05 y la prueba Bartlett con Valor p = 0.963 > 0.05 determina la homogeneidad de varianzas.

**Figura 30**

*ANOVA con arreglo factorial, DBO<sub>5</sub> semanas 1-4*

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	367765	183883	1046.47	2.20e-11	***
FactorB_Tiempo	2	76694	38347	218.23	2.37e-08	***
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	7819	1955	11.12	0.00156	**
Residuals	9	1581	176			

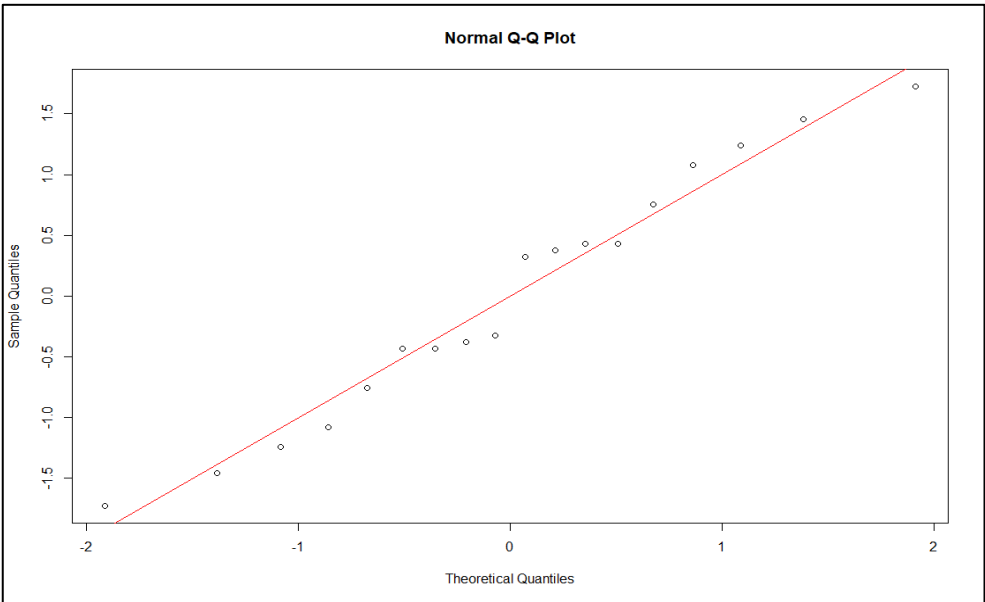
*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 30 muestra el ANOVA de los 18 tratamientos y 2 réplicas, referente a la comparación de medias de cuadrados de la Semana 1 y 4, respecto a la reducción del parámetro DBO<sub>5</sub>, donde se aprecia que los efectos principales del Factor A y

B ( $2.20e^{-11}$  y  $2.37e^{-08}$ ) son significativamente independientes. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados a Tiempos en el intervalo de 5 a 30 minutos y Densidad de Corriente Eléctrica de 10 a 50 Amp/m<sup>2</sup> afectan a la variable respuesta con una interacción significativa eficiente de 0.00156.

**Figura 31**

*Prueba de distribucion normal del pH*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

**Shapiro-Wilk normality test**

W = 0.96583, p-value = 0.7165

**Pruebas de homogeneidad de varianzas**

	Estadística	
	Método de prueba	Valor p
Bartlett	4.16	0.843

La figura 31 muestra que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de 0.7165 > 0.05 y la prueba Bartlett con Valor p = 0.843 > 0.05 determina la homogeneidad de varianzas.

**Figura 32**

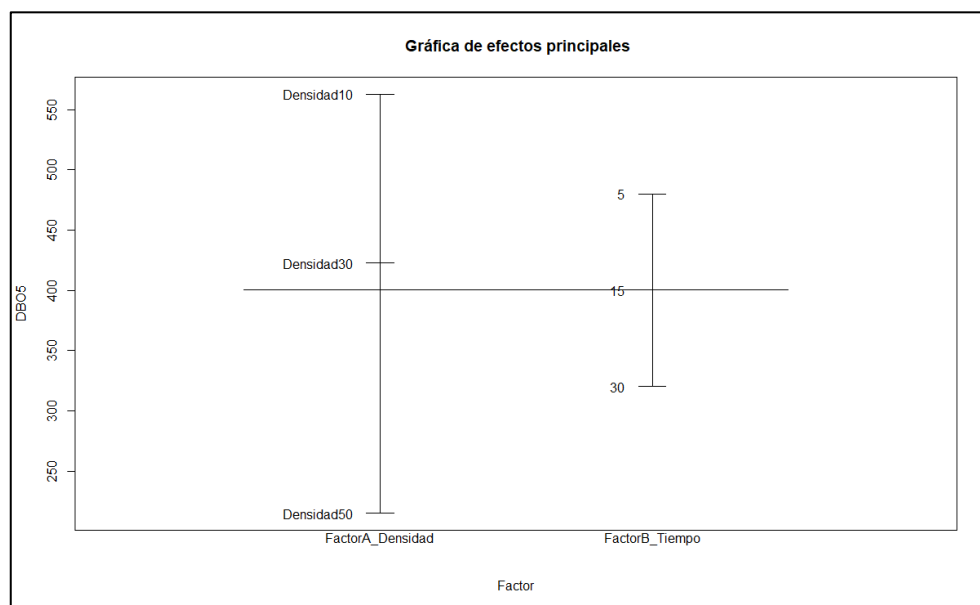
*ANOVA con arreglo factorial, pH semanas 1-4*

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	5.034	2.5169	146.57	1.36e-07	***
FactorB_Tiempo	2	0.787	0.3934	22.91	0.000295	***
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.721	0.1804	10.50	0.001915	**
Residuals	9	0.155	0.0172			

La figura 32 muestra los efectos principales del pH respecto a los Factores A y B, estimando una probabilidad de  $1.36e^{-09}$  y 0.000295 que representa, que están activos o influyen significativamente de forma individual. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados describe una interacción significativa eficiente de 0.01915, es decir ambos factores afectan en el tratamiento del pH.

**Figura 33**

*Efectos principales de la DBO<sub>5</sub>, respecto a las semanas 1-4*

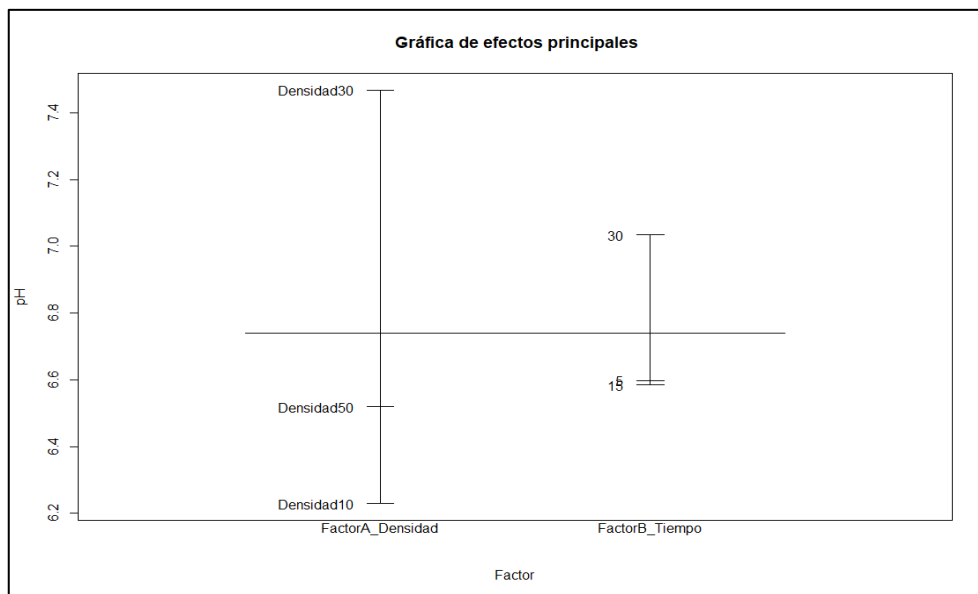


*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 33 muestra los efectos principales de los factores Tiempo y Densidad de CE, respecto al parámetro DBO<sub>5</sub>, donde se aprecia que la Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> tiene una tasa media de reducción mayor que las Densidades de 10 y 30 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en la reducción de la DBO<sub>5</sub>, donde el Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media de reducción mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general, se ubica en 400 mg DBO<sub>5</sub>/l y la media del factor Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> está por debajo de 250mg DBO<sub>5</sub>/l.

## Figura 34

*Efectos principales del pH, respecto a las semanas 1-4*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 34 muestra los efectos principales de los factores A y B, respecto al pH, donde se aprecia que a una Densidad de CE de 30 Amp/m<sup>2</sup> el pH muestra un incremento de H<sup>+</sup> por encima de 7.4 unidades de pH, que a comparación de las Densidades de 10 y 50 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en el incremento de H<sup>+</sup>, que en un Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general, se ubica en el intervalo de 6.6. a 6.8 unidades de pH.

## Semana 1-5

La tabla 13 presenta el análisis de datos de la Semana 1 y 5 (primer y quinto tratamiento), registrando en el afluente un promedio de concentración de 666.63 de mg DBO<sub>5</sub>/l, operando a una Densidad de Corriente Eléctrica de 10, 30 y 50 Amp/m<sup>2</sup>, y Tiempos de 5, 15 y 30 minutos respectivamente, en la cámara de electrocoagulación.

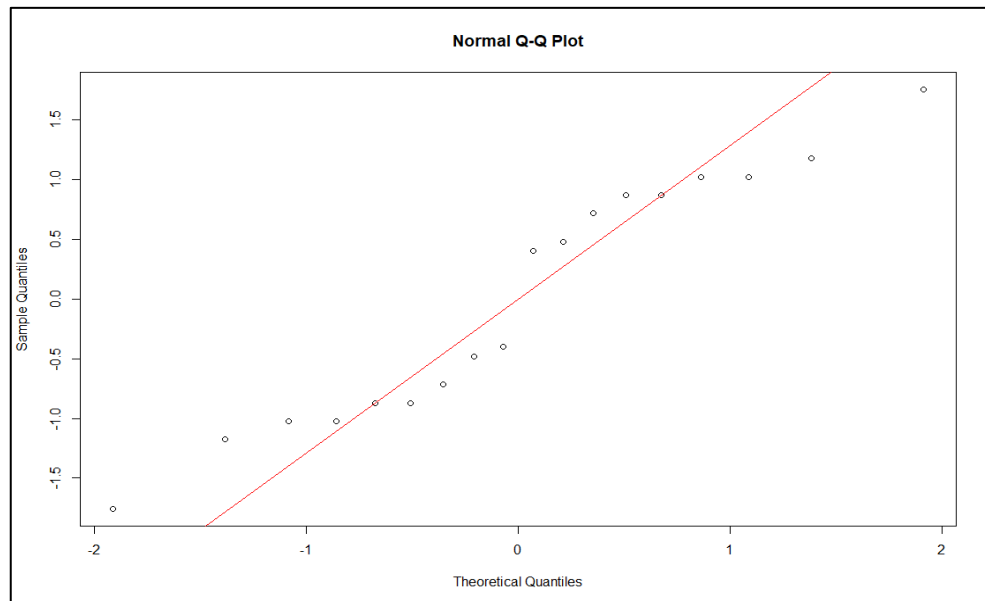
**Tabla 11***Tratamiento de la DBO<sub>5</sub> y pH respecto a las semanas 1-5*

<b>Código</b>	<b><math>\rho</math> (Amp/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>% Remoción DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>pH</b>	<b>% Incremento pH</b>
M1	-	-	12.90	678.80	-	5.98	-
M5	-	-	12.68	654.45	-	5.90	-
			12.79	666.63	-	5.94	-
<b>TRATAMIENTO SEMANA 1</b>							
Promedio							
TRAT.01-T05-V12	10	5	13.10	626.77	7.66	6.07	1.51
TRAT.01-T05-V24	30	5	14.72	513.78	24.31	6.15	2.84
TRAT.01-T05-V36	50	5	15.93	335.15	50.63	6.53	9.20
TRAT.01-T15-V12	10	15	13.30	574.74	15.33	7.50	25.42
TRAT.01-T15-V24	30	15	15.63	431.27	36.47	7.60	27.09
TRAT.01-T15-V36	50	15	16.94	220.60	67.50	7.36	23.08
TRAT.01-T30-V12	10	30	13.50	522.71	22.99	6.23	4.18
TRAT.01-T30-V24	30	30	16.54	348.76	48.62	6.10	2.01
TRAT.01-T30-V36	50	30	17.95	106.05	84.38	7.15	19.57
<b>TRATAMIENTO SEMANA 5</b>							
TRAT.05-T05-V12	10	5	12.88	595.82	8.96	6.13	3.90
TRAT.05-T05-V24	30	5	14.48	476.23	27.23	6.24	5.76
TRAT.05-T05-V36	50	5	15.68	291.00	55.54	6.60	11.86
TRAT.05-T15-V12	10	15	13.08	537.19	17.92	7.34	24.41
TRAT.05-T15-V24	30	15	15.38	387.12	40.85	7.56	28.14
TRAT.05-T15-V36	50	15	16.68	169.90	74.05	7.65	29.66
TRAT.05-T30-V12	10	30	13.28	478.56	26.88	6.47	9.66
TRAT.05-T30-V24	30	30	16.28	298.00	54.46	6.43	8.98
TRAT.05-T30-V36	50	30	17.68	48.70	92.56	7.00	18.64



**Figura 35**

*Prueba de distribución normal de la DBO<sub>5</sub>*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

**Shapiro-Wilk normality test**

W = 0.87599, p-value = 0.02237

**Pruebas de homogeneidad de varianzas**

	Estadística	
Método	de prueba	Valor p
Bartlett	0.40	1.000

La figura 35 muestra que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de 0.87599 > 0.05 y la prueba Bartlett con Valor p = 1.000 > 0.05 determina la homogeneidad de varianzas.

**Figura 36**

*ANOVA con arreglo factorial, DBO<sub>5</sub> semanas 1-5*

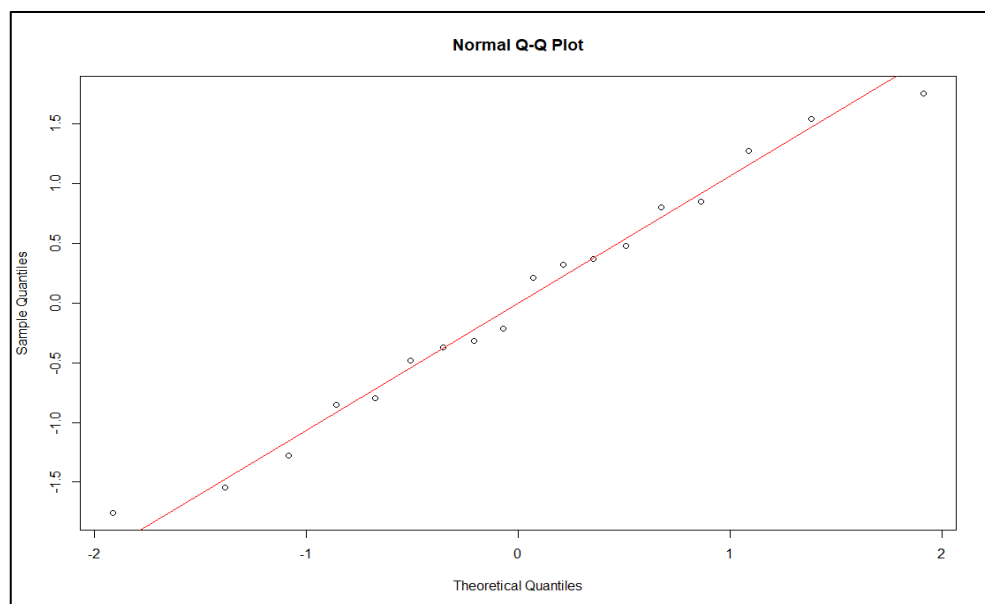
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	409908	204954	220.424	2.27e-08	***
FactorB_Tiempo	2	64220	32110	34.534	6.00e-05	***
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	15560	3890	4.184	0.0347	*
Residuals	9	8368	930			

*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 36 muestra el ANOVA de los 18 tratamientos y 2 réplicas, referente a la comparación de medias de cuadrados de la Semana 1 y 5, respecto a la reducción del parámetro DBO<sub>5</sub>, donde se aprecia que los efectos principales del Factor A y B ( $2.27e^{-08}$  y  $6.00e^{-05}$ ) son significativamente independientes. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados a Tiempos en el intervalo de 5 a 30 minutos y Densidad de Corriente Eléctrica de 10 a 50 Amp/m<sup>2</sup> afectan a la variable respuesta con una interacción significativa eficiente de 0.00347.

### Figura 37

*Prueba de distribución normal del pH*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

### Shapiro-Wilk normality test

W = 0.97633, p-value = 0.9045

### Pruebas de homogeneidad de varianzas

Estadística		
Método	de prueba	Valor p
Bartlett	5.17	0.739

La figura 37 muestra que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de 0.9045 > 0.05 y la prueba Bartlett con Valor p = 0.739 > 0.05 determina la homogeneidad de varianzas.

### Figura 38

ANOVA con arreglo factorial, pH semanas1-5

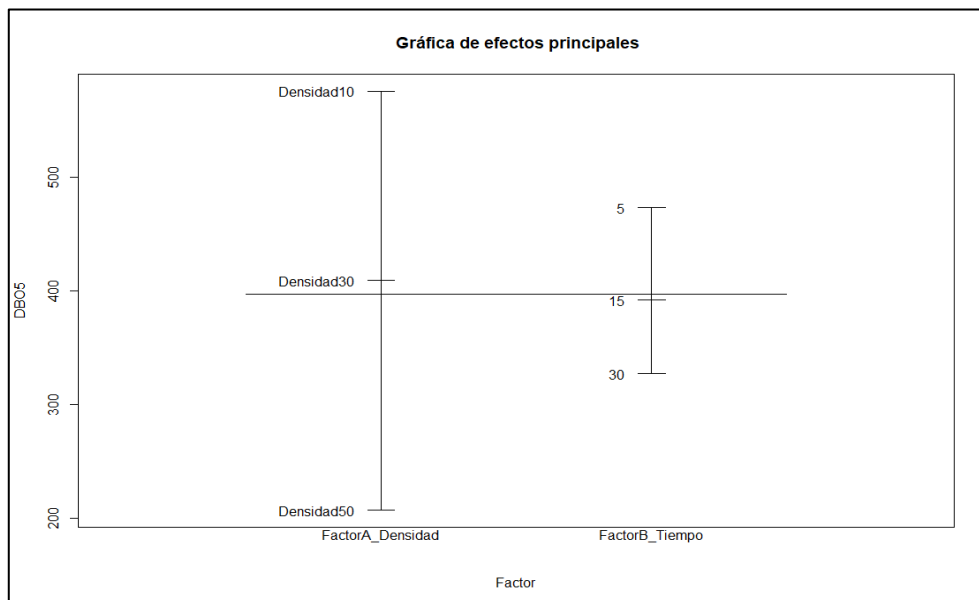
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	4.866	2.4332	138.209	1.76e-07	***
FactorB_Tiempo	2	0.639	0.3195	18.148	0.000695	***
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.421	0.1052	5.974	0.012511	*
Residuals	9	0.158	0.0176			

Nota. Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 38 muestra los efectos principales del pH respecto a los Factores A y B, estimando una probabilidad de  $1.76e^{-09}$  y 0.0000695 que representa, que están activos o influyen significativamente de forma individual. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados describe una interacción significativa eficiente de 0.012511, es decir ambos factores afectan en el tratamiento del pH.

### Figura 39

Efectos principales de la DBO<sub>5</sub>, respecto a las semanas 1-5

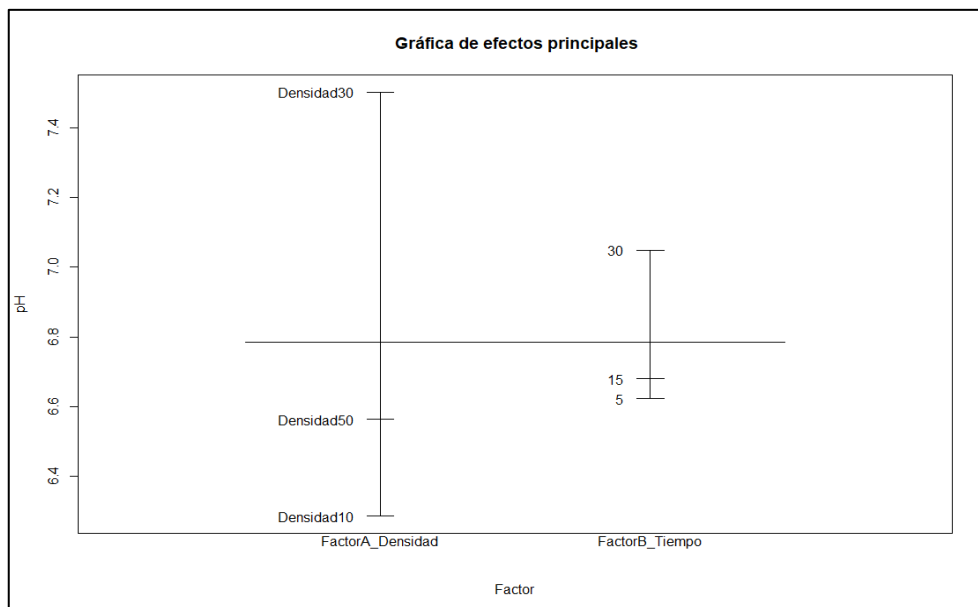


Nota. Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 39 muestra los efectos principales de los factores Tiempo y Densidad de CE, respecto al parámetro DBO<sub>5</sub>, donde se aprecia que la Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> tiene una tasa media de reducción mayor que las Densidades de 10 y 30 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en la reducción de la DBO<sub>5</sub>, donde el Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media de reducción mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general, se ubica en el intervalo de 400 a 300 mg DBO<sub>5</sub>/l y la media del factor Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> está por encima de 200mg DBO<sub>5</sub>/l.

## Figura 40

*Efectos principales del pH, respecto a las semanas 1-5*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 40 muestra los efectos principales de los factores A y B, respecto al pH, donde se aprecia que a una Densidad de CE de 30 Amp/m<sup>2</sup> el pH muestra un incremento de H<sup>+</sup> por encima de 7.4 unidades de pH, que a comparación de las Densidades de 10 y 50 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en el incremento de H<sup>+</sup>, que en un Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general, se ubica en el intervalo de 6.6 a 6.8 unidades de pH.

## Semana 2-3

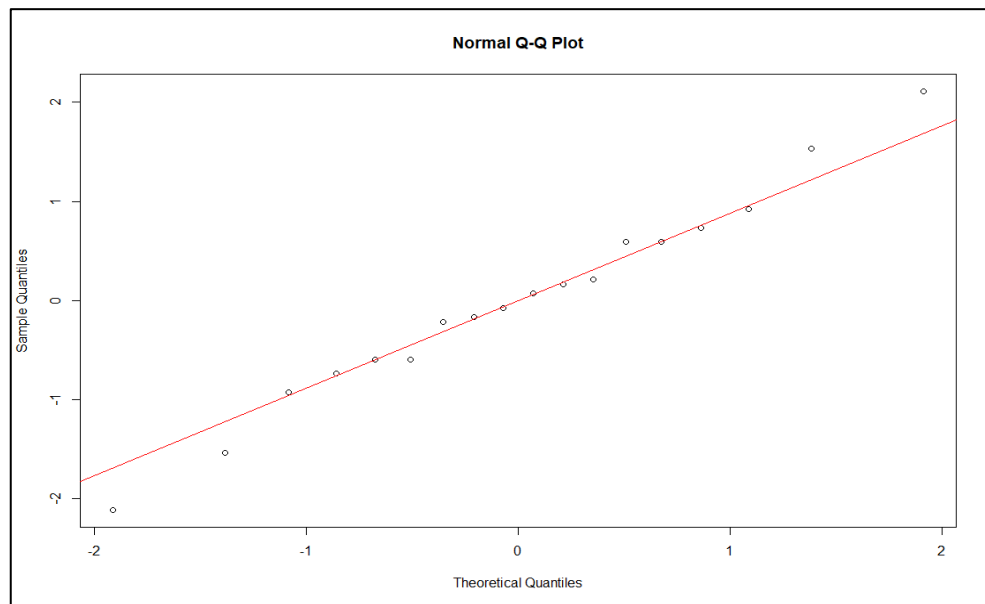
La tabla 14 presenta el análisis de datos de la Semana 2 y 3 (segundo y tercer tratamiento), registrando en el afluente un promedio de concentración de 672.45 de mg DBO<sub>5</sub>/l, operando a una Densidad de Corriente Eléctrica de 10, 30 y 50 Amp/m<sup>2</sup>, y Tiempos de 5, 15 y 30 minutos respectivamente, en la cámara de electrocoagulación.

**Tabla 12***Tratamiento de la DBO<sub>5</sub> y pH respecto a las semanas 2-3*

<b>Código</b>	<b><math>\rho</math> (Amp/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>% Remoción DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>pH</b>	<b>% Remoción pH</b>
M2	-	-	12.60	690.45	-	5.95	-
M3	-	-	12.85	654.45	-	6.00	-
Promedio			12.73	672.45	-	5.98	-
<b>TRATAMIENTO SEMANA 2</b>							
TRAT.02-T05-V12	10	5	12.80	625.21	9.45	6.06	1.85
TRAT.02-T05-V24	30	5	14.40	497.01	28.02	6.17	3.70
TRAT.02-T05-V36	50	5	15.60	307.20	55.51	6.29	5.71
TRAT.02-T15-V12	10	15	13.00	559.97	18.90	7.17	20.50
TRAT.02-T15-V24	30	15	15.30	400.29	42.02	7.46	25.38
TRAT.02-T15-V36	50	15	16.60	179.40	74.02	7.20	21.01
TRAT.02-T30-V12	10	30	13.20	494.73	28.35	6.39	7.39
TRAT.02-T30-V24	30	30	16.20	303.60	56.03	6.49	9.08
TRAT.02-T30-V36	50	30	17.60	51.65	92.52	6.89	15.80
<b>TRATAMIENTO SEMANA 3</b>							
TRAT.03-T05-V12	10	5	13.05	605.03	7.45	6.05	0.83
TRAT.03-T05-V24	30	5	14.69	495.39	24.22	6.20	3.33
TRAT.03-T05-V36	50	5	15.91	320.10	51.03	6.25	4.17
TRAT.03-T15-V12	10	15	13.25	556.35	14.89	7.22	20.33
TRAT.03-T15-V24	30	15	15.61	416.23	36.33	7.38	23.00
TRAT.03-T15-V36	50	15	16.93	208.90	68.04	7.59	26.50
TRAT.03-T30-V12	10	30	13.45	507.67	22.34	6.50	8.33
TRAT.03-T30-V24	30	30	16.53	337.10	48.44	6.07	1.17
TRAT.03-T30-V36	50	30	17.95	97.710	85.05	7.10	18.33

**Figura 41**

*Prueba de distribución normal de la DBO<sub>5</sub>*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

### **Shapiro-Wilk normality test**

W = 0.98879, p-value = 0.9975

### **Pruebas de homogeneidad de varianzas**

Estadística		
Método	de prueba	Valor p
Bartlett	7.54	0.480

La figura 41 muestra que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de 0.9975 > 0.05 y la prueba Bartlett con Valor p = 0.480 > 0.05 determina la homogeneidad de varianzas.

**Figura 42**

*ANOVA con arreglo factorial, semanas 2-3*

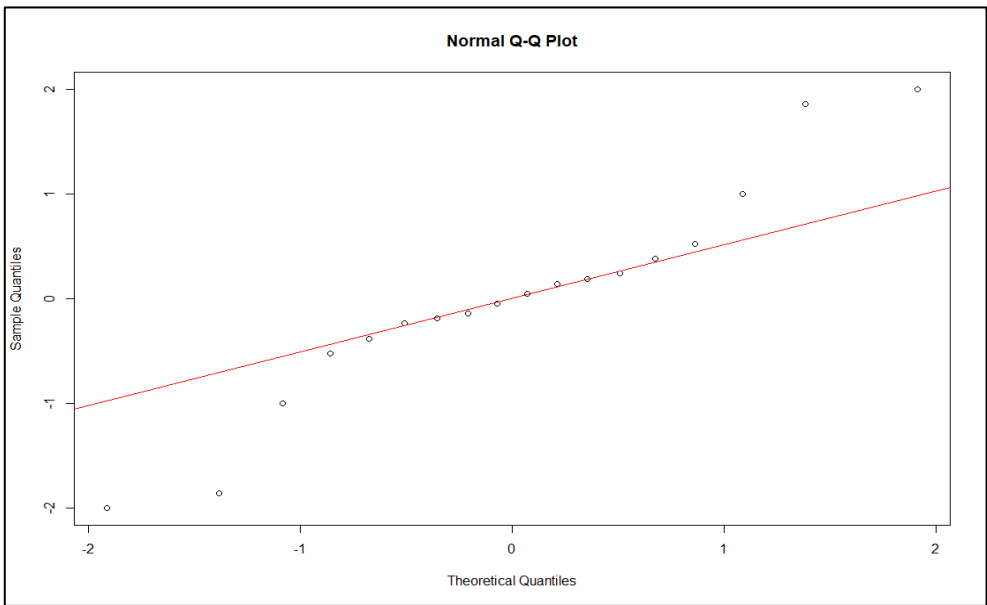
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	414912	207456	872.967	4.95e-11	***
FactorB_Tiempo	2	93326	46663	196.355	3.77e-08	***
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	8077	2019	8.497	0.00401	**
Residuals	9	2139	238			

*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 42 muestra el ANOVA de los 18 tratamientos y 2 réplicas, referente a la comparación de medias de cuadrados de la Semana 1 y 2, respecto a la reducción del parámetro DBO<sub>5</sub>, donde se aprecia que los efectos principales del Factor A y B ( $4.95e^{-11}$  y  $3.77e^{-08}$ ) son significativamente independientes. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados a Tiempos en el intervalo de 5 a 30 minutos y Densidad de Corriente Eléctrica de 10 a 50 Amp/m<sup>2</sup> afectan a la variable respuesta con una interacción significativa eficiente de 0.00401.

**Figura 43**

*Prueba de distribucion normal del pH*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

**Shapiro-Wilk normality test**

W = 0.94073, p-value = 0.2983

**Pruebas de homogeneidad de varianzas**

	Estadística	
Método	de prueba	Valor p
Bartlett	12.22	0.142

La figura 43 muestra que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de 0.2983 > 0.05 y la prueba Bartlett con Valor p = 0.142 > 0.05 determina la homogeneidad de varianzas.

#### Figura 44

ANOVA con arreglo factorial, pH semanas 2-3

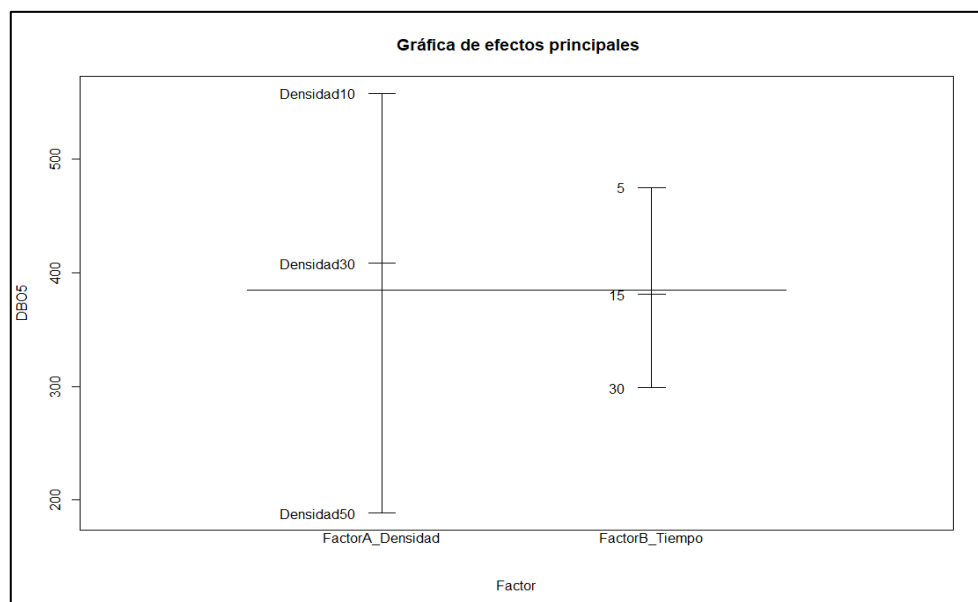
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	4.213	2.1065	95.700	8.62e-07	***
FactorB_Tiempo	2	0.348	0.1742	7.915	0.0104	*
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.320	0.0800	3.634	0.0500	*
Residuals	9	0.198	0.0220			

Nota. Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 44 muestra los efectos principales del pH respecto a los Factores A y B, estimando una probabilidad de  $8.62e^{-07}$  y 0.0104 que representa, que están activos o influyen significativamente de forma individual. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados describe una interacción significativa eficiente de 0.0500, es decir ambos factores afectan en el tratamiento del pH.

#### Figura 45

Efectos principales de la DBO<sub>5</sub>, semanas 2-3



Nota. Tomado de Rstudio V. 4.02.

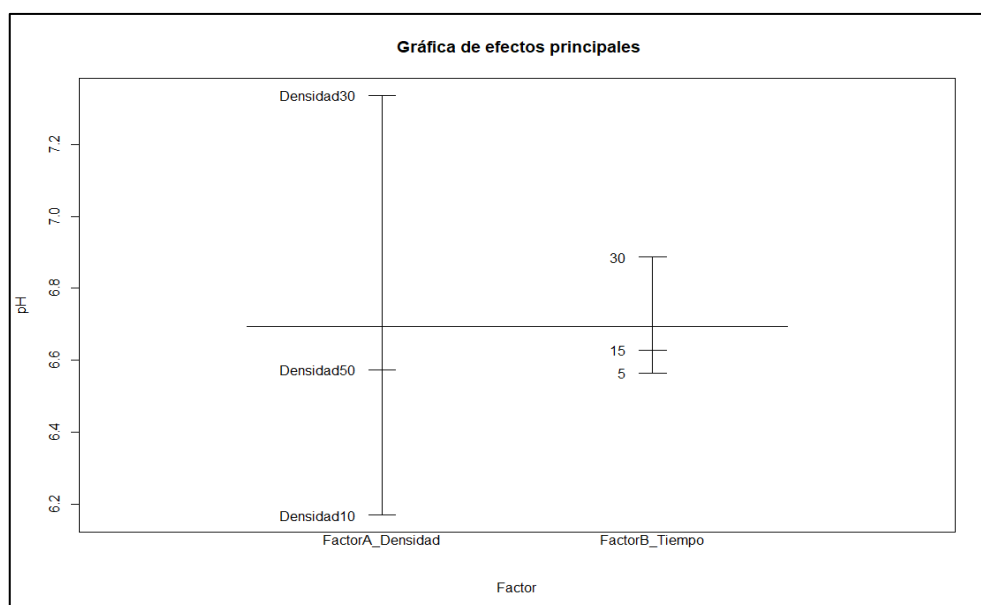
La figura 45 muestra los efectos principales de los factores Tiempo y Densidad de CE, respecto al parámetro DBO<sub>5</sub>, donde se aprecia que la Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> tiene una tasa media de reducción mayor que las Densidades de 10 y 30 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en la reducción de la DBO<sub>5</sub>, donde el Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media de reducción mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general,



se ubica en el intervalo de 400 a 300 mg DBO<sub>5</sub>/l y la media del factor Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> está por debajo de 200mg DBO<sub>5</sub>/l.

#### Figura 46

*Efectos principales del pH, respecto a las semanas 2-3*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 46 muestra los efectos principales de los factores A y B, respecto al pH, donde se aprecia que a una Densidad de CE de 30 Amp/m<sup>2</sup> el pH muestra un incremento de H<sup>+</sup> por encima de 7.2 unidades de pH, que a comparación de las Densidades de 10 y 50 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en el incremento de H<sup>+</sup>, que en un Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general, se ubica en el intervalo de 6.6 a 6.8 unidades de pH.

#### Semana 2-4

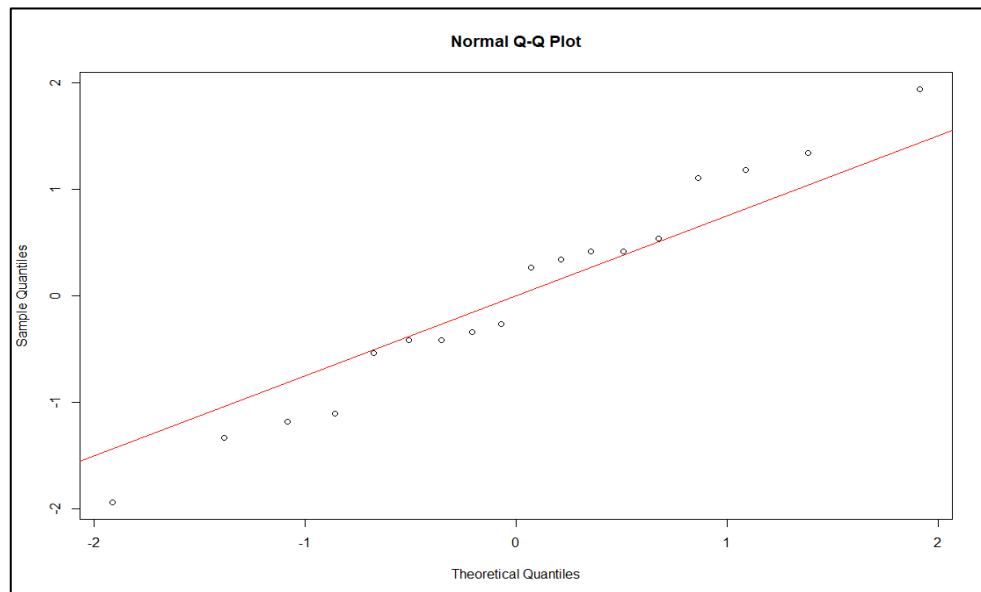
La tabla 15 presenta el análisis de datos de la Semana 2 y 4 (segundo y cuarto tratamiento), registrando en el afluente un promedio de concentración de 666.70 de mg DBO<sub>5</sub>/l, operando a una Densidad de Corriente Eléctrica de 10, 30 y 50 Amp/m<sup>2</sup>, y Tiempos de 5, 15 y 30 minutos respectivamente, en la cámara de electrocoagulación.

**Tabla 13***Tratamiento de la DBO<sub>5</sub> y pH respecto a las semanas 2-4*

<b>Código</b>	<b><math>\rho</math> (Amp/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>% Remoción DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>pH</b>	<b>% Remoción pH</b>
M2	-	-	12.60	690.45	-	5.95	-
M4	-	-	12.85	642.95	-	5.90	-
Promedio			12.73	666.70	-	5.93	-
<b>TRATAMIENTO SEMANA 2</b>							
TRAT.02-To5-V12	10	5	12.80	625.21	9.45	6.06	1.85
TRAT.02-To5-V24	30	5	14.40	497.01	28.02	6.17	3.70
TRAT.02-To5-V36	50	5	15.60	307.20	55.51	6.29	5.71
TRAT.02-T15-V12	10	15	13.00	559.97	18.90	7.17	20.50
TRAT.02-T15-V24	30	15	15.30	400.29	42.02	7.46	25.38
TRAT.02-T15-V36	50	15	16.60	179.40	74.02	7.20	21.01
TRAT.02-T30-V12	10	30	13.20	494.73	28.35	6.39	7.39
TRAT.02-T30-V24	30	30	16.20	303.60	56.03	6.49	9.08
TRAT.02-T30-V36	50	30	17.60	51.65	92.52	6.89	15.80
<b>TRATAMIENTO SEMANA 4</b>							
TRAT.04-To5-V12	10	5	13.05	597.09	7.13	6.15	4.24
TRAT.04-To5-V24	30	5	14.67	490.27	23.75	6.22	5.42
TRAT.04-To5-V36	50	5	15.88	317.80	50.57	6.26	6.10
TRAT.04-T15-V12	10	15	13.25	551.23	14.27	7.27	23.22
TRAT.04-T15-V24	30	15	15.58	413.93	35.62	7.40	25.42
TRAT.04-T15-V36	50	15	16.89	209.40	67.43	7.68	30.17
TRAT.04-T30-V12	10	30	13.45	505.37	21.40	6.37	7.97
TRAT.04-T30-V24	30	30	16.49	337.6	47.49	6.04	2.37
TRAT.04-T30-V36	50	30	17.90	101.10	84.28	7.23	22.54

**Figura 47**

*Prueba de distribución normal de la DBO<sub>5</sub>*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

### **Shapiro-Wilk normality test**

W = 0.98049, p-value = 0.9549

### **Pruebas de homogeneidad de varianzas**

	Estadística	
Método	de prueba	Valor p
Bartlett	5.18	0.738

La figura 47 muestra que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de 0.98049 > 0.05 y la prueba Bartlett con Valor p = 0.738 > 0.05 determina la homogeneidad de varianzas.

**Figura 48**

*ANOVA con arreglo factorial, DBO<sub>5</sub>, semanas 2-4*

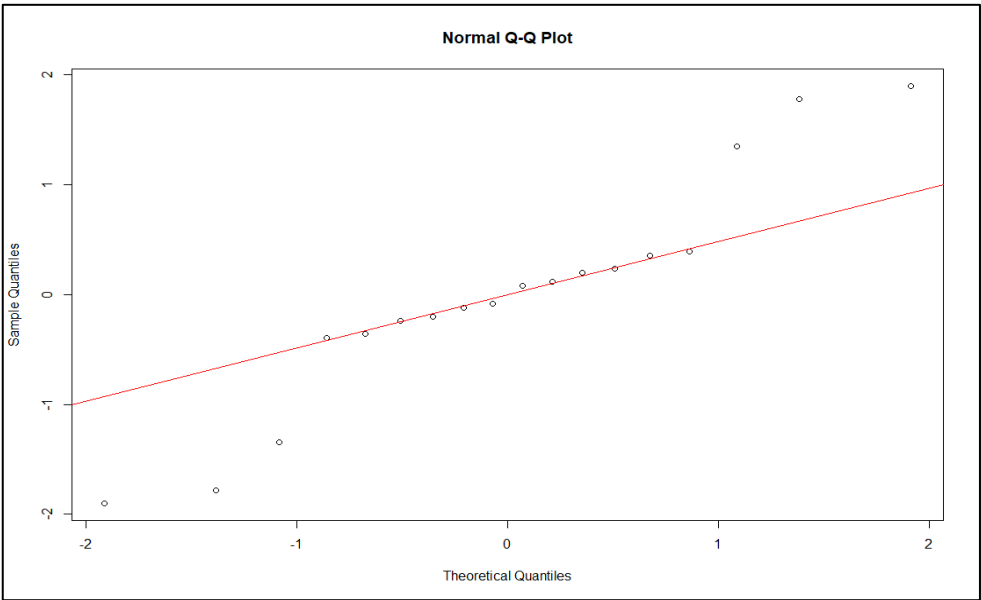
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	395475	197737	611.145	2.44e-10	***
FactorB_Tiempo	2	90237	45119	139.448	1.69e-07	***
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	7818	1954	6.041	0.0121	*
Residuals	9	2912	324			

*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 48 muestra el ANOVA de los 18 tratamientos y 2 réplicas, referente a la comparación de medias de cuadrados de la Semana 1 y 2, respecto a la reducción del parámetro DBO<sub>5</sub>, donde se aprecia que los efectos principales del Factor A y

B ( $2.44e^{-10}$  y  $1.69e^{-07}$ ) son significativamente independientes. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados a Tiempos en el intervalo de 5 a 30 minutos y Densidad de Corriente Eléctrica de 10 a 50 Amp/m<sup>2</sup> afectan a la variable respuesta con una interacción significativa eficiente de 0.0121.

**Figura 49**  
*Prueba de distribucion normal del pH*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

**Shapiro-Wilk normality test**

W = 0.92557, p-value = 0.1622

**Pruebas de homogeneidad de varianzas**

Estadística		
Método	de prueba	Valor p
Bartlett	11.91	0.155

La Figura 49 muestra que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de 0.1622 > 0.05 y la prueba Bartlett con Valor p = 0.155 > 0.05 determina la homogeneidad de varianzas.

**Figura 50**

*ANOVA con arreglo factorial, pH semanas 2-4*

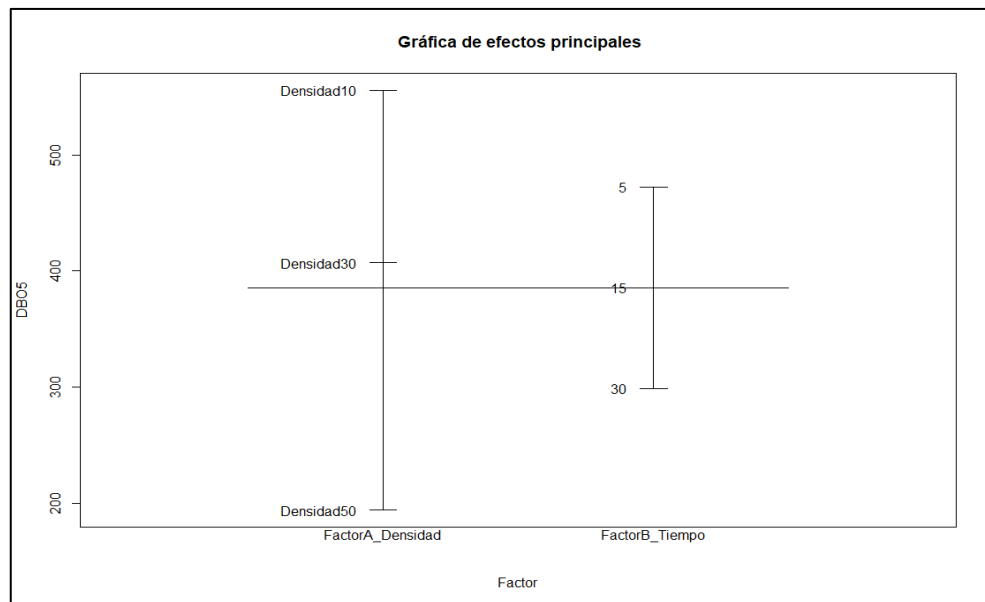
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	4.293	2.1467	67.318	3.86e-06	***
FactorB_Tiempo	2	0.436	0.2180	6.837	0.0156	*
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.393	0.0983	3.081	0.0742	.
Residuals	9	0.287	0.0319			

*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 50 muestra los efectos principales del pH respecto a los Factores A y B, estimando una probabilidad de  $3.86e^{-06}$  y 0.0156 que representa, que están activos o influyen significativamente de forma individual. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados no describe una interacción significativa eficiente ya que  $0.05 \leq 0.0742$ , es decir ambos factores no afectan en el tratamiento del pH.

### Figura 51

*Efectos principales de la DBO<sub>5</sub>, respecto a las semanas 2-4*

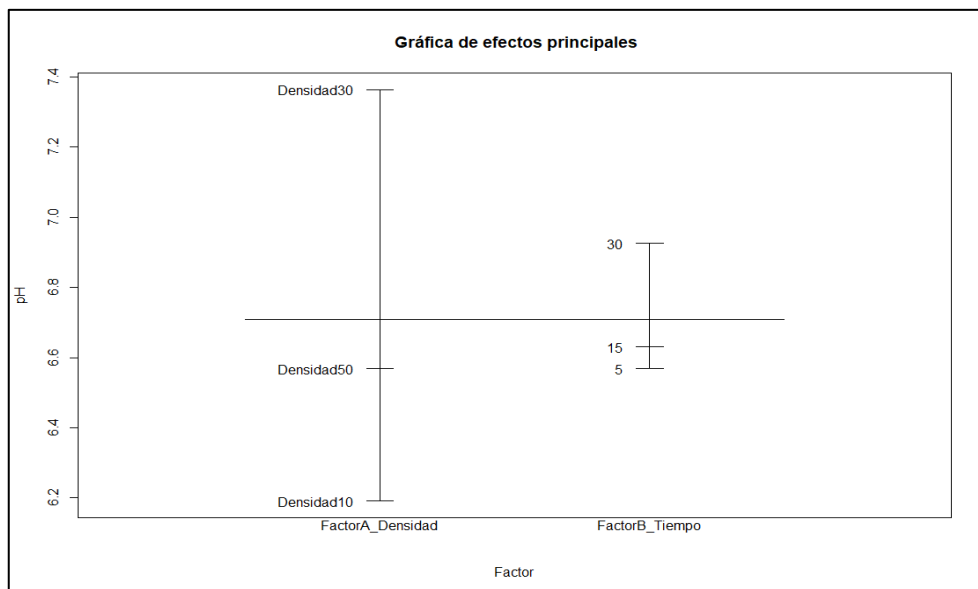


*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 51 muestra los efectos principales de los factores Tiempo y Densidad de CE, respecto al parámetro DBO<sub>5</sub>, donde se aprecia que la Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> tiene una tasa media de reducción mayor que las Densidades de 10 y 30 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en la reducción de la DBO<sub>5</sub>, donde el Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media de reducción mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general, se ubica en el intervalo de 400 a 300 mg DBO<sub>5</sub>/l y la media del factor Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> está por debajo de 200mg DBO<sub>5</sub>/l.

## Figura 52

*Efectos principales del pH, respecto a las semanas 2-4*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 52 muestra los efectos principales de los factores A y B, respecto al pH, donde se aprecia que a una Densidad de CE de 30 Amp/m<sup>2</sup> el pH muestra un incremento de H<sup>+</sup> por encima de 7.2 unidades de pH, que a comparación de las Densidades de 10 y 50 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en el incremento de H<sup>+</sup>, que en un Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general, se ubica en el intervalo de 6.6 a 6.8 unidades de pH.

## Semana 2-5

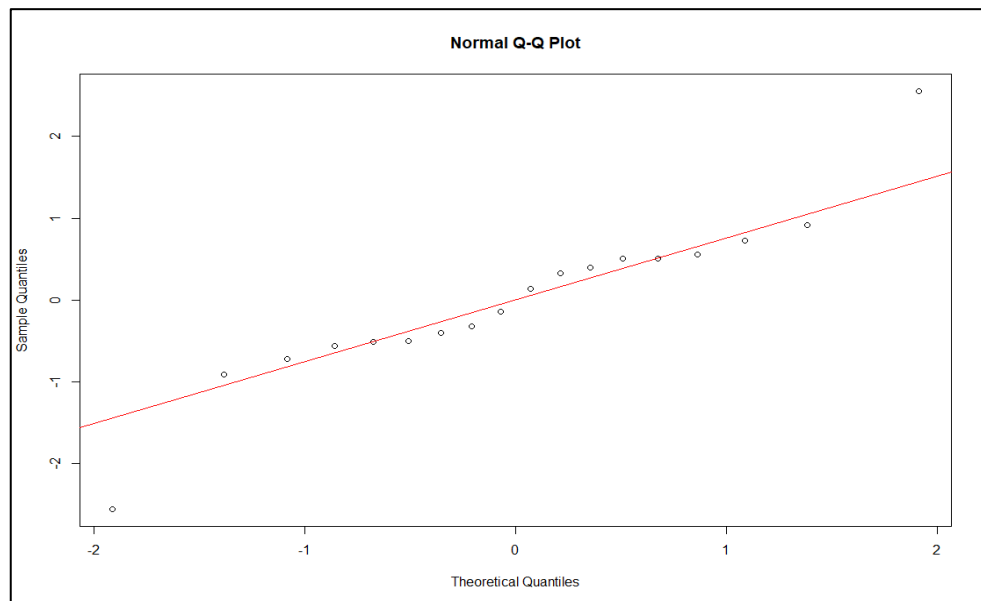
La tabla 16 presenta el análisis de datos de la Semana 2 y 5 (segundo y quinto tratamiento), registrando en el afluente un promedio de concentración de 672.45 de mg DBO<sub>5</sub>/l, operando a una Densidad de Corriente Eléctrica de 10, 30 y 50 Amp/m<sup>2</sup>, y Tiempos de 5, 15 y 30 minutos respectivamente, en la cámara de electrocoagulación.

**Tabla 14***Tratamiento de la DBO<sub>5</sub> y pH respecto a las semanas 2-5*

<b>Código</b>	<b><math>\rho</math> (Amp/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>% Remoción DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>pH</b>	<b>% Remoción pH</b>
M2	-	-	12.60	690.45	-	5.95	-
M5	-	-	12.68	654.45	-	5.90	-
Promedio			12.64	672.45	-	5.93	-
<b>TRATAMIENTO SEMANA 2</b>							
TRAT.02-T05-V12	10	5	12.80	625.21	9.45	6.06	1.85
TRAT.02-T05-V24	30	5	14.40	497.01	28.02	6.17	3.70
TRAT.02-T05-V36	50	5	15.60	307.20	55.51	6.29	5.71
TRAT.02-T15-V12	10	15	13.00	559.97	18.90	7.17	20.50
TRAT.02-T15-V24	30	15	15.30	400.29	42.02	7.46	25.38
TRAT.02-T15-V36	50	15	16.60	179.40	74.02	7.20	21.01
TRAT.02-T30-V12	10	30	13.20	494.73	28.35	6.39	7.39
TRAT.02-T30-V24	30	30	16.20	303.60	56.03	6.49	9.08
TRAT.02-T30-V36	50	30	17.60	51.65	92.52	6.89	15.80
<b>TRATAMIENTO SEMANA 5</b>							
TRAT.05-T05-V12	10	5	12.88	595.82	8.96	6.13	3.90
TRAT.05-T05-V24	30	5	14.48	476.23	27.23	6.24	5.76
TRAT.05-T05-V36	50	5	15.68	291.00	55.54	6.60	11.86
TRAT.05-T15-V12	10	15	13.08	537.19	17.92	7.34	24.41
TRAT.05-T15-V24	30	15	15.38	387.12	40.85	7.56	28.14
TRAT.05-T15-V36	50	15	16.68	169.90	74.05	7.65	29.66
TRAT.05-T30-V12	10	30	13.28	478.56	26.88	6.47	9.66
TRAT.05-T30-V24	30	30	16.28	298.00	54.46	6.43	8.98
TRAT.05-T30-V36	50	30	17.68	48.70	92.56	7.00	18.64

### Figura 53

Prueba de distribución normal de la  $DBO_5$



Nota. Tomado de Rstudio V. 4.02.

### Shapiro-Wilk normality test

$W = 0.95959$ ,  $p\text{-value} = 0.5937$

### Pruebas de homogeneidad de varianzas

Estadística		
Método	de prueba	Valor p
Bartlett	4.13	0.846

La figura 53 muestra que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de  $0.95959 > 0.05$  y la prueba Bartlett con Valor  $p = 0.846 > 0.05$  determina la homogeneidad de varianzas.

### Figura 54

ANOVA con arreglo factorial,  $DBO_5$  semana 2-5

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	439480	219740	266.32	9.83e-09	***
FactorB_Tiempo	2	76634	38317	46.44	1.81e-05	***
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	15612	3903	4.73	0.0248	*
Residuals	9	7426	825			

Nota. Tomado de Rstudio V. 4.02.

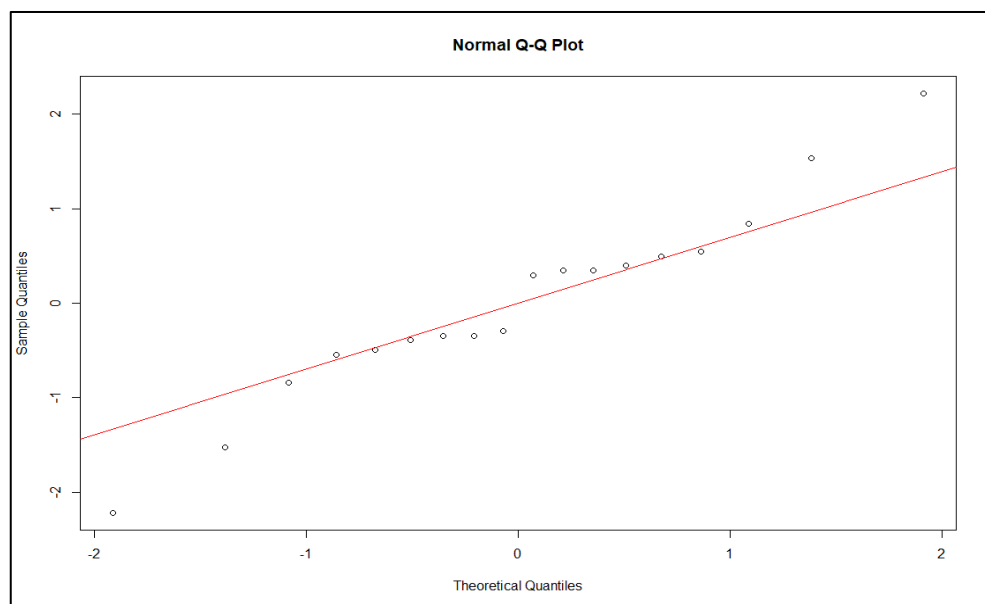


La figura 54 muestra el ANOVA de los 18 tratamientos y 2 réplicas, referente a la comparación de medias de cuadrados de la Semana 1 y 2, respecto a la reducción del parámetro  $\text{DBO}_5$ , donde se aprecia que los efectos principales del Factor A y B ( $9.83e^{-09}$  y  $1.81e^{-05}$ ) son significativamente independientes.

Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados a Tiempos en el intervalo de 5 a 30 minutos y Densidad de Corriente Eléctrica de 10 a 50 Amp/m<sup>2</sup> afectan a la variable respuesta con una interacción significativa eficiente de 0.0248.

### Figura 55

*Prueba de distribución normal del pH*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

### Shapiro-Wilk normality test

$W = 0.9651$ ,  $p\text{-value} = 0.7021$

### Pruebas de homogeneidad e varianzas

	Estadística	
Método de prueba		Valor p
Bartlett	6.63	0.577

La Figura 55 muestra que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de 0.7021  $> 0.05$  y la prueba Bartlett con Valor p = 0.577  $> 0.05$  determina la homogeneidad de varianzas.

## Figura 56

ANOVA con arreglo factorial, pH semanas 2-5

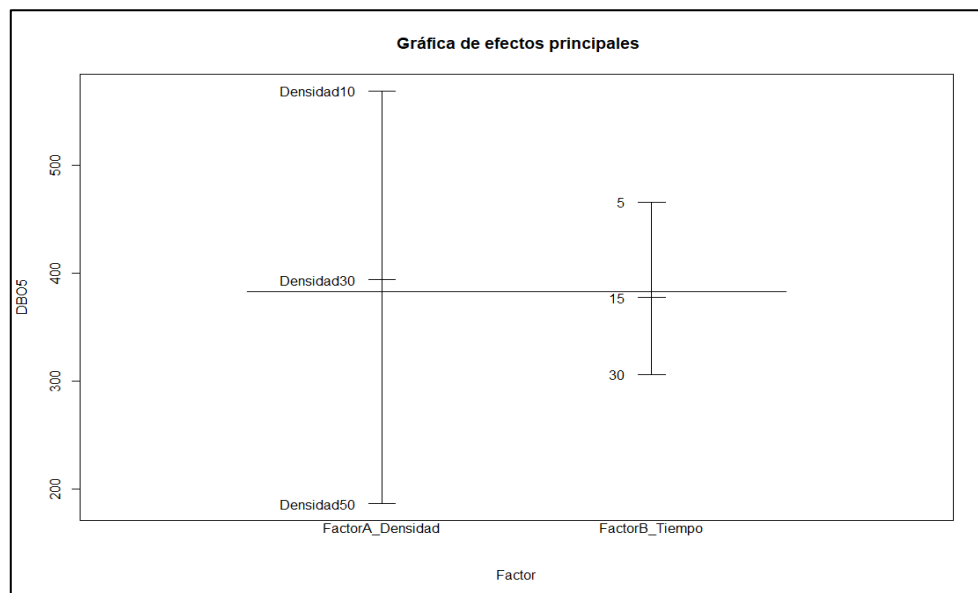
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	4.134	2.0669	100.715	6.92e-07	***
FactorB_Tiempo	2	0.364	0.1819	8.862	0.00746	**
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.166	0.0415	2.023	0.17465	
Residuals	9	0.185	0.0205			

Nota. Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 56 muestra los efectos principales del pH respecto a los Factores A y B, estimando una probabilidad de  $6.92e^{-07}$  y 0.00746 que representa, que están activos o influyen significativamente de forma individual. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados no describe una interacción significativa eficiente ya que  $0.05 \leq 0.017465$ , es decir ambos factores no afectan en el tratamiento del pH.

## Figura 57

Efectos principales de  $DBO_5$ , respecto a las semanas 2-5



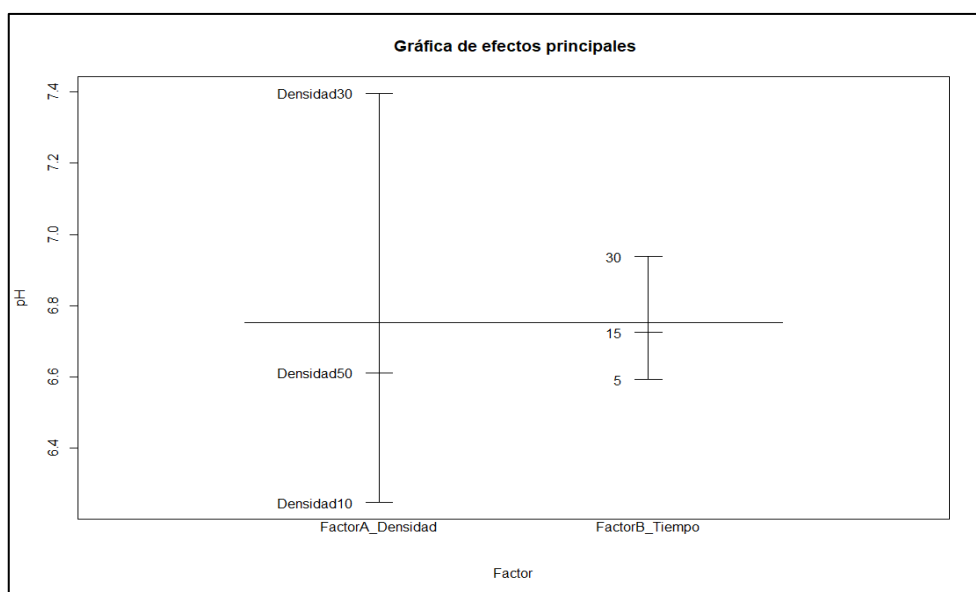
Nota. Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 57 muestra los efectos principales de los factores Tiempo y Densidad de CE, respecto al parámetro  $DBO_5$ , donde se aprecia que la Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> tiene una tasa media de reducción mayor que las Densidades de 10 y 30 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en la reducción de la  $DBO_5$ , donde el Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media de reducción mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general,

se ubica en el intervalo de 400 a 300 mg DBO<sub>5</sub>/l y la media del factor Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> está por debajo de 200mg DBO<sub>5</sub>/l.

### Figura 58

*Efectos principales de pH, respecto a las semana 2-5*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 58 muestra los efectos principales de los factores A y B, respecto al pH, donde se aprecia que a una Densidad de CE de 30 Amp/m<sup>2</sup> el pH muestra un incremento de H<sup>+</sup> cercano a 7.4 unidades de pH que a comparación de las Densidades de 10 y 50 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en el incremento de H<sup>+</sup>, que en un Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general, se ubica en el intervalo de 6.6 a 6.8 unidades de pH.

### Semana 3-4

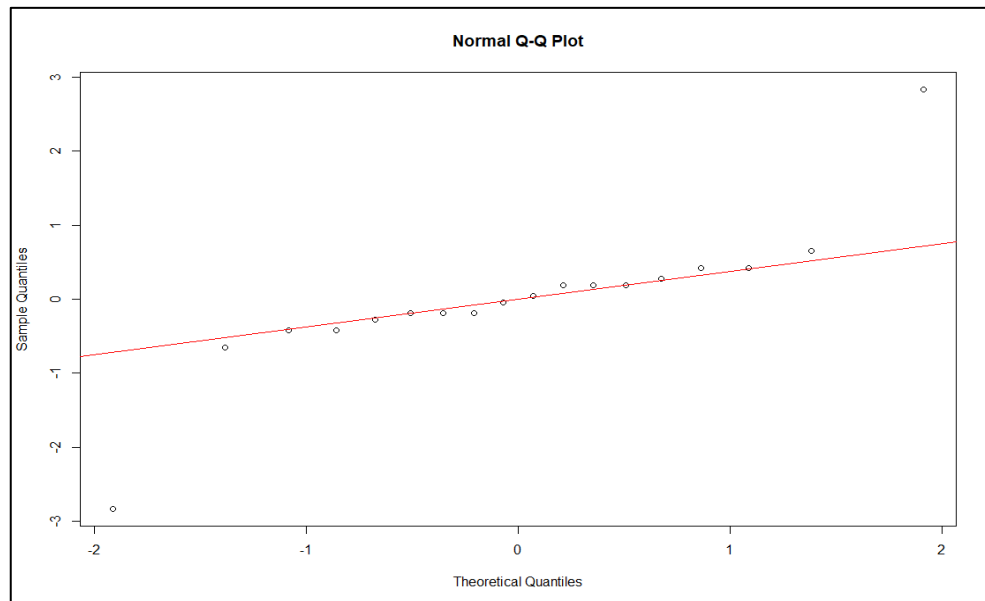
La tabla 17 presenta el análisis de datos de la Semana 3 y 4 (tercera y cuarto tratamiento), registrando en el afluente un promedio de concentración de 648.33 de mg DBO<sub>5</sub>/l, operando a una Densidad de Corriente Eléctrica de 10, 30 y 50 Amp/m<sup>2</sup>, y Tiempos de 5, 15 y 30 minutos respectivamente, en la cámara de electrocoagulación.

**Tabla 15***Tratamiento de la DBO<sub>5</sub> y pH respecto a las semanas 3-4*

<b>Código</b>	<b><math>\rho</math> (Amp/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>% Remoción DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>pH</b>	<b>% Incremento pH</b>
M3	-	-	12.85	653.71	-	6.00	-
M4	-	-	12.01	642.95	-	5.90	-
Promedio			12.43	648.33	-	5.95	-
<b>TRATAMIENTO SEMANA 3</b>							
TRAT.03-To5-V12	10	5	13.05	605.03	7.45	6.05	0.83
TRAT.03-To5-V24	30	5	14.69	495.39	24.22	6.20	3.33
TRAT.03-To5-V36	50	5	15.91	320.10	51.03	6.25	4.17
TRAT.03-T15-V12	10	15	13.25	556.35	14.89	7.22	20.33
TRAT.03-T15-V24	30	15	15.61	416.23	36.33	7.38	23.00
TRAT.03-T15-V36	50	15	16.93	208.90	68.04	7.59	26.50
TRAT.03-T30-V12	10	30	13.45	507.67	22.34	6.50	8.33
TRAT.03-T30-V24	30	30	16.53	337.10	48.44	6.07	1.17
TRAT.03-T30-V36	50	30	17.95	97.710	85.05	7.10	18.33
<b>TRATAMIENTO SEMANA 4</b>							
TRAT.04-To5-V12	10	5	13.05	597.09	7.13	6.15	4.24
TRAT.04-To5-V24	30	5	14.67	490.27	23.75	6.22	5.42
TRAT.04-To5-V36	50	5	15.88	317.80	50.57	6.26	6.10
TRAT.04-T15-V12	10	15	13.25	551.23	14.27	7.27	23.22
TRAT.04-T15-V24	30	15	15.58	413.93	35.62	7.40	25.42
TRAT.04-T15-V36	50	15	16.89	209.40	67.43	7.68	30.17
TRAT.04-T30-V12	10	30	13.45	505.37	21.40	6.37	7.97
TRAT.04-T30-V24	30	30	16.49	337.60	47.49	6.04	2.37
TRAT.04-T30-V36	50	30	17.90	101.10	84.28	7.23	22.54

**Figura 59**

*Prueba de distribución normal de la DBO<sub>5</sub>*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

**Shapiro-Wilk normality test**

W = 0.7856, p-value = 0.0009577

**Pruebas de homogeneidad de varianza**

	Estadística	
Método	de prueba	Valor p
Bartlett	6.98	0.539

La figura 59 muestra que los datos no provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de  $0.0009577 > 0.05$  y la prueba Bartlett con Valor  $p = 0.539 > 0.05$  determina la homogeneidad de varianzas.

**Figura 60**

*ANOVA con arreglo factorial, semana 3-4*

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad	2	373479	186740	2495.67	4.45e-13 ***
FactorB_Tiempo	2	73644	36822	492.11	6.42e-10 ***
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	8079	2020	26.99	5.01e-05 ***
Residuals	9	673	75		

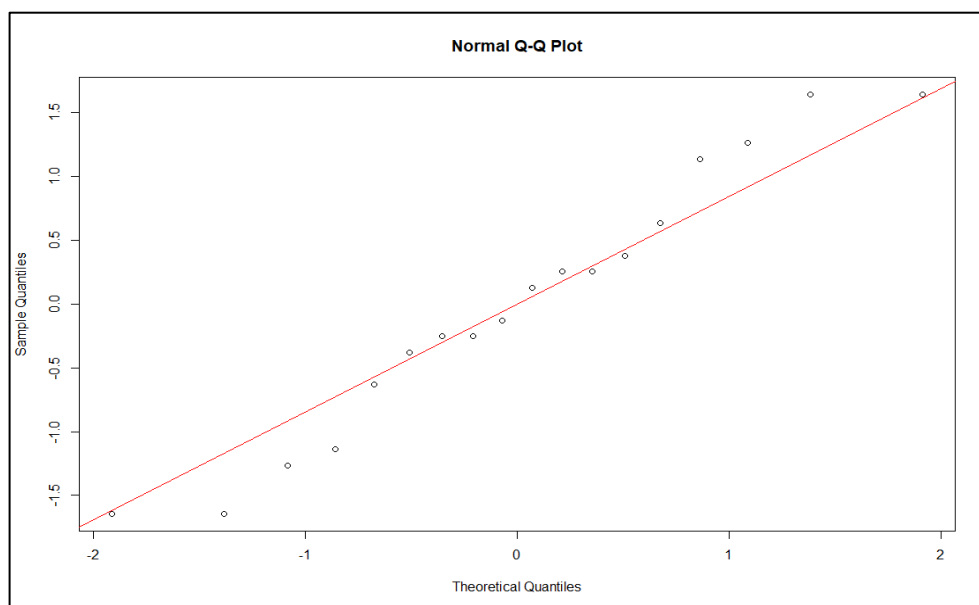
*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 60 muestra el ANOVA de los 18 tratamientos y 2 réplicas, referente a la comparación de medias de cuadrados de la Semana 1 y 2, respecto a la reducción del parámetro DBO<sub>5</sub>, donde se aprecia que los efectos principales del Factor A y

B ( $4.45e^{-13}$  y  $6.42e^{-10}$ ) son significativamente independientes. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados a Tiempos en el intervalo de 5 a 30 minutos y Densidad de Corriente Eléctrica de 10 a 50 Amp/m<sup>2</sup> afectan a la variable respuesta con una interacción significativa eficiente de  $5.01e^{-05}$ .

### Figura 61

*Prueba de distribucion normal del pH*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

### Shapiro-Wilk normality test

W = 0.95624, p-value = 0.531

### Pruebas de homogeneidad de varianzas

Estadística		
Método	de prueba	Valor p
Bartlett	7.12	0.523

La figura 61 muestra que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de  $0.531 > 0.05$  y la prueba Bartlett con Valor p =  $0.523 > 0.05$  determina la homogeneidad de varianzas.

**Figura 62**

*ANOVA con arreglo factorial, pH semanas 3-4*

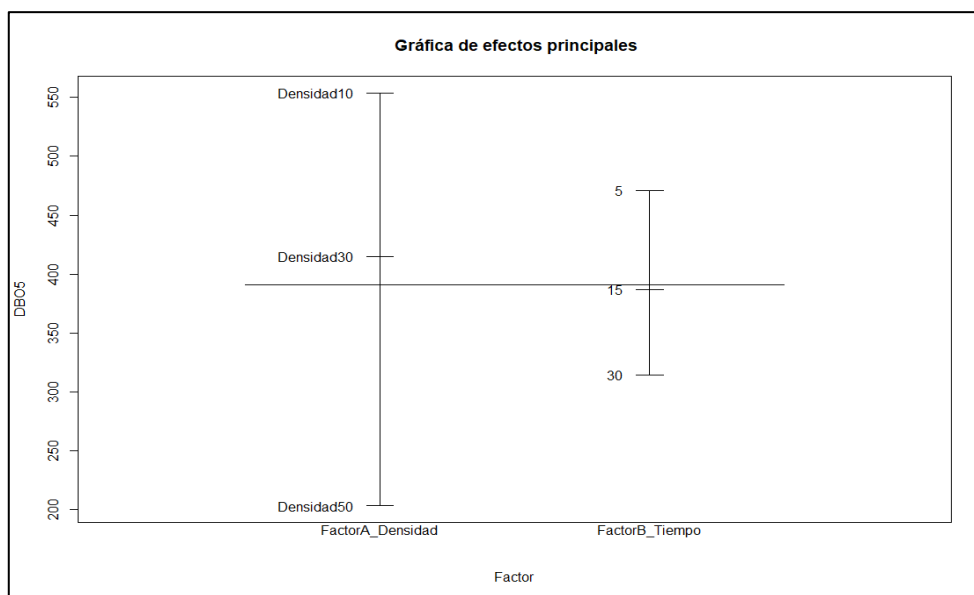
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	4.834	2.4170	774.14	8.48e-11	***
FactorB_Tiempo	2	0.800	0.4001	128.16	2.44e-07	***
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.654	0.1634	52.33	3.12e-06	***
Residuals	9	0.028	0.0031			

*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 62 muestra los efectos principales del pH respecto a los Factores A y B, estimando una probabilidad de  $8.48e^{-13}$  y  $2.44e^{-07}$  que representa, que están activos o influyen significativamente de forma individual. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados describe una interacción significativa eficiente de  $3.12e^{-06}$ , es decir ambos factores afectan en el tratamiento del pH.

**Figura 63**

*Efectos principales de la DBO<sub>5</sub>, respecto a las semanas 3-4*

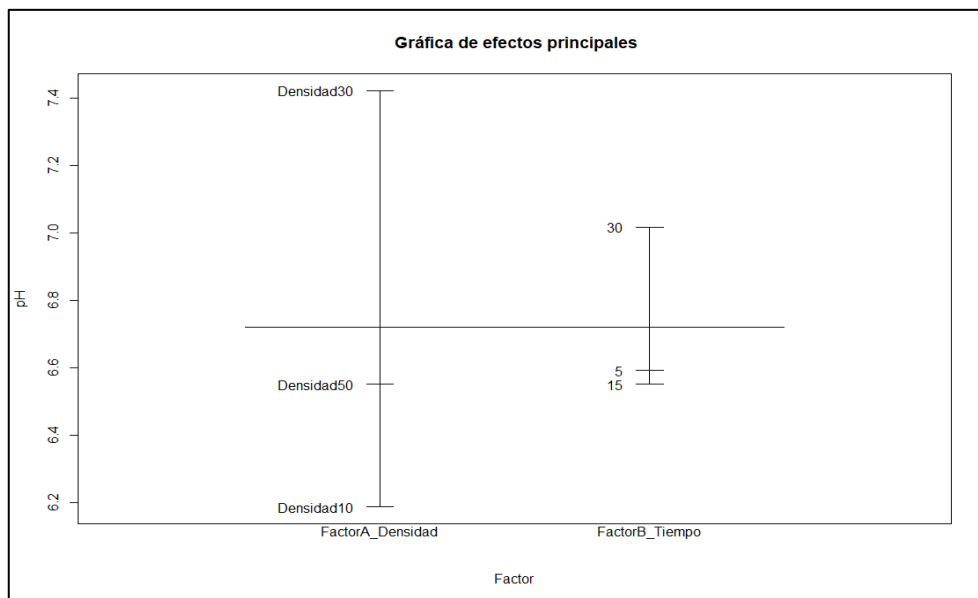


*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 63 muestra los efectos principales de los factores Tiempo y Densidad de CE, respecto al parámetro DBO<sub>5</sub>, donde se aprecia que la Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> tiene una tasa media de reducción mayor que las Densidades de 10 y 30 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en la reducción de la DBO<sub>5</sub>, donde el Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media de reducción mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general, se ubica en el intervalo de 400 a 350 mg DBO<sub>5</sub>/l y la media del factor Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> está por encima de 200mg DBO<sub>5</sub>/l.

## Figura 64

*Efectos principales del pH, respecto a las semanas 3-4*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 64 muestra los efectos principales de los factores A y B, respecto al pH, donde se aprecia que a una Densidad de CE de 30 Amp/m<sup>2</sup> el pH muestra un incremento de H<sup>+</sup> por encima de 7.4 unidades de pH que a comparación de las Densidades de 10 y 50 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en el incremento de H<sup>+</sup>, que en un Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general, se ubica en el intervalo de 6.6 a 6.8 unidades de pH.

## Semana 3-5

La tabla 18 presenta el análisis de datos de la Semana 3 y 5 (primer y tercer tratamiento), registrando en el afluente un promedio de concentración de 654.08 de mg DBO<sub>5</sub>/l, operando a una Densidad de Corriente Eléctrica de 10, 30 y 50 Amp/m<sup>2</sup>, y Tiempos de 5, 15 y 30 minutos respectivamente, en la cámara de electrocoagulación.

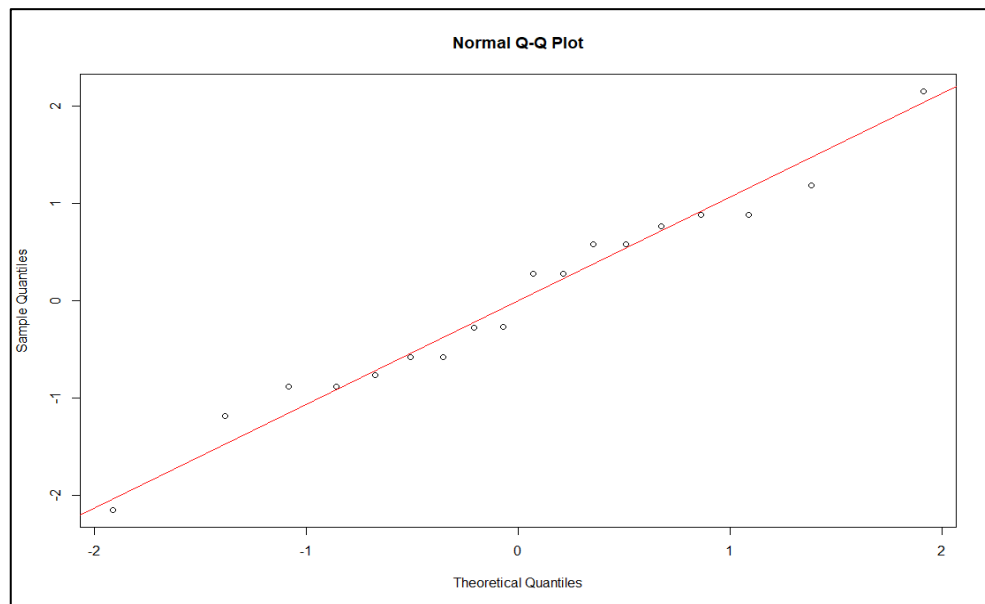


**Tabla 16***Tratamiento de la DBO<sub>5</sub> y pH respecto a las semanas 3-5*

<b>Código</b>	<b><math>\rho</math> (Amp/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>% Remoción DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>pH</b>	<b>% Incremento pH</b>
M3	-	-	12.85	653.71	-	6.00	-
M5	-	-	12.68	654.45	-	5.90	-
Promedio			12.77	654.08	-	5.95	-
<b>TRATAMIENTO SEMANA 3</b>							
TRAT.03-To5-V12	10	5	13.05	605.03	7.45	6.05	0.83
TRAT.03-To5-V24	30	5	14.69	495.39	24.22	6.20	3.33
TRAT.03-To5-V36	50	5	15.91	320.1	51.03	6.25	4.17
TRAT.03-T15-V12	10	15	13.25	556.35	14.89	7.22	20.33
TRAT.03-T15-V24	30	15	15.61	416.23	36.33	7.38	23.00
TRAT.03-T15-V36	50	15	16.93	208.9	68.04	7.59	26.50
TRAT.03-T30-V12	10	30	13.45	507.67	22.34	6.50	8.33
TRAT.03-T30-V24	30	30	16.53	337.1	48.44	6.07	1.17
TRAT.03-T30-V36	50	30	17.95	97.71	85.05	7.10	18.33
<b>TRATAMIENTO SEMANA 5</b>							
TRAT.05-To5-V12	10	5	12.88	595.82	8.96	6.13	3.90
TRAT.05-To5-V24	30	5	14.48	476.23	27.23	6.24	5.76
TRAT.05-To5-V36	50	5	15.68	291.00	55.54	6.60	11.86
TRAT.05-T15-V12	10	15	13.08	537.19	17.92	7.34	24.41
TRAT.05-T15-V24	30	15	15.38	387.12	40.85	7.56	28.14
TRAT.05-T15-V36	50	15	16.68	169.90	74.05	7.65	29.66
TRAT.05-T30-V12	10	30	13.28	478.56	26.88	6.47	9.66
TRAT.05-T30-V24	30	30	16.28	298.00	54.46	6.43	8.98
TRAT.05-T30-V36	50	30	17.68	48.70	92.56	7.00	18.64

## Figura 65

Prueba de distribución normal de la  $DBO_5$



Nota. Tomado de Rstudio V. 4.02.

### Shapiro-Wilk normality test

$W = 0.97853$ ,  $p\text{-value} = 0.9336$

### Pruebas de homogeneidad de varianzas

	Estadística	
	Método de prueba	Valor p
	Bartlett	2.23 0.973

La figura 65 muestra que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de  $0.9336 > 0.05$  y la prueba Bartlett con  $\text{Valor } p = 0.973 > 0.05$  determina la homogeneidad de varianzas.

## Figura 66

ANOVA con arreglo factorial,  $DBO_5$  semanas 3-5

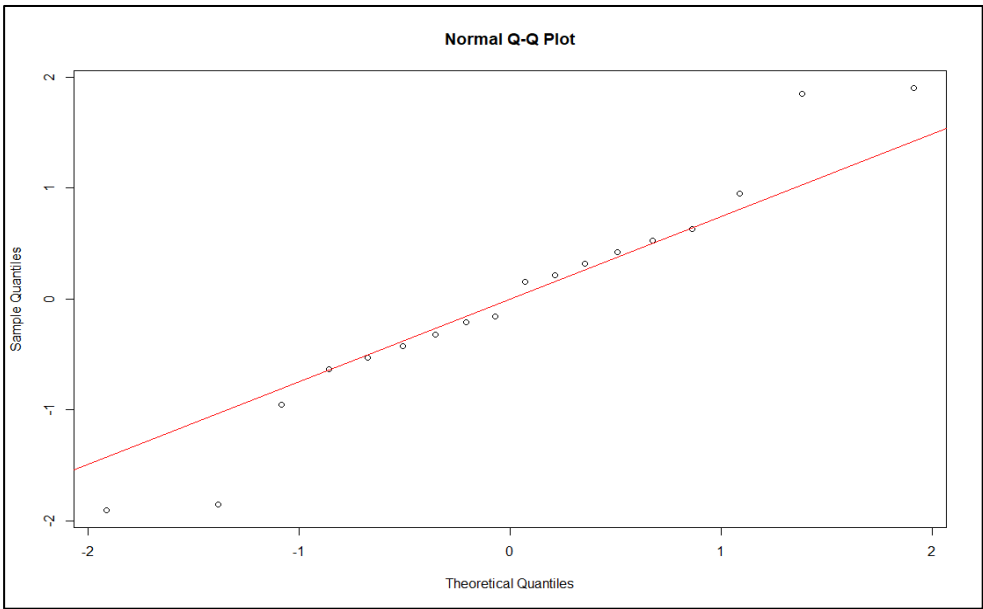
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	415558	207779	287.41	7.01e-09	***
FactorB_Tiempo	2	61829	30914	42.76	2.54e-05	***
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	15212	3803	5.26	0.0183	*
Residuals	9	6506	723			

Nota. Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 66 muestra el ANOVA de los 18 tratamientos y 2 réplicas, referente a la comparación de medias de cuadrados de la Semana 1 y 2, respecto a la reducción del parámetro DBO<sub>5</sub>, donde se aprecia que los efectos principales del Factor A y B ( $7.01e^{-09}$  y  $2.54e^{-05}$ ) son significativamente independientes. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados a Tiempos en el intervalo de 5 a 30 minutos y Densidad de Corriente Eléctrica de 10 a 50 Amp/m<sup>2</sup> afectan a la variable respuesta con una interacción significativa eficiente de 0.0183.

**Figura 67**

*Prueba de distribucion normal del pH*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

**Shapiro-Wilk normality test**

W = 0.96118, p-value = 0.6246

**Pruebas de homogeneidad de varianzas**

Estadística		
Método	de prueba	Valor p
Bartlett	7.70	0.463

La Figura 67 muestra que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de 0.6246 > 0.05 y la prueba Bartlett con Valor p = 0.463 > 0.05 determina la homogeneidad de varianzas.

**Figura 68**

*ANOVA con arreglo factorial, pH semanas 3-5*

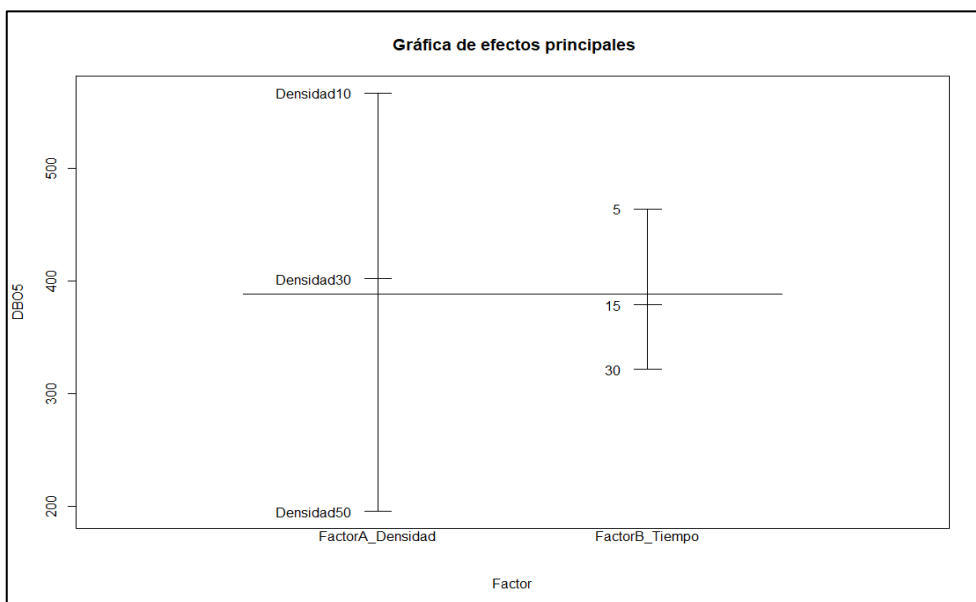
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	4.666	2.3331	130.666	2.24e-07	***
FactorB_Tiempo	2	0.640	0.3199	17.914	0.000728	***
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.267	0.0667	3.735	0.046628	*
Residuals	9	0.161	0.0179			

*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 68 muestra los efectos principales del pH respecto a los Factores A y B, estimando una probabilidad de  $2.44e^{-09}$  y 0.000728 que representa, que están activos o influyen significativamente de forma individual. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados describe una interacción significativa eficiente de 0.046628, es decir ambos factores afectan en el tratamiento del pH.

**Figura 69**

*Efectos principales de la DBO<sub>5</sub>, respecto a las semanas 3-5*



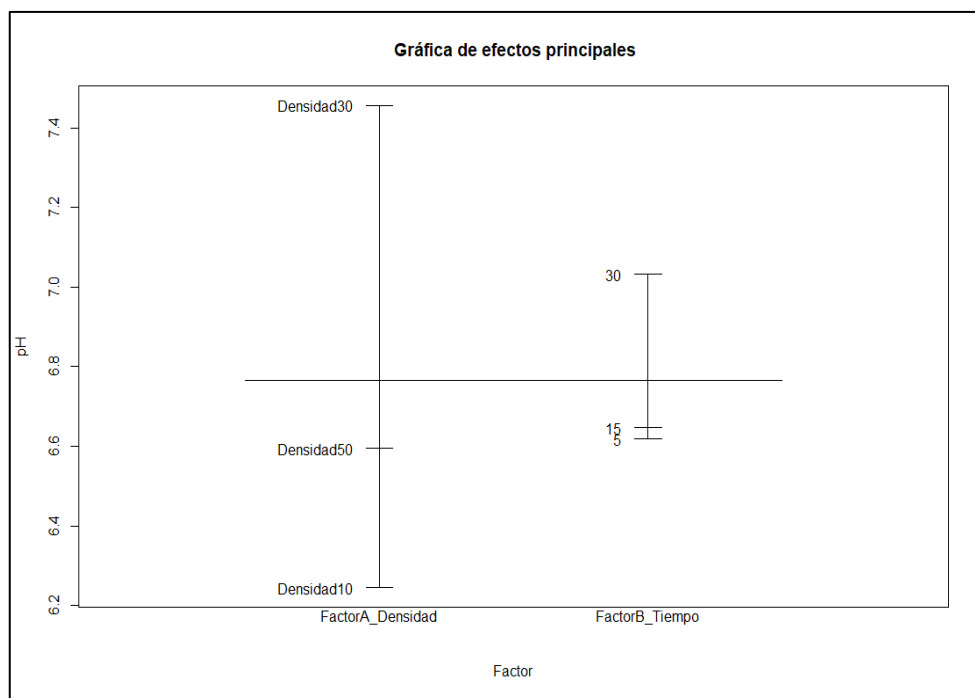
*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 69 muestra los efectos principales de los factores Tiempo y Densidad de CE, respecto al parámetro DBO<sub>5</sub>, donde se aprecia que la Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> tiene una tasa media de reducción mayor que las Densidades de 10 y 30 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en la reducción de la DBO<sub>5</sub>, donde el Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media de reducción mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general,

se ubica en el intervalo de 400 a 300 mg DBO<sub>5</sub>/l y la media del factor Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> está por debajo de 200mg DBO<sub>5</sub>/l.

### Figura 70

*Efectos principales del pH, respecto a las semanas 3-5*



La figura 70 muestra los efectos principales de los factores A y B, respecto al pH, donde se aprecia que a una Densidad de CE de 30 Amp/m<sup>2</sup> el pH muestra un incremento de H<sup>+</sup> por encima de 7.4 unidades de pH, que a comparación de las Densidades de 10 y 50 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en el incremento de H<sup>+</sup>, que en un Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general, se ubica en el intervalo de 6.6 a 6.8 unidades de pH.

### Semana 4-5

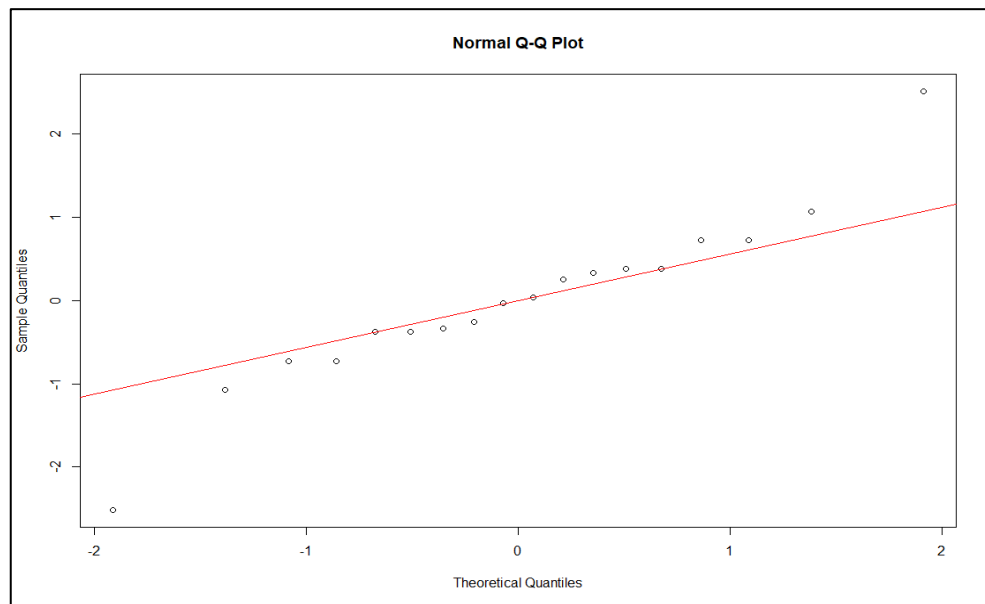
La Tabla 19 presenta el análisis de datos de la Semana 4 y 5 (cuarto y quinto tratamiento), registrando en el afluente un promedio de concentración de 648.70 de mg DBO<sub>5</sub>/l, operando a una Densidad de Corriente Eléctrica de 10, 30 y 50 Amp/m<sup>2</sup>, y Tiempos de 5, 15 y 30 minutos respectivamente, en la cámara de electrocoagulación.

**Tabla 17***Tratamiento de la DBO<sub>5</sub> y pH respecto a las semanas 4-5*

<b>Código</b>	<b><math>\rho</math> (Amp/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>% Remoción DBO<sub>5</sub> (mg/l)</b>	<b>pH</b>	<b>% Incremento pH</b>
M4	-	-	12.01	642.95	-	5.90	-
M5	-	-	12.68	654.45	-	5.97	-
Promedio			12.35	648.70	-	5.94	-
<b>TRATAMIENTO SEMANA 4</b>							
TRAT.04-T05-V12	10	5	12.21	597.09	7.13	6.15	4.24
TRAT.04-T05-V24	30	5	13.83	490.27	23.75	6.22	5.42
TRAT.04-T05-V36	50	5	15.04	317.8	50.57	6.26	6.10
TRAT.04-T15-V12	10	15	12.41	551.23	14.27	7.27	23.22
TRAT.04-T15-V24	30	15	14.74	413.93	35.62	7.40	25.42
TRAT.04-T15-V36	50	15	16.05	209.4	67.43	7.68	30.17
TRAT.04-T30-V12	10	30	12.61	505.37	21.40	6.37	7.97
TRAT.04-T30-V24	30	30	15.65	337.6	47.49	6.04	2.37
TRAT.04-T30-V36	50	30	17.06	101.1	84.28	7.23	22.54
<b>TRATAMIENTO SEMANA 5</b>							
TRAT.05-T05-V12	10	5	12.88	595.82	8.96	6.13	3.90
TRAT.05-T05-V24	30	5	14.48	476.23	27.23	6.24	5.76
TRAT.05-T05-V36	50	5	15.68	291.00	55.54	6.60	11.86
TRAT.05-T15-V12	10	15	13.08	537.19	17.92	7.34	24.41
TRAT.05-T15-V24	30	15	15.38	387.12	40.85	7.56	28.14
TRAT.05-T15-V36	50	15	16.68	169.90	74.05	7.65	29.66
TRAT.05-T30-V12	10	30	13.28	478.56	26.88	6.47	9.66
TRAT.05-T30-V24	30	30	16.28	298.00	54.46	6.43	8.98
TRAT.05-T30-V36	50	30	17.68	48.70	92.56	7.00	18.64

**Figura 71**

*Prueba de distribución normal de la DBO<sub>5</sub>*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

**Shapiro-Wilk normality test**

W = 0.97822, p-value = 0.9298

**Pruebas de homogeneidad de varianzas**

Estadística		
Método	de prueba	Valor p
Bartlett	5.96	0.651

La figura 71 muestra que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de 0.9298 > 0.05 y la prueba Bartlett con Valor p = 0.651 > 0.05 determina la homogeneidad de varianzas.

**Figura 72**

*ANOVA con arreglo factorial, pH semanas 4-5*

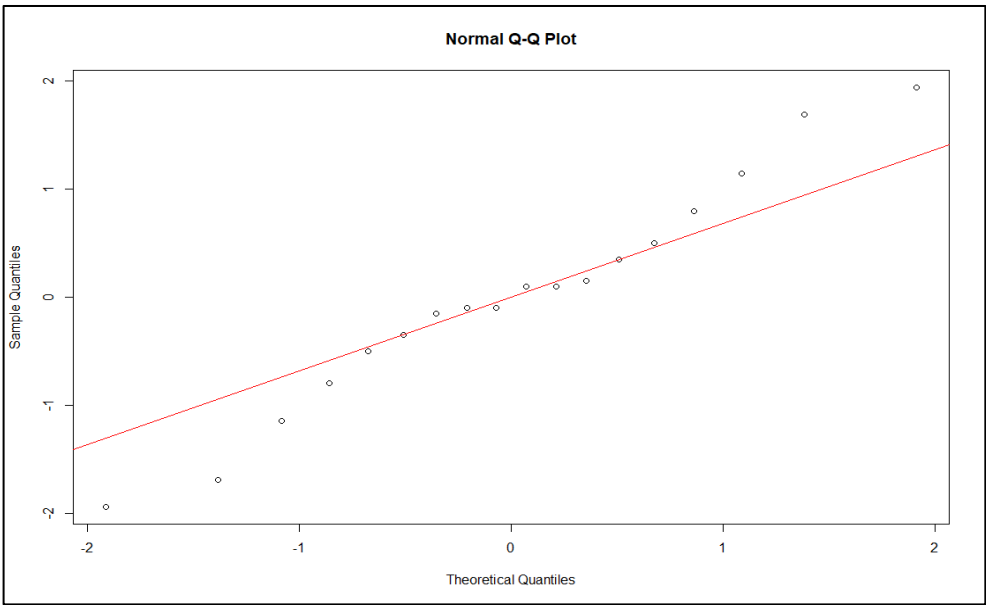
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	396359	198180	289.345	6.81e-09	***
FactorB_Tiempo	2	58929	29465	43.019	2.47e-05	***
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	15560	3890	5.679	0.0146	*
Residuals	9	6164	685			

*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 47 muestra el ANOVA de los 18 tratamientos y 2 réplicas, referente a la comparación de medias de cuadrados de la Semana 1 y 2, respecto a la reducción del parámetro DBO<sub>5</sub>, donde se aprecia que los efectos principales del Factor A y B ( $6.81e^{-09}$  y  $2.47e^{-05}$ ) son significativamente independientes. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados a Tiempos en el intervalo de 5 a 30 minutos y Densidad de Corriente Eléctrica de 10 a 50 Amp/m<sup>2</sup> afectan a la variable respuesta con una interacción significativa eficiente de 0.0146.

**Figura 73**

*Prueba de distribucion normal de datos del pH*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

**Shapiro-Wilk normality test**

W = 0.97414, p-value = 0.8709

**Pruebas de homogeneidad de varianzas**

Estadística		
Método	de prueba	Valor p
Bartlett	10.46	0.234

La figura 73 muestra que los datos provienen de una muestra distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de 0.8709 > 0.05 y la prueba Bartlett con Valor p = 0.234 > 0.05 determina la homogeneidad de varianzas.



**Figura 74**

*ANOVA con arreglo factorial, pH semanas 4-5*

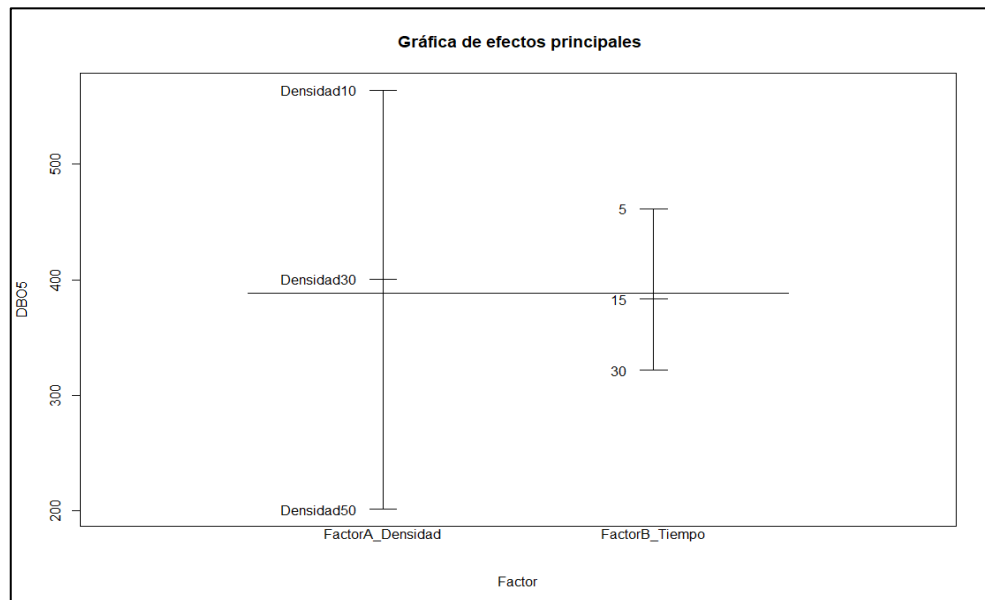
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	14.926	7.463	370.264	2.28e-09	***
FactorB_Tiempo	2	0.759	0.380	18.829	0.000608	***
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.320	0.080	3.967	0.039954	*
Residuals	9	0.181	0.020			

*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 74 muestra los efectos principales del pH respecto a los Factores A y B, estimando una probabilidad de 2.248 y 0.000608 que representa, que están activos o influyen significativamente de forma individual. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados describe una interacción significativa eficiente de 0.039954, es decir ambos factores afectan en el tratamiento del pH.

**Figura 75**

*Efectos principales de la DBO<sub>5</sub>, respecto a las semanas 4-5*



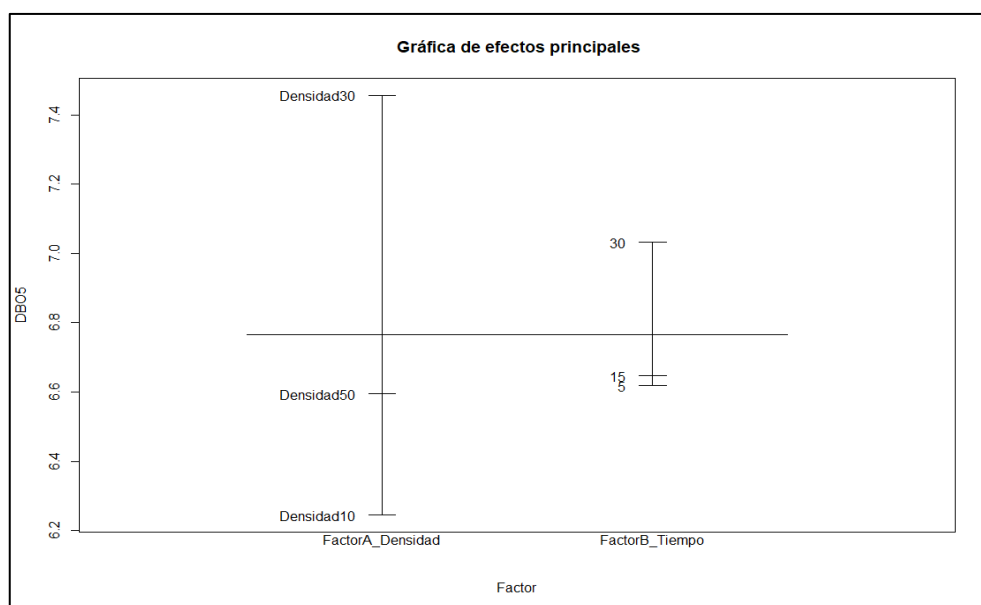
*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 75 muestra los efectos principales de los factores Tiempo y Densidad de CE, respecto al parámetro DBO<sub>5</sub>, donde se aprecia que la Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> tiene una tasa media de reducción mayor que las Densidades de 10 y 30 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en la reducción de la DBO<sub>5</sub>, donde el Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media de reducción mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general,

se ubica en el intervalo de 400 a 300 mg DBO<sub>5</sub>/l y la media del factor Densidad de CE de 50 Amp/m<sup>2</sup> está por encima de 200mg DBO<sub>5</sub>/l.

### Figura 76

*Efectos principales del pH, respecto a las semanas 4-5*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 76 muestra los efectos principales de los factores A y B, respecto al pH, donde se aprecia que a una Densidad de CE de 30 Amp/m<sup>2</sup> el pH muestra un incremento de H<sup>+</sup> por encima de 7.4 unidades de pH, que a comparación de las Densidades de 10 y 50 Amp/m<sup>2</sup>. El tiempo también afecta en el incremento de H<sup>+</sup>, que en un Tiempo de 30 minutos tuvo una tasa media mayor que los Tiempos de 5 y 15 minutos respectivamente. La línea de referencia representa la media general, se ubica en el intervalo de 6.6. a 6.8 unidades de pH.

### Resultados Generales

#### Tratamiento de la DBO<sub>5</sub>

La Tabla 20 presenta el análisis general de los datos de las 5 semanas, registrando 45 tratamientos, operando a una Densidad de CE de 10, 30 y 50 Amp/m<sup>2</sup>, y Tiempos de 5, 15 y 30 minutos respectivamente, en la cámara de electrocoagulación.

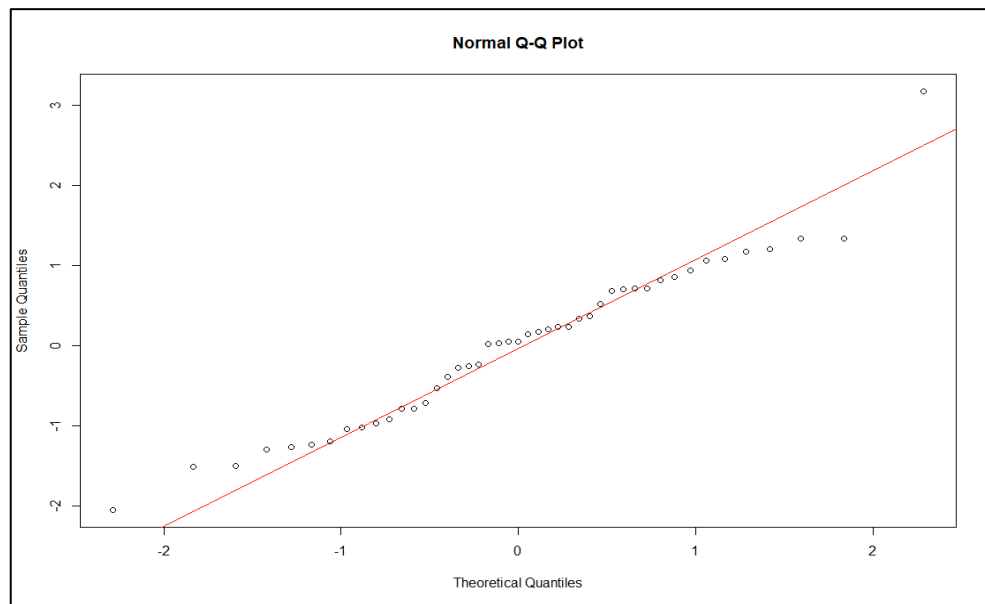
**Tabla 18***Tratamiento de la DBO<sub>5</sub> respecto a las 5 semanas*

Nº	Código	Volts	Densidad (Amp/m <sup>2</sup> )	Tiempo (min)	T (°C)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	% Remoción DBO <sub>5</sub> (mg/L)
1	TRAT-T05-V12	12	10	5	13.10	626.77	7.66
2	TRAT-T05-V24	24	30	5	14.72	513.78	24.31
3	TRAT-T05-V36	36	50	5	15.93	335.15	50.63
4	TRAT-T15-V12	12	10	15	13.30	574.74	15.33
5	TRAT-T15-V24	24	30	15	15.63	431.27	36.47
6	TRAT-T15-V36	36	50	15	16.94	220.60	67.50
7	TRAT-T30-V12	12	10	30	13.50	522.71	22.99
8	TRAT-T30-V24	24	30	30	16.54	348.76	48.62
9	TRAT-T30-V36	36	50	30	17.95	106.05	84.38
10	TRAT-T05-V12	12	10	5	12.80	625.21	9.45
11	TRAT-T05-V24	24	30	5	14.40	497.01	28.02
12	TRAT-T05-V36	36	50	5	15.60	307.17	55.51
13	TRAT-T15-V12	12	10	15	13.00	559.97	18.90
14	TRAT-T15-V24	24	30	15	15.30	400.29	42.02
15	TRAT-T15-V36	36	50	15	16.60	179.41	74.02
16	TRAT-T30-V12	12	10	30	13.20	494.73	28.35
17	TRAT-T30-V24	24	30	30	16.20	303.57	56.03
18	TRAT-T30-V36	36	50	30	17.60	51.65	92.52
19	TRAT-T05-V12	12	10	5	13.05	605.03	7.45
20	TRAT-T05-V24	24	30	5	14.69	495.39	24.22
21	TRAT-T05-V36	36	50	5	15.91	320.11	51.03
22	TRAT-T15-V12	12	10	15	13.25	556.35	14.89
23	TRAT-T15-V24	24	30	15	15.61	416.23	36.33
24	TRAT-T15-V36	36	50	15	16.93	208.91	68.04
25	TRAT-T30-V12	12	10	30	13.45	507.67	22.34
26	TRAT-T30-V24	24	30	30	16.53	337.07	48.44
27	TRAT-T30-V36	36	50	30	17.95	97.71	85.05

28	TRAT-T05-V12	12	10	5	13.05	597.09	7.13
29	TRAT-T05-V24	24	30	5	14.67	490.27	23.75
30	TRAT-T05-V36	36	50	5	15.88	317.81	50.57
31	TRAT-T15-V12	12	10	15	13.25	551.23	14.27
32	TRAT-T15-V24	24	30	15	15.58	413.93	35.62
33	TRAT-T15-V36	36	50	15	16.89	209.43	67.43
34	TRAT-T30-V12	12	10	30	13.45	505.37	21.40
35	TRAT-T30-V24	24	30	30	16.49	337.59	47.49
36	TRAT-T30-V36	36	50	30	17.90	101.05	84.28
37	TRAT-T05-V12	12	10	5	12.88	595.82	8.96
38	TRAT-T05-V24	24	30	5	14.48	476.23	27.23
39	TRAT-T05-V36	36	50	5	15.68	291.00	55.54
40	TRAT-T15-V12	12	10	15	13.08	537.19	17.92
41	TRAT-T15-V24	24	30	15	15.38	387.12	40.85
42	TRAT-T15-V36	36	50	15	16.68	169.85	74.05
43	TRAT-T30-V12	12	10	30	13.28	478.56	26.88
44	TRAT-T30-V24	24	30	30	16.28	298.01	54.46
45	TRAT-T30-V36	36	50	30	17.68	48.70	92.56
PROMEDIO					15.16	387.77	41.57

**Figura 77**

*Prueba de distribución normal de la  $DBO_5$*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

**Shapiro-Wilk normality test**

$W = 0.98608$ ,  $p\text{-value} = 0.2028$

**Pruebas de homogeneidad de varianzas**

Estadística		
Método	de prueba	Valor p
Bartlett	4.04	0.853

La figura 77 muestra a los 45 datos que provienen de una muestra, distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de  $0.2028 > 0.05$  y la prueba Bartlett con Valor  $p = 0.853 > 0.05$  determina la homogeneidad de varianzas.

**Figura 78**

*ANOVA con arreglo factorial,  $DBO_5$*

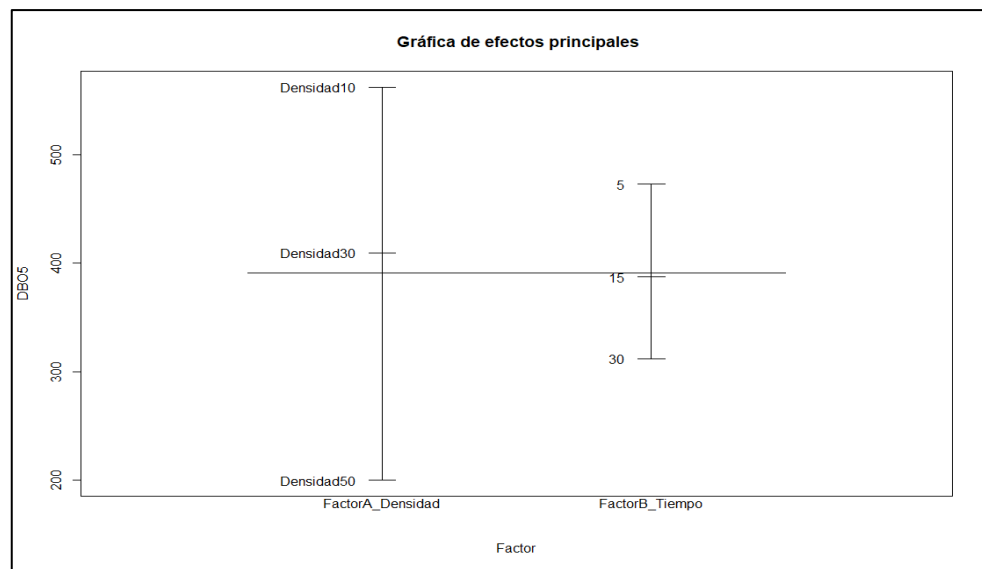
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad	2	994987	497494	1244.09	< 2e-16 ***
FactorB_Tiempo	2	195068	97534	243.91	< 2e-16 ***
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	24110	6028	15.07	2.5e-07 ***
Residuals	36	14396	400		

*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 78 muestra el ANOVA de los 45 tratamientos y 2 réplicas, referente a la comparación de medias de cuadrados de la Semana 1 y 2, respecto a la reducción del parámetro  $DBO_5$ , donde se aprecia que los efectos principales del Factor A y B ( $2e^{-16}$  y  $2e^{-16}$ ) son significativamente independientes. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados a Tiempos en el intervalo de 5 a 30 minutos y Densidad de CE de 10 a 50  $Amp/m^2$  afectan a la variable respuesta con una interacción significativa eficiente de  $2.5e^{-07}$ .

### Figura 79

*Efectos principales de  $DBO_5$ , respecto a las 5 semanas*

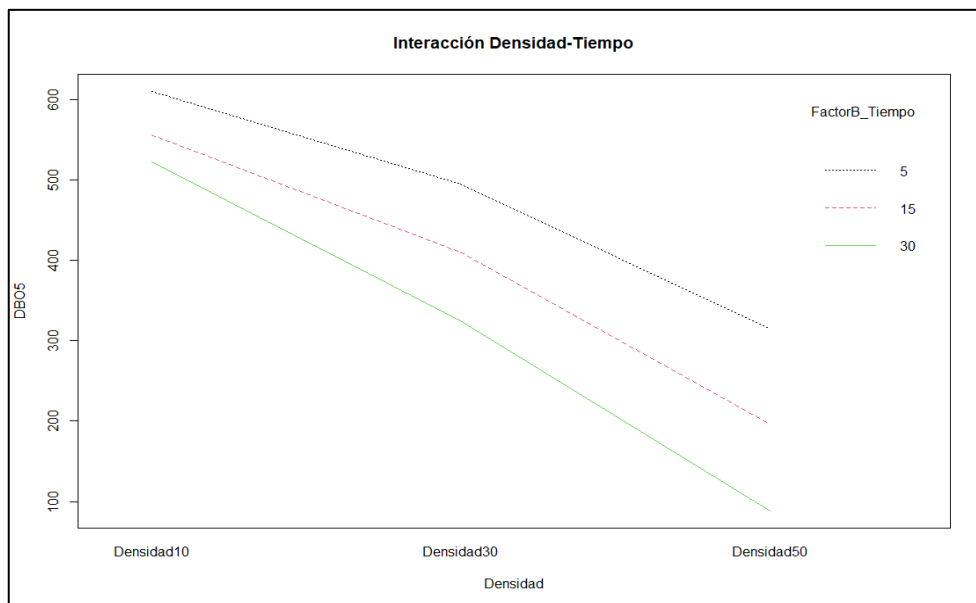


*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 79 muestra los efectos de interacción de los factores Tiempo y Densidad de CE, respecto al parámetro  $DBO_5$ , donde se aprecia que a una Densidad de CE de 50  $Amp/m^2$  y la interacción de un Tiempo a 30 minutos se logra una tasa media de reducción  $\geq$  a 200  $mgDBO_5/l$  que, a comparación de las Densidades y Tiempo de 10, 30  $Amp/m^2$  y 5, 15 minutos respectivamente conjugados se observa una reducción favorable, de acuerdo a los LMP.

## Figura 80

*Interacción de factores de la  $DBO_5$ , respecto a las 5 semanas*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 80 muestra los efectos de interacción de los factores Tiempo y Densidad de CE, respecto al parámetro  $DBO_5$ . A medida que se incrementa la Densidad y el Tiempo se logra una tasa media de reducción  $\leq$  a 100 mg $DBO_5$ /l con 50 Amp/m<sup>2</sup> y 30 minutos que, a comparación de 10, 30 Amp/m<sup>2</sup> y 5, 15 minutos respectivamente. La línea verde muestra una reducción favorable que muestra el efecto de optimización en el proceso de electrocoagulación, de acuerdo a los LMP para efluentes de PTAR (DS. N° 003-2010-MINAM).

## Tratamiento del pH

La Tabla 21 presenta el análisis general de los datos de las 5 semanas, registrando 45 tratamientos, operando a una Densidad de CE de 10, 30 y 50 Amp/m<sup>2</sup>, y Tiempos de 5, 15 y 30 minutos respectivamente, en la cámara de electrocoagulación.

**Tabla 19***Tratamiento del pH, respecto a las 5 semanas*

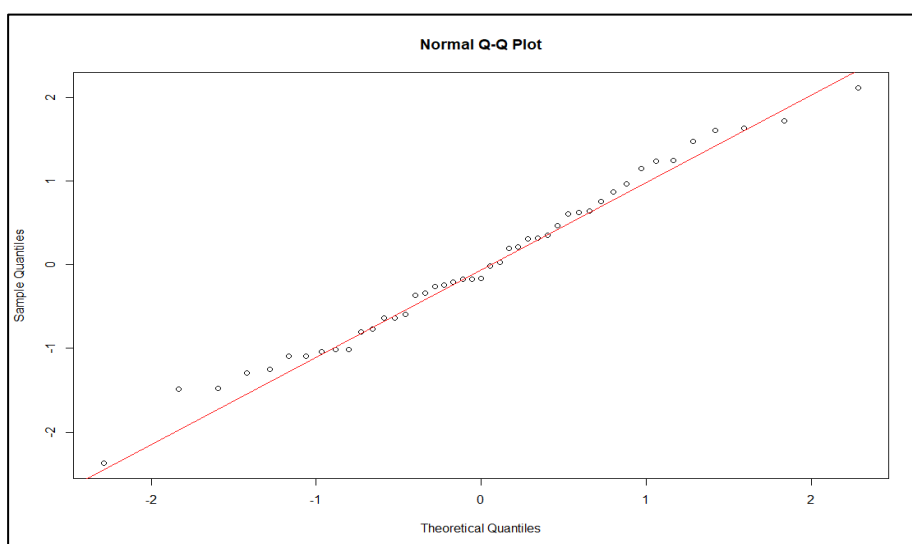
Nº	Código	Volts	Densidad (Apm/m <sup>2</sup> )	Tiempo (min)	T (°C)	pH	% Remoción pH
1	TRAT-T05-V12	12	10	5	13.10	6.07	1.51
2	TRAT-T05-V24	24	30	5	14.72	6.06	1.85
3	TRAT-T05-V36	36	50	5	15.93	6.05	0.83
4	TRAT-T15-V12	12	10	15	13.30	6.15	4.24
5	TRAT-T15-V24	24	30	15	15.63	6.13	3.90
6	TRAT-T15-V36	36	50	15	16.94	6.15	2.84
7	TRAT-T30-V12	12	10	30	13.50	6.17	3.70
8	TRAT-T30-V24	24	30	30	16.54	6.20	3.33
9	TRAT-T30-V36	36	50	30	17.95	6.22	5.42
10	TRAT-T05-V12	12	10	5	12.80	6.24	5.76
11	TRAT-T05-V24	24	30	5	14.40	6.53	9.20
12	TRAT-T05-V36	36	50	5	15.60	6.29	5.71
13	TRAT-T15-V12	12	10	15	13.00	6.25	4.17
14	TRAT-T15-V24	24	30	15	15.30	6.26	6.10
15	TRAT-T15-V36	36	50	15	16.60	6.60	11.86
16	TRAT-T30-V12	12	10	30	13.20	7.50	25.42
17	TRAT-T30-V24	24	30	30	16.20	7.17	20.50
18	TRAT-T30-V36	36	50	30	17.60	7.22	20.33
19	TRAT-T05-V12	12	10	5	13.05	7.27	23.22
20	TRAT-T05-V24	24	30	5	14.69	7.34	24.41
21	TRAT-T05-V36	36	50	5	15.91	7.60	27.09
22	TRAT-T15-V12	12	10	15	13.25	7.46	25.38
23	TRAT-T15-V24	24	30	15	15.61	7.38	23.00
24	TRAT-T15-V36	36	50	15	16.93	7.40	25.42
25	TRAT-T30-V12	12	10	30	13.45	7.56	28.14
26	TRAT-T30-V24	24	30	30	16.53	7.36	23.08
27	TRAT-T30-V36	36	50	30	17.95	7.20	21.01
28	TRAT-T05-V12	12	10	5	13.05	7.59	26.50



29	TRAT-T05-V24	24	30	5	14.67	7.68	30.17
30	TRAT-T05-V36	36	50	5	15.88	7.65	29.66
31	TRAT-T15-V12	12	10	15	13.25	6.23	4.18
32	TRAT-T15-V24	24	30	15	15.58	6.39	7.39
33	TRAT-T15-V36	36	50	15	16.89	6.50	8.33
34	TRAT-T30-V12	12	10	30	13.45	6.37	7.97
35	TRAT-T30-V24	24	30	30	16.49	6.47	9.66
36	TRAT-T30-V36	36	50	30	17.90	6.10	2.01
37	TRAT-T05-V12	12	10	5	12.88	6.49	9.08
38	TRAT-T05-V24	24	30	5	14.48	6.07	1.17
39	TRAT-T05-V36	36	50	5	15.68	6.04	2.37
40	TRAT-T15-V12	12	10	15	13.08	6.43	8.98
41	TRAT-T15-V24	24	30	15	15.38	7.15	19.57
42	TRAT-T15-V36	36	50	15	16.68	6.89	15.80
43	TRAT-T30-V12	12	10	30	13.28	7.10	18.33
44	TRAT-T30-V24	24	30	30	16.28	7.23	22.54
45	TRAT-T30-V36	36	50	30	17.68	7.00	18.64
PROMEDIO					15.16	6.74	13.33

**Figura 81**

*Prueba de distribucion normal del pH*



### Shapiro-Wilk normality test

W = 0.98608, p-value = 0.8585

### Pruebas de homogeneidad de varianzas

Estadística		Valor p
Método	de prueba	
Bartlett	2.04	0.980

La figura 81 muestra a los 45 datos que provienen de una muestra, distribuida normalmente, bajo las condiciones de Shapiro – Wilk dando un valor de 0.8585 > 0.05 y la prueba Bartlett con Valor p = 0.980 determina la homogeneidad de varianzas.

### Figura 82

*ANOVA con arreglo factorial, pH*

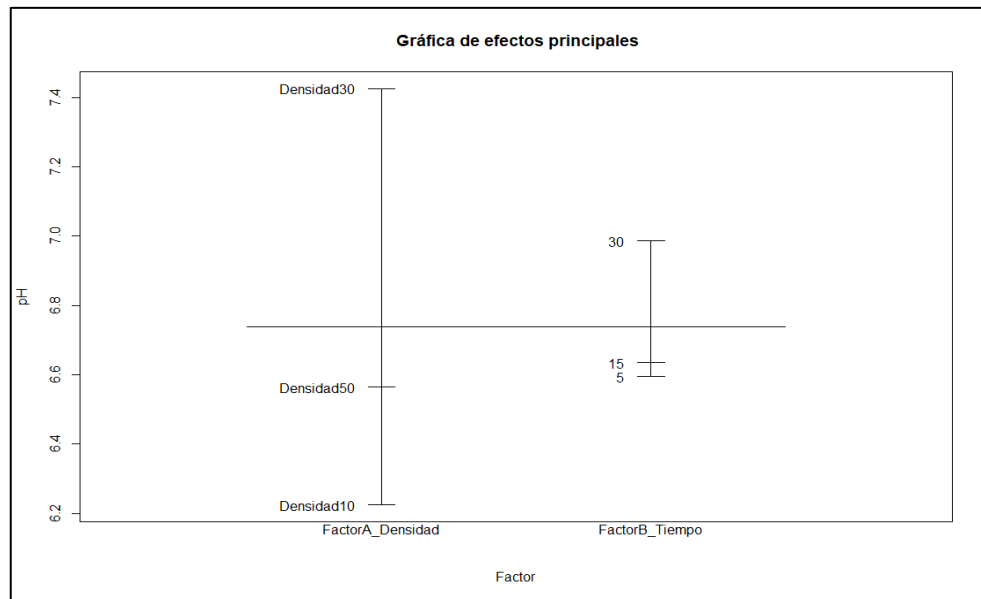
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
FactorA_Densidad	2	11.493	5.747	295.47	< 2e-16	***
FactorB_Tiempo	2	1.388	0.694	35.68	2.87e-09	***
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.972	0.243	12.50	1.79e-06	***
Residuals	36	0.700	0.019			

*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 82 muestra el ANOVA de los 45 tratamientos y 2 réplicas, referente a la comparación de medias de cuadrados de la Semana 1 y 2, respecto a la reducción del parámetro pH, donde se aprecia que los efectos principales del Factor A y B ( $2e^{-16}$  y  $2.87e^{-09}$ ) son significativamente independientes. Los efectos de interacción del Factor A y B conjugados a Tiempos en el intervalo de 5 a 30 minutos y Densidad de CE de 10 a 50 Amp/m<sup>2</sup> afectan a la variable respuesta con una interacción significativa eficiente de  $1.79e^{-06}$ .

### Figura 83

*Efectos principales del pH, respecto a las 5 semanas*

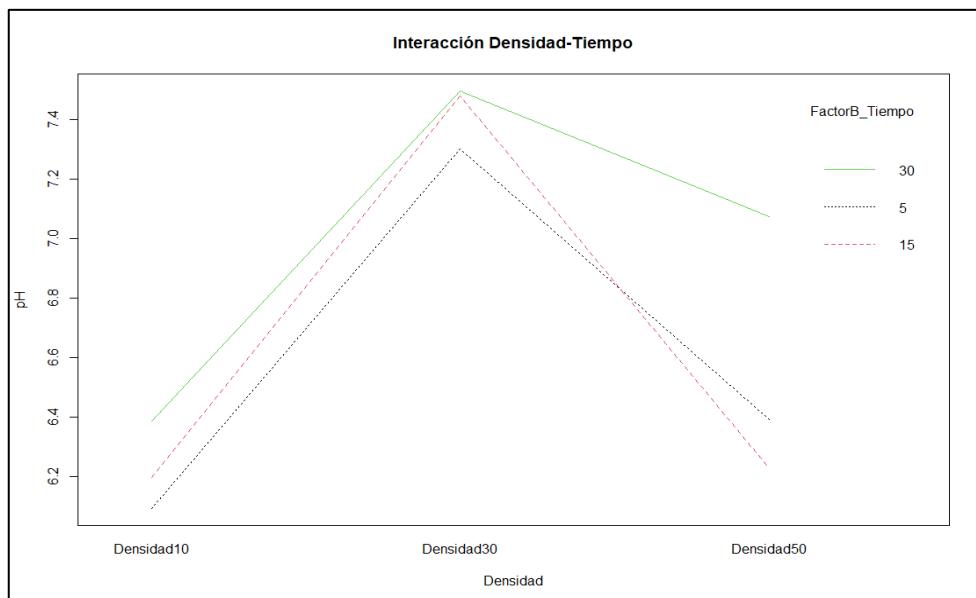


*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 83 muestra los efectos de interacción general de los factores Tiempo y Densidad de CE, respecto al parámetro pH, donde se aprecia que a una Densidad de CE de 30 Amp/m<sup>2</sup> y de un Tiempo a 30 minutos se logra un incremento de H<sup>+</sup> por encima a 7.4 que, a comparación de las Densidades y Tiempo de 10, 50 Amp/m<sup>2</sup> y 5, 15 minutos respectivamente conjugados se observa un incremento favorable, de acuerdo a los LMP.

**Figura 84**

*Interacción de los factores de la DBO<sub>5</sub>, respecto a las 5 semanas*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 84 muestra los efectos de interacción de los factores Tiempo y Densidad de CE, respecto al parámetro pH. El incremento de la Densidad de 10 a 30 Amp/m<sup>2</sup> para los tiempos de 5, 15 y 30 minutos se logró una tasa de incremento de 7.2 a 7.4 H<sup>+</sup>. Y si elevamos la densidad a 50 Amp/m<sup>2</sup> en los mismos tiempos, ep pH tiende a disminuir de 7.2 hasta 6.4 H<sup>+</sup>. La línea verde muestra el incremento favorable (30 Amp/m<sup>2</sup> y 15, 30 minutos) del efecto de optimización de electrocoagulación, de acuerdo a los LMP para efluentes de PTAR (DS. N° 003-2010-MINAM).

#### 4.1.3 Prueba de hipótesis

En las pruebas de hipótesis el propósito no es cuestionar el valor calculado del estadístico muestral, sino hacer, un juicio con respecto a la diferencia entre estadístico de muestra y un valor planteado del parámetro calculado.

De acuerdo a los procedimientos sistemáticos, se verifican diversos planteamientos de autores y cada uno de ellos con sus respectivas peculiaridades para probar la validez de una aseveración acerca de un parámetro poblacional. En este sentido según Millones, Barreno, Vázquez, y Castillo, ( 2015), los pasos para realizar una prueba de hipótesis, relativa al parámetro en estudio de una población, con tamaño de muestra fijo (menor a 50 datos) es la siguiente:

## Contrastación de la hipótesis general

### Formulación de hipótesis alterna y nula

**Ha:** El uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio influye significativamente en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.

**Ho:** El uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio no influye significativamente en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.

### Escoger el nivel de significancia o riesgo

La suposición de la prueba de investigación se trabajó con un error de 5%, ( $\alpha = 0.05$ ), y con un nivel de confianza de 95%, es decir con  $1 - \alpha = 0.95$ .

### Escoger la estadística de prueba

La estadística F es simplemente un cociente de dos varianzas (ANOVA).

$$F = \frac{\frac{SCR}{n}}{\frac{SCE}{n - k - 1}}$$

- **SCR:** Suma de cuadrados de la regresión
- **SCE:** Suma de cuadrados de los residuos
- **n** : Número total de observaciones en la muestra
- **k** : Grados de libertad

$$H_0: \beta_1 = 0$$

$$H_a: \beta_1 \neq 0$$

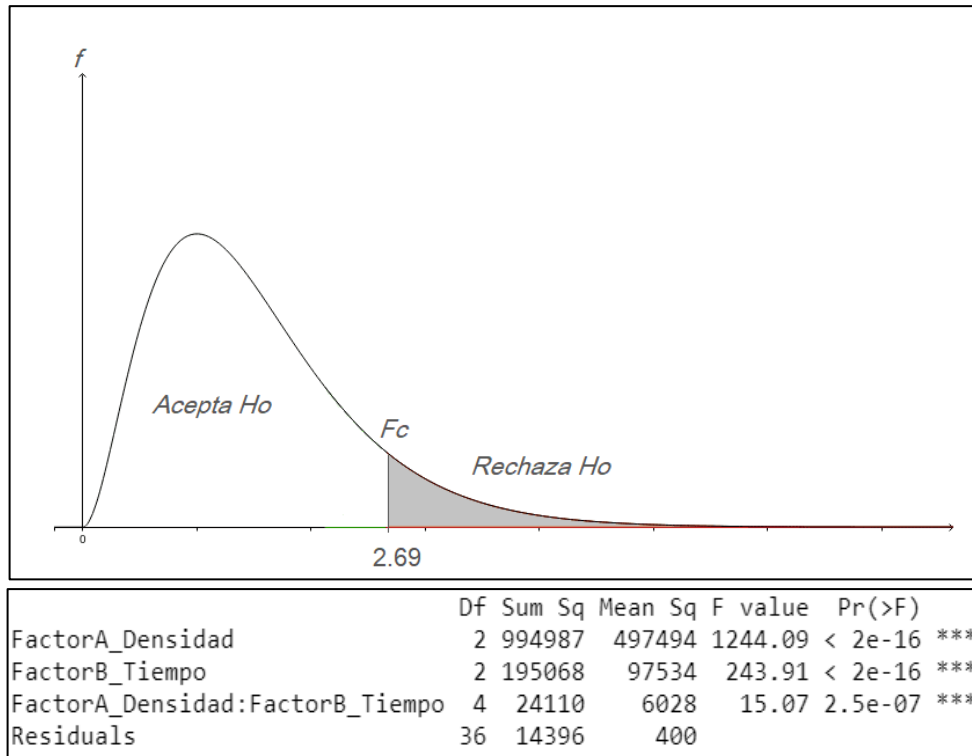
### Establecer la región crítica

#### Análisis de la DBO<sub>5</sub>

La prueba bilateral definirá como región de aceptación y rechazo y el Fvalue y F critico delimitará la región crítica que le corresponde al rechazo de la hipótesis nula (Ho).

**Figura 85**

*Prueba bilateral para la hipótesis general de la  $DBO_5$*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

Dónde:

$F \text{ value} > F_c \text{ (tabla)}$

$$F > F_{\alpha, k-1, n-k}$$

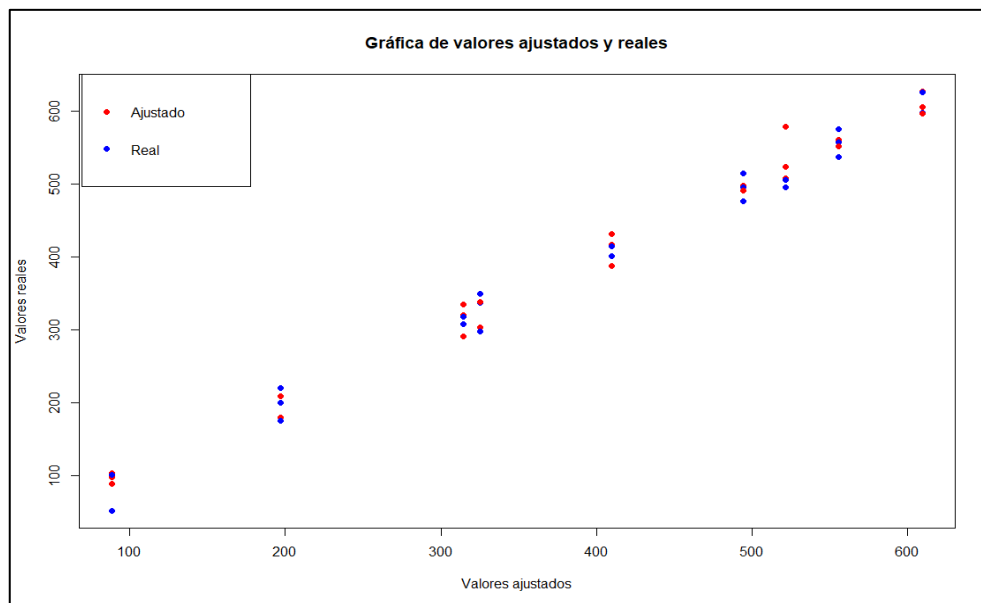
$$F > F_{0.05, 4, 36}$$

$$F > 2.69$$

La figura 85 muestra que  $F \text{ value} = 15.07 > 2.69$ , lo cual delimita el rechazo de la hipótesis nula general ( $H_0$ ).

**Figura 86**

*Valores ajustados y reales de los tratamientos de la DBO<sub>5</sub>*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 86 muestra los valores ajustados de los 45 tratamientos donde se aprecia que la reducción del parámetro DBO<sub>5</sub> está en un promedio  $\leq 100$  mg/l de acuerdo a los LMP.

### Predicción

	fit	lwr	upr
1	609.984	591.8468	628.1212
2	494.536	476.3988	512.6732
3	314.248	296.1108	332.3852

La predicción se realizó para las densidades ("Densidad10", "Densidad30" y "Densidad50") para un tiempo de retención de 5 minutos respectivamente, dando como resultado base a la Densidad 3 con un valor de 314.248 mg DBO<sub>5</sub>/l los siguientes valores.

	fit	lwr	upr
1	314.248	296.11079	332.3852
2	196.804	178.66679	214.9412
3	88.432	70.29479	106.5692

Se aprecia que la Densidad 3 es el más homogéneo y estable respecto al Tiempo de retención a 30 minutos y el valor predicho se ajusta a 88.432 mgDBO<sub>5</sub>/l de acuerdo a los LMP.

### **Ecuación de regresión lineal de la DBO<sub>5</sub>**

$$\text{DBO}_5 = 609.984 - 295.736(\text{D}_{50}) - 88.176(\text{T}_{30}) - 63.356(\text{D}_{50}:\text{T}_{15}) - 137.640(\text{D}_{50}:\text{T}_{30}) - 115.448(\text{D}_{30}) - 54.088(\text{T}_{15}) - 30.680(\text{D}_{30}:\text{T}_{15}) - 81.360(\text{D}_{30}:\text{T}_{30})$$

Donde:

- Intercepto: 609.984
- D (50): Densidad a 50 Amp/m<sup>2</sup>
- D (30): Densidad a 30 Amp/m<sup>2</sup>
- T (15): Tiempo en 15 minutos.
- T (30): Tiempo en 30 minutos.
- D<sub>50</sub>:T<sub>15</sub>: Interacción de la Densidad a 50 Amp/m<sup>2</sup> con el Tiempo en 15 minutos.
- (D<sub>30</sub>:T<sub>30</sub>): Interacción de la Densidad a 30 Amp/m<sup>2</sup> con el Tiempo en 30 minutos.

La ecuación de regresión lineal representa el comportamiento de la interacción de los factores de Densidad de corriente eléctrica y Tiempo respectivamente en 45 tratamientos conjugado a en intervalos de 15 y 30 min y 30 y 50 Amp/m<sup>2</sup> de como la DBO<sub>5</sub> se reduce en cada proceso de tratamiento. La utilidad se enfoca en el modelamiento de reducción o incremento del parámetro, se puede realizar comparaciones de tratamiento con otras tecnologías que fueron aplicados.

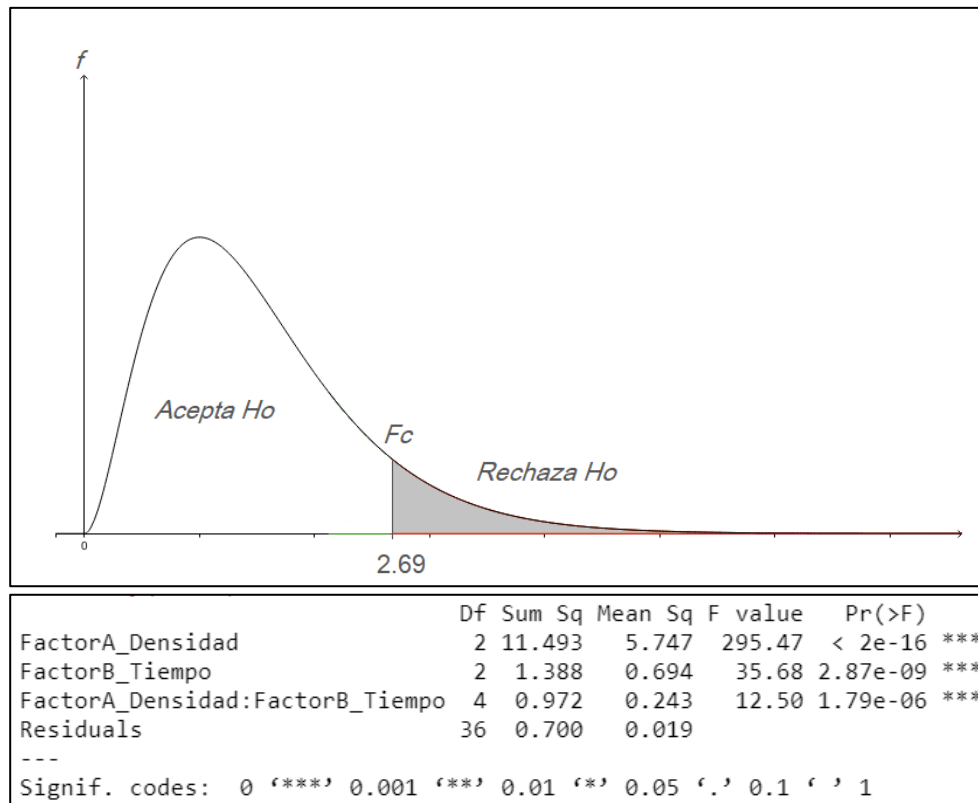
### **Análisis para el pH**

La prueba de cola izquierda se definirá como región de aceptación y la F value delimitará la región crítica que le corresponde al rechazo de la hipótesis nula (H<sub>0</sub>).



**Figura 87**

*Prueba bilateral para la hipótesis general del pH*



Nota. Tomado de Rstudio V. 4.02.

Dónde:

$$F \text{ value} > F_c (\text{tabla})$$

$$F > F_{\alpha, k-1, n-k}$$

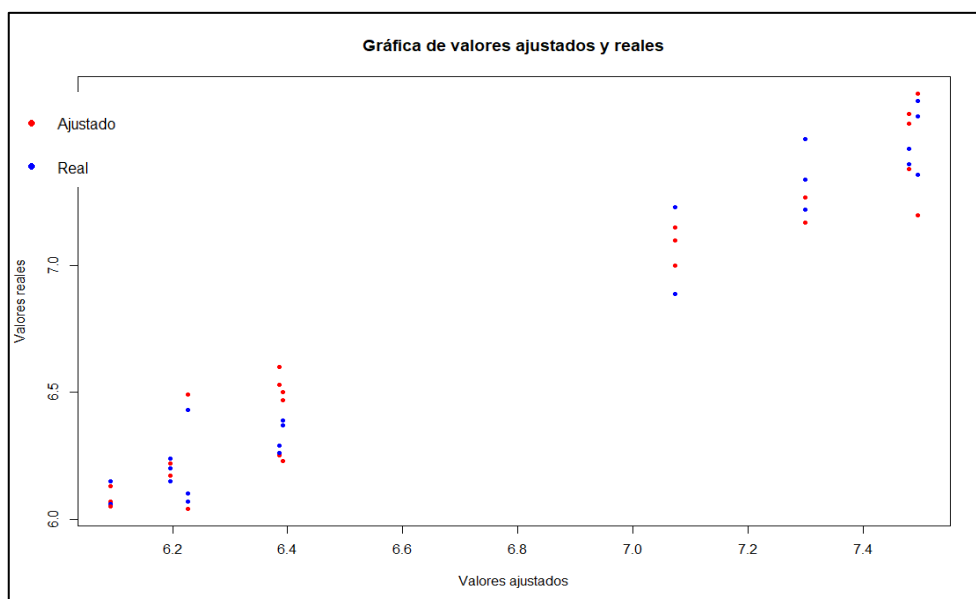
$$F > F_{0.05, 4, 36}$$

$$F > 2.69$$

La figura 87 muestra que  $F \text{ value} = 12.50 > 2.69$ , lo cual delimita el rechazo de la hipótesis nula general ( $H_0$ ).

## Figura 88

Valore ajustados y reales de los tratamientos del pH



Nota. Tomado de Rstudio V. 4.02.

La figura 92 muestra los valores ajustados de los 45 tratamientos donde se aprecia que el incremento de  $H^+$  se encuentran en el rango establecido de 6.5 a 8.5 unidades de pH lo cual es admisible de acuerdo a los LMP.

### Predicción

	fit	lwr	upr
1	6.092	5.965512	6.218488
2	7.300	7.173512	7.426488
3	6.392	6.265512	6.518488

La predicción se realizó para las densidades ("Densidad10", "Densidad30" y "Densidad50") para un tiempo de retención de 5 minutos respectivamente, dando como resultado base a la Densidad 2 con un valor de 7.300 unidades de  $H^+$  los siguientes valores.

	fit	lwr	upr
1	6.392	6.265512	6.518488
2	6.226	6.099512	6.352488
3	7.074	6.947512	7.200488

Se aprecia que la Densidad 3 es el más homogéneo y estable respecto al Tiempo de retención a 30 minutos y el valor predicho se ajusta a 7.074 unidades de  $H^+$  de acuerdo a los LMP.

### **Ecuación de regresión lineal del pH**

$$\text{pH} = 6.092 + 0.300(\text{D}50) + 0.294 (\text{T}30) - 0.270(\text{D}50:\text{T}15) + 0.388 (\text{D}50:\text{T}30) + 1.208 (\text{D}30) + 0.104 (\text{T}15) + 0.076 (\text{D}30:\text{T}15) - 0.098(\text{D}30:\text{T}30)$$

Donde:

- Intercepto: 6.092
- D (50): Densidad a 50 Amp/m<sup>2</sup>
- D (30): Densidad a 30 Amp/m<sup>2</sup>
- T (15): Tiempo en 15 minutos
- T (30): Tiempo en 30 minutos
- D50:T15: Interacción de la Densidad a 50 Amp/m<sup>2</sup> con el Tiempo en 15 minutos
- (D30:T30): Interacción de la Densidad a 30 Amp/m<sup>2</sup> con el Tiempo en 30 minutos.

La ecuación de regresión lineal representa el comportamiento de la interacción de los factores de Densidad de corriente eléctrica y Tiempo respectivamente en 45 tratamientos conjugado a en intervalos de 15 y 30 min y 30 y 50 Amp/m<sup>2</sup> de como el pH aumenta en cada proceso de tratamiento. La utilidad se enfoca en el modelamiento de reducción o incremento del parámetro, se puede realizar comparaciones de tratamiento con otras tecnologías que fueron aplicados.

### **Decisión estadística**

De acuerdo a los resultados del ANOVA y prueba F (15.07 > 2.69 y 12.50 > 2.69) a un nivel de significancia del 5%, con 4 grados de libertad de interacción de factores y 39 grados de residuo para ambos casos (DBO<sub>5</sub> y pH). Se rechaza la hipótesis nula (H<sub>0</sub>) y aceptamos la hipótesis alterna, es decir qué; “El uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio influye significativamente en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica”.

## Contrastación de hipótesis específicas

### Hipótesis específica 1

#### Formulación de hipótesis alterna y nula

**Ha:** El uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio influye significativamente en la DBO<sub>5</sub> del tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.

**Ho:** El uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio no influye significativamente en la DBO<sub>5</sub> del tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.

#### Escoger el nivel de significancia o riesgo

La suposición de la prueba de investigación se trabajó con un error de 5%, ( $\alpha = 0.05$ ), y con un nivel de confianza de 95%, es decir con  $1 - \alpha = 0.95$ .

#### Escoger la estadística de prueba

La estadística F:

$$F = \frac{\frac{SCR}{n}}{\frac{SCE}{n - k - 1}}$$

- **SCR:** Suma de cuadrados de la regresión
- **SCE:** Suma de cuadrados de los residuos
- **n:** Número total de observaciones en la muestra
- **k** : Grados de libertad

Los grados de libertad es el número de variables explicativas que tiene un modelo. Es decir, la cantidad de variables que queremos ver si son ‘fiables’.

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$$

$$H_a: \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \beta_4 \neq \beta_5 \neq 0$$

#### Establecer la región crítica

La prueba de cola derecha se definirá como región de aceptación y la F value delimitará la región crítica que le corresponde al rechazo de la hipótesis nula (Ho). Los gráficos muestran los valores de la “F value” respecto a la comparación de las 5 semanas.

Donde:

F value > Fc (tabla)

$$F > F_{\alpha, k-1, n-k}$$

$$F > F_{0.05, 4, 9}$$

$$F > 3.63$$

Para las 5 semanas de tratamiento a escala de laboratorio la Fc = 3.63 es la misma en grupos de 2 semanas.

Semana 1 - 2	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	8008	2002	3.83	0.0437 *
Residuals	9	4704	523		

Semana 1 - 3	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	8247	2062	9.059	0.00322 **
Residuals	9	2048	228		

Semana 1 - 4	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	8010	2003	11.47	0.00139 **
Residuals	9	1571	175		

Semana 1 - 5	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	13678	3419	4.394	0.0304 *
Residuals	9	7004	778		

Semana 2 - 3	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	8077	2019	8.497	0.00401 **
Residuals	9	2139	238		

Semana 2 - 4	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	7818	1954	6.041	0.0121 *
Residuals	9	2912	324		

Semana 2 - 5	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	13498	3375	5.473	0.0163 *
Residuals	9	5549	617		

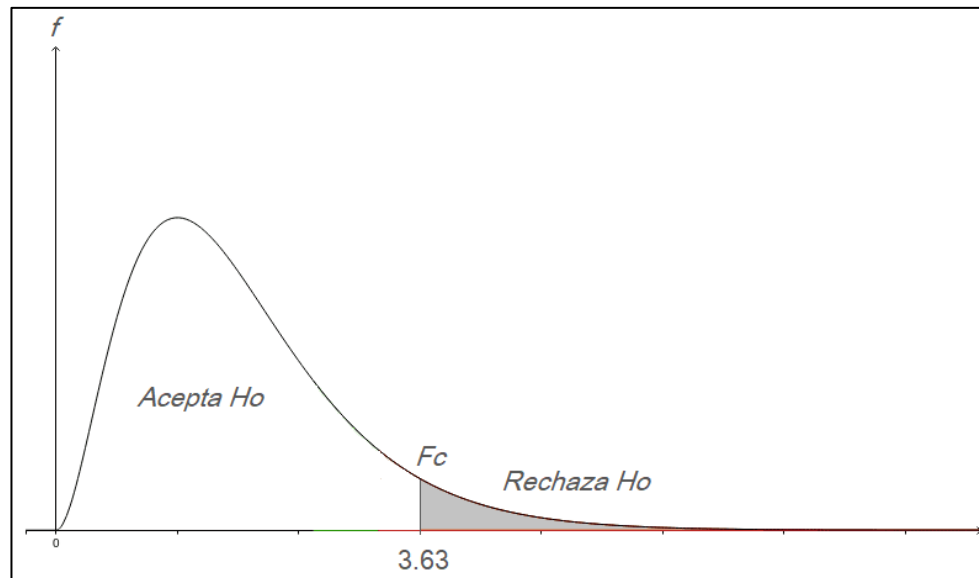
Semana 3 - 4	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	8079	2020	26.99	5.01e-05 ***
Residuals	9	673	75		

Semana 3 - 5	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	13181	3295	6.067	0.0119 *
Residuals	9	4889	543		

Semana 4 - 5	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	13453	3363	6.726	0.00864 **
Residuals	9	4501	500		

**Figura 89**

*Prueba ANOVA de la hipótesis específica 1*



### **Decisión estadística**

La figura 89 muestra una  $F_c = 3.63 < 3.83, 9.059, 11.47, 4.394, 8.497, 6.041, 5.476, 26.99, 6.067, 6.726$  correspondiente a las 5 semanas conjugados, lo cual demuestra en todos los casos rechazar la Hipótesis específica nula 1 ( $H_0$ ) y aceptamos la hipótesis alterna, es decir qué; El uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio influye significativamente en la  $DBO_5$  del tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.

Dando como mejor resultado de tratamiento a escala de laboratorio a la Densidad de  $50\text{Amp}/\text{m}^2$  interactuando en un Tiempo de 30 minutos.

### **Hipótesis Específicas 2**

#### **Formulación de hipótesis alterna y nula**

**Ha:** El uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio influye significativamente en el pH del tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.

**Ho:** El uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio no influye significativamente en el pH del tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.

## Escoger el nivel de significancia o riesgo

La suposición de la prueba de investigación se trabajó con un error de 5%, ( $\alpha = 0.05$ ), y con un nivel de confianza de 95%, es decir con  $1 - \alpha = 0.95$ .

## Escoger la estadística de prueba

La estadística F:

$$F = \frac{\frac{SCR}{n}}{\frac{SCE}{n - k - 1}}$$

- **SCR:** Suma de cuadrados de la regresión
- **SCE:** Suma de cuadrados de los residuos
- **n:** Número total de observaciones en la muestra
- **k** : Grados de libertad

Los grados de libertad es el número de variables explicativas que tiene un modelo. Es decir, la cantidad de variables que queremos ver si son ‘fiables’.

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$$

$$H_a: \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \beta_4 \neq \beta_5 \neq 0$$

## Establecer la región crítica

La prueba de cola derecha se definirá como región de aceptación y la F value delimitará la región crítica que le corresponde al rechazo de la hipótesis nula ( $H_0$ ). Los gráficos muestran los valores de la “F critica” respecto a la comparación de las 5 semanas.

Semana 1 - 2	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.527	0.1317	5.182	0.0191 *
Residuals	9	0.229	0.0254		

Semana 1 - 3	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.626	0.1566	8.355	0.004243 **
Residuals	9	0.169	0.0187		

Semana 1 - 4	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.721	0.1804	10.50	0.001915 **
Residuals	9	0.155	0.0172		

Semana 1 - 5	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.421	0.1052	5.974	0.012511 *
Residuals	9	0.158	0.0176		

Semana 2 - 3	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.320	0.0800	3.634	0.0500 *
Residuals	9	0.198	0.0220		

Semana 2 - 4	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.393	0.0983	3.081	0.0742 .
Residuals	9	0.287	0.0319		

Semana 2 - 5	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.166	0.0415	2.023	0.17465
Residuals	9	0.185	0.0205		

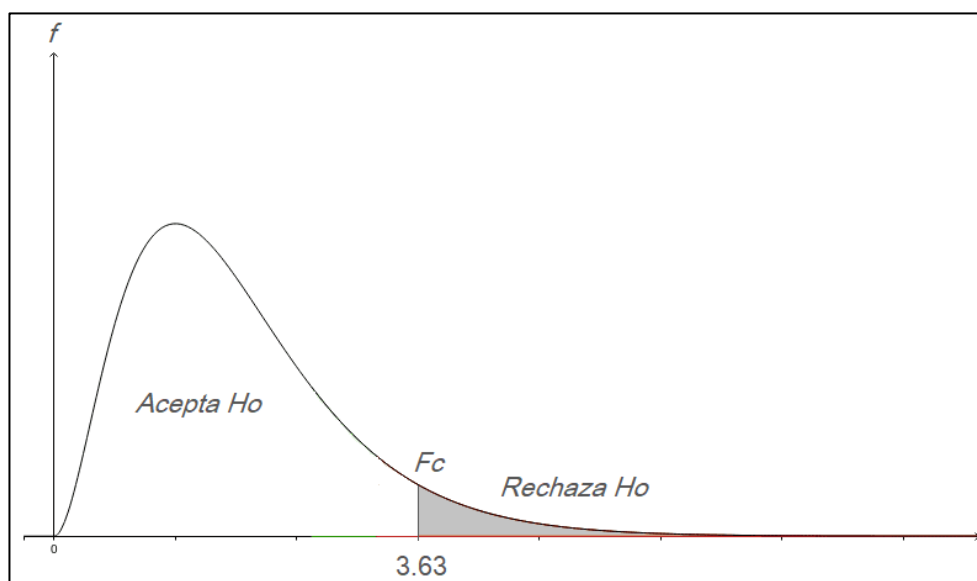
Semana 3 - 4	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.654	0.1634	52.33	3.12e-06 ***
Residuals	9	0.028	0.0031		

Semana 3 - 5	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	0.267	0.0667	3.735	0.046628 *
Residuals	9	0.161	0.0179		

Semana 4 - 5	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FactorA_Densidad:FactorB_Tiempo	4	13453	3363	6.726	0.00864 **
Residuals	9	4501	500		

**Figura 90**

*Prueba ANOVA de la hipótesis específica 2*



*Nota.* Tomado de Rstudio V. 4.02.



## **Decisión estadística**

La figura 90 muestra una  $F_c = 3.63 < 5.182, 8.355, 10.50, 5.974, 3.634, 3.081, 2.023, 52.33, 3.735, 6.726$ , correspondiente a las 5 semanas conjugados, lo cual demuestra en todos los casos rechazar la Hipótesis específica nula 2 ( $H_0$ ) y aceptamos la hipótesis alterna, es decir que: El uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio influye significativamente en el pH del tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.

Dando como mejor resultado de tratamiento a escala de laboratorio a la Densidad de  $30\text{Amp/m}^2$  interactuando en un Tiempo de 15 minutos en el proceso de electrocoagulación.

### **4.2 Discusión**

En nuestro país se han diseñado y puesto en funcionamiento un número considerable de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), muchas de las cuales se encuentran bajo la administración de empresas prestadoras de servicios de saneamiento (EPS) y algunas manejadas por empresas privadas; pero en su gran mayoría presentan deficiencias en sus condiciones de operatividad debido a múltiples factores (políticos, sociales, ambientales, de gestión y económicos).

La gran problemática relacionada con su fracaso muchas veces se debe a que su diseño y construcción no son adecuados para el tipo y características del efluente a tratar, sobre todo en lo relacionado al caudal y el sistema específico que debe emplearse.

Ante ello, surge la necesidad de caracterizar inicialmente el agua residual y luego proceder a establecer el mecanismo más adecuado para la remoción significativa de la materia orgánica y demás elementos presentes en las mismas; lo cual definitivamente debe empezar por investigaciones a nivel de laboratorio y pequeña escala, que permitan diseñar y modelar las mejores condiciones que se asemejan al escenario real en el que posteriormente podría ponerse en funcionamiento una planta de tratamiento.

En relación al objetivo general de la investigación; determinar el grado de influencia que tiene el uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito

de Huancavelica: El proceso de tratamiento logro reducir al parámetro DBO<sub>5</sub> en promedio en 87.76% y el pH incremento sus H<sup>+</sup> en 13.33%, determinando un alto grado de influencia de acuerdo a la Normativa Técnica Peruana, esta se determinó en base a los Límites Máximos Permisibles (Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM), que de acuerdo a esta norma el parámetro DBO<sub>5</sub> debe alcanzar como mínimo los 100mg DBO<sub>5</sub>/l y el pH debe comprender en el intervalo de 6.5 y 8.5 unidades de pH lo cual demuestra la contrastación de las respectivas hipótesis planteadas. Estos resultados guardan relación con lo que sostiene Cueva y Pereda (2020), que mencionan que a medida que se aumenta el tiempo como también el amperaje durante el tratamiento incrementa el porcentaje de reducción de la DBO, reduciendo hasta un 88.66 % de su estado inicial. Así también como Rivas y Rojas (2020) que menciona que los valores de DBO<sub>5</sub> obtenidos después del tratamiento estuvieron en un rango de 97.9 - 80.9mg/L, teniendo un promedio de 90.06 mg/L; estando dentro de los LMP. Que también nos indica que mientras más tiempo y amperaje el pH se vuelve más alcalino. Alvino (2019) nos menciona que la electrocoagulación al usar 75 °C de temperatura, 5 A de intensidad de corriente y con tiempos de 10 y 15 min, logra una eficiencia en la remoción de la DBO<sub>5</sub> en 96.28% y 93.85% respectivamente. Observando que al trabajar con temperaturas elevadas el porcentaje de remoción del DBO<sub>5</sub> es más alta. Baca (2019) de acuerdo al trabajo realizado concluyo que el valor de salida de la DBO<sub>5</sub> es de (27.99 mg/L), se halla por encima del valor deseado de 15 mg/L, para agua de Clase 3, si bien en esta serie de pruebas se ha reducido, con una eficiencia del orden de 89.22%.

En base al primer objetivo específico el cual fue; estimar el grado de influencia del tiempo de retención y la densidad de corriente eléctrica de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio en la reducción de DBO<sub>5</sub> en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica: El sistema batch (manejar volúmenes diarios, pequeños y medianos por lotes) determinó que las condiciones óptimas ha permitido observar que el proceso de electrocoagulación es capaz de tener una alta eficiencia de remoción de demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), y el logro de un tratamiento más eficiente y más rápido que la coagulación tradicional química, como proceso de reemplazo que a su vez, en un tiempo de retención de 15 a 30 minutos se observó una creciente reducción en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal, logrando

una reducción de 84.38%, 92.52%, 85.05%, 84.28 y 92.56% de remoción de la DBO<sub>5</sub> durante las 5 semanas de tratamiento respectivamente, lo cual demuestra una buena eficiencia y de acuerdo a los antecedentes de Hernández (2019) en su tesis de maestría concluye que a un voltaje de 12.6V y un tiempo de 30 minutos se removi6 un 90% de DBO<sub>5</sub> empleando 6 reactores, trabajando a voltajes de 2.7, 7.7 y 12.6V. Con respecto a Paitan y Sifuentes, (2018) en su investigación, coincide que para disminuir los niveles de DBO<sub>5</sub> presentes en los efluentes se determin6 en un tiempo 6ptimo de 30 minutos, logro alcanzar un porcentaje de reducci6n en un 90% de DBO<sub>5</sub> mg/l, trabajando a 33.88A/m<sup>2</sup>. Por otra parte, al igual que Cisneros, (2017) en su investigación coincide con los mismos resultados en un tiempo de 30 minutos y a 25 Volts logro una reducci6n del 76.46% que, al comparar con Auilar (2015) con su tesis los datos obtenidos concluyeron en una reducci6n de 87% de materia orgánica de DBO<sub>5</sub> en un tiempo prudente de 15 minutos. De acuerdo a los antecedentes mencionados algunos de ellos difieren en la cantidad de caudal y dimensiones de los sistemas *bacht* trabajados. Por otra parte, los porcentajes de reducci6n del parámetro DBO<sub>5</sub> son variables en el intervalo de 76.46% y 92.56%, y esto se debe a que las investigaciones realizadas a escala de laboratorio trabajaron en base a Voltajes (2.7 a 36), Densidad de Corriente Eléctrica (30 y 50 Amperios) continuos entre 1 a 5 Amp. Algunos con corriente eléctrica alternan y otras continuas. La dependencia de los electrodos se caracterizó por el tipo de agua a tratar, siendo estas en su mayoría electrodos de aluminio, hierro y fierro de dimensiones variables y formas dependientes del caudal de trabajo.

De acuerdo al segundo objetivo específico; determinar el grado de influencia del tiempo de retenci6n y la densidad de corriente eléctrica de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio en el control de pH en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica: Respecto al pH los electrodos se dispusieron en placas de aluminio de forma paralelas conectados en serie a una fuente de voltaje, trabajando a densidades de corriente eléctrica, equivalentes a 10, 30 y 50 Amp/m<sup>2</sup>, distribuidos a una distancia de 1cm, que logró un incremento de pH eficiente del 13.33% a una magnitud de 30 Amp/m<sup>2</sup> en un tiempo de 30 minutos, que al igual que Murillo, (2016) en su investigación también logro un incremento de H<sup>+</sup> equivalente a 7 unidades de pH eficiente del 95% trabajando a una densidad de corriente eléctrica de 30 Amp/m<sup>2</sup>

y de acuerdo a Suarez, (2014) logro un incremento de iones de  $H^+$  de 7.3 unidades de pH, favorable a un 90% de eficiencia con una densidad de corriente eléctrica de 12.5 Amp/m<sup>2</sup> y, al contrastar con Paitan y Sifuentes, (2018) concluyó en un incremento de  $H^+$  de 7.7 hasta 8.1 unidades de pH con una densidad de CE de 33.88 Amp/m<sup>2</sup> en un tiempo de 30 minutos con una eficiencia del 90%.

#### 4.3 Conclusiones

El objetivo general determinó una interacción fuerte entre el tiempo de retención y la densidad de corriente, lo cual influye significativamente en las características biofísicoquímicas del agua residual del camal municipal, donde al incrementar la densidad de corriente y el tiempo, disminuye la remoción de la DBO<sub>5</sub> y el pH incrementa a un estado neutro de acuerdo los Límites Máximos Permisibles.

El objetivo específico 1 determino la conjugación de interacción de la densidad de corriente eléctrica y tiempo de retención fue de 50 Amp/m<sup>2</sup> en un tiempo de 30 minutos, es decir los factores se comportan como una proporción directa.

El objetivo específico 2 determino la conjugación de interacción de la densidad de corriente eléctrica y tiempo de retención fue de 30 Amp/m<sup>2</sup> en un tiempo de 30 minutos, es decir el factor densidad disminuyo en un 50%.

El tiempo de retención optimo, con mayor reducción de contaminantes (DBO<sub>5</sub>) e incremento (pH) de  $H^+$ , en las características físicoquímicas de aguas residuales del matadero municipal de equinos y porcinos fue de 30 minutos por igual para los 2 parámetros motivo de estudio.

La densidad de corriente eléctrica optimo, con mayor reducción de contaminantes e incremento, en las características físicoquímicas de aguas residuales del matadero municipal, fue de 50 Amp/m<sup>2</sup> para la DBO<sub>5</sub> y solo 30 Amp/m<sup>2</sup> para el pH. Lo cual demuestra la proporción variada.

Aplicando esta tecnología de electrocoagulación se logró reducir la contaminación del agua residual del camal municipal hasta lograr alcanzar valores cercanos a los Límites Máximos Permisibles ( $DBO_5 \geq 100$  mg/l) e incrementar  $H^+$  para el pH (6.5 – 8.5) lo cual demuestra su grado de influencia para tratar aguas residuales provenientes de mataderos e industrias cárnicas.

#### 4.4 Recomendaciones

Al tratar aguas residuales que contenga materia orgánica como de los camales municipales por el método de electrocoagulación, se recomienda utilizar electrodos de aluminio en el ánodo y en el cátodo, lo cual proporcionara un tratamiento más limpio, y ayudaría en la conservación de los electrodos que a comparación del Fierro por su alto proceso de oxidación.

Para el tratamiento de aguas residuales en plantas de beneficios de animales recomendamos un tratamiento primario de filtración por mallas para retener materias contaminantes (heces, pelos, coágulos de sangre, etc.) y a la vez una cámara de trampa de grasas para mejorar los procesos de tratamiento.

La tecnología de electrocoagulación es un proceso que genera coágulos y floculos a través del sacrificio de desgaste de las placas de aluminio y de materia contaminante y por tal proceso se debe incorporar otros tratamientos como la sedimentación y filtración para complementar remoción de contaminantes en el agua tratada. Se recomienda que se realice estudios a escalas mayores si se requiere trabajar con volúmenes más grandes, en estos casos se tendría que realizar un escalamiento del diseño de reactor para poder tratar mayor cantidad de muestra.

Recomendamos utilizar mayor número de electrodos de sacrificio en un reactor de electrocoagulación, para trabajar a una distancia mínima entre electrodos para generar mayor remoción en un menor tiempo de retención. Es importante trabajar más el pH (factor muy prescindible) de la muestra en diferentes unidades, ya que esta interactúa mejor con placas de aluminio ya que en el medio ácido los resultados son más óptimos.

También se recomienda realizar el proceso de electrocoagulación a diferentes temperaturas (factor muy dependiente) en diferentes volúmenes de muestra, para lo cual se debe diseñar una celda con mayor resistencia a altas temperaturas.

Para contribuir con el medio ambiente es recomendable el empleo de diferentes generadores de energía no convencional (panel solar). Se puede adicionar un flujo de aire (aireadores mecánicos) a la cámara de electrocoagulación ya que ayudara al sistema a mejorar su eficiencia, lo cual generara mayores burbujas de aire las cuales ayudaran a la suspensión de los floculos contaminantes.

## REFERENCIAS

- Aguilar, E. A. (2015). *Evaluación de una Celda de Electrocoagulación a Escala Laboratorial para el Tratamiento de Agua*. Lima-Perú: Universidad Mayor de San Marcos.
- Alianza/Agua, E. (2018). *Manual de depuración de aguas residuales urbanas* (Ideasamare ed.). ARPIrelieve.
- ANA. (2016). Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales. Lima-Perú: GRafica Industrial Alarcón S.R.L.
- Arango, A. (1 de Junio de 2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. (C. U. Lasallista, Ed.) *Revista Lasallista de Investigación*, II(1), 9. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69520109>
- Arango, A., & Garcés, L. F. (15 de Septiembre de 2007). Diseño de una Celda de Electrocoagulación para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Industria Lactea. (C. U. Lasallista., Ed.) *Universidad EAFIT*, 43(147), 67.
- Barboza, G. I. (2011). *"Reducción de la Carga de Contaminantes de las Aguas Residuales de la Planta de Tratamiento de Totorá –Ayacucho Empleando la Técnica de Electrocoagulación"*. Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú.
- Bauer, W. (2011). *Física para ingeniería y ciencias con física moderna*. Mexico: The McGraw-Hill Companies.
- Cabrera, A. (Abril de 2011). Propuesta de reutilización del efluente de la planta de tratamiento Tryp Península en fuentes ornamentales y espejos de agua de los hoteles ubicados en el sector Punta Hicacos. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 5(1), 69. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193921374003>
- Carrasquero, S. J., Marquina, D. C., Soto, J. G., Viloria, E., Pire, M. C., & Díaz, A. R. (2015). Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales de Matadero: Para una Poblacion Menor 2000 Habitantes. Colombia: Grupo de Investigación en Diseño, Proceso y Energía.
- Cisneros, A. (2017). *"Uso de la Tecnología de Electrocoagulación para el Tratamiento de Efluentes de Camal Avícola a nivel de Laboratorio, SJJ 2017"*. Tesis, Universidad Cesar Vallejo, Lima-Perú.
- Correa, J. (2006). Estudio de potencia de pruebas de homogeneidad. (U. N. Colombia, Ed.) *Revista Colombiana de Estadística*, 76. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=89929104>
- García, A. (2011). *Investigación Sobre Procesos Avanzados de Tratamiento y Depuración de las Aguas Mediante Electrocoagulación*. Madrid-España: Escuela técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canals y Puertos.

- Gilpavas, E. (2008). *Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales* (Dirección de Investigación y Docencia ed.). (U. EAFIT, Ed.) Medellín, COLOMBIA.
- Gómez Díaz de León, C. (2012). *Metodología de la Investigación Científica*. (U. A. (UANL), Ed.) Monterrey, México.
- Hernández Sampiere, R. (2014). *Metodología de la Investigación*. Mexico: McGRAW-HILL / Interamericana Editores, S.A. DE C.V.
- Hernández, F. (2010). *Estudio de Viabilidad Económica para el Tratamiento de Aguas Residuales a través de un análisis Coste Beneficio*. Valencia-España: Universidad de Valencia/Departamento de Matemática para la Economía.
- Holt, P., Barton, G., & Mitchell, C. (October de 19 de 2005). The future for electrocoagulation as a localised. (U. o. Department of Chemical Engineering, Ed.) *ELSEVIER*. Obtenido de [www.elsevier.com/locate/chemosphere](http://www.elsevier.com/locate/chemosphere)
- Koby, M., & Taner, O. (27 de June de 2003). Treatment of Textile Wastewaters by Electrocoagulation Using Iron and Aluminum Electrodes. (E. F. Department of Environmental Engineering, Ed.) *Journal of Hazardous Materials*, 100(1-3), 178.
- López, C., & Henze, M. (2017). *Tratamiento biológico de aguas Principios, modelación y diseño*. Gran Bretaña: Cambridge University Press. Obtenido de (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).
- Lozano, A. W. (15 de marzo de 2016). Residuales, Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas. (U. P. Colombia, Ed.) *Researchgate*, 196. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/298354134>
- Martínez, F. (2008). *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional*. Cuenca-España: Universidad de Castilla la Mancha.
- Metcalf and Eddy, I. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales Tratamiento, Vertido y Reutilización*. ESPAÑA: McGraw-Hill/Interamericana de España S.A.
- Millones, R., Barreno, E., Vázquez, F., & Castillo, C. (2015). *Estadística Aplicada a la Ingeniería y los Negocios*. En U. D. LIMA (Ed.). Lima, Perú: FONDO EDITORIAL. Obtenido de [www.ulima.edu.pe](http://www.ulima.edu.pe)
- MINAM. (16 de Marzo de 2008). DS. N° 002-2008-MINAM. *El Peruano*, pág. 2.
- Mollah, Y. (23 de December de 2000). Electrocoagulation (EC) - Science and Applications. (L. U. Gill Chair of Chemistry & Chemical Engineering, Ed.) *ELSEVIER*, 84(1), 41. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00176-5)

- Muñoz, D. (10 de Febrero de 2005). *Sistema de Taratamiento de Aguas Residuales de Matadero: Para una Poblacion Menor 2000 Habitantes*. (P. y. Grupo de Investigación en Diseño, Ed.) 3(1), 98.
- MVCS. (20 de Noviembre de 2009). Aprueban Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. *El peruano*, pág. 3.
- Nemerow, N. L. (1998). *Tratamiento de Vertidos Industriales y Peligrosos*. (D. d. S.A., Ed.) Madrid-España: Materprint S.L. Obtenido de <http://diazdesantos.es>
- Niño Rojas, V. (2011). *Metodología de la Investigación Diseño y Ejecucion*. (E. 1. Ediciones de la U - Calle 24 A No. 43-22 - Tel. (+57-1) 4810505, Ed.) Bogotá, Colombia: Ediciones de la U Conocimiento a su Alcance. Obtenido de [www.edicionesdelau.com](http://www.edicionesdelau.com)
- Ministerio del ambiente. (08 de Junio de 2006). NORMA OS.90 Plantas de tratamiento de aguas residuales. (MINAM, Ed.) *El Peruano*, 21.
- Noyola, A., & Morgan, J. (2013). *Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales*. (U. N. México, Ed.) Mexico: Instituto de Ingenieria UNAM.
- Ñaupas, H., & Mejía, E. (2014). *Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de tesis*. (E. D. U, Ed.) Bogotá, Colombia: Free Libros.
- Orozco, A. (2014). *Bioingeniería de Aguas Residuales Teoría y Diseño*. Medellin-Colombia: ACODAL.
- Paitan, M., & Sifuentes, G. (2018). *Remoción de contaminantes de aguas residuales de un matadero de equinos por el método de electrocoagulación a nivel de laboratorio*. Tesis, Junin, Huancayo.
- Prieto, F. (2012). Electrocoagulación: Una Alternativa para la Depuración de Lacto Suero Residual. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación Ciencia y Desarrollo y Práctica*, 27.
- Riccio, L. (2010). *Remoción de aceites y grasas de aguas residuales de la Universidad Nacional del Centro del Perú, por electrocoagulación, a nivel de laboratorio*. Trujillo-Perú: Universidad Nacional de Trujillo.
- Sánchez, H., & Reyes, C. (2000). *Metodología de la Investigación Científica*. Lima, Canta: MANTARO.
- Serway, V. (2012). *Fundamentos de Física* (Universidad La Salle, Morelia. ed., Vol. 9). (U. P. Nacional., Ed.) Mexico: CENGAGE Learning. Obtenido de <http://latinoamerica.cengage.com>
- Smith, C. (2019). *Evaluación de las condiciones de bienestar animal de camélidos sudamericanos ingresados al camal municipal de*



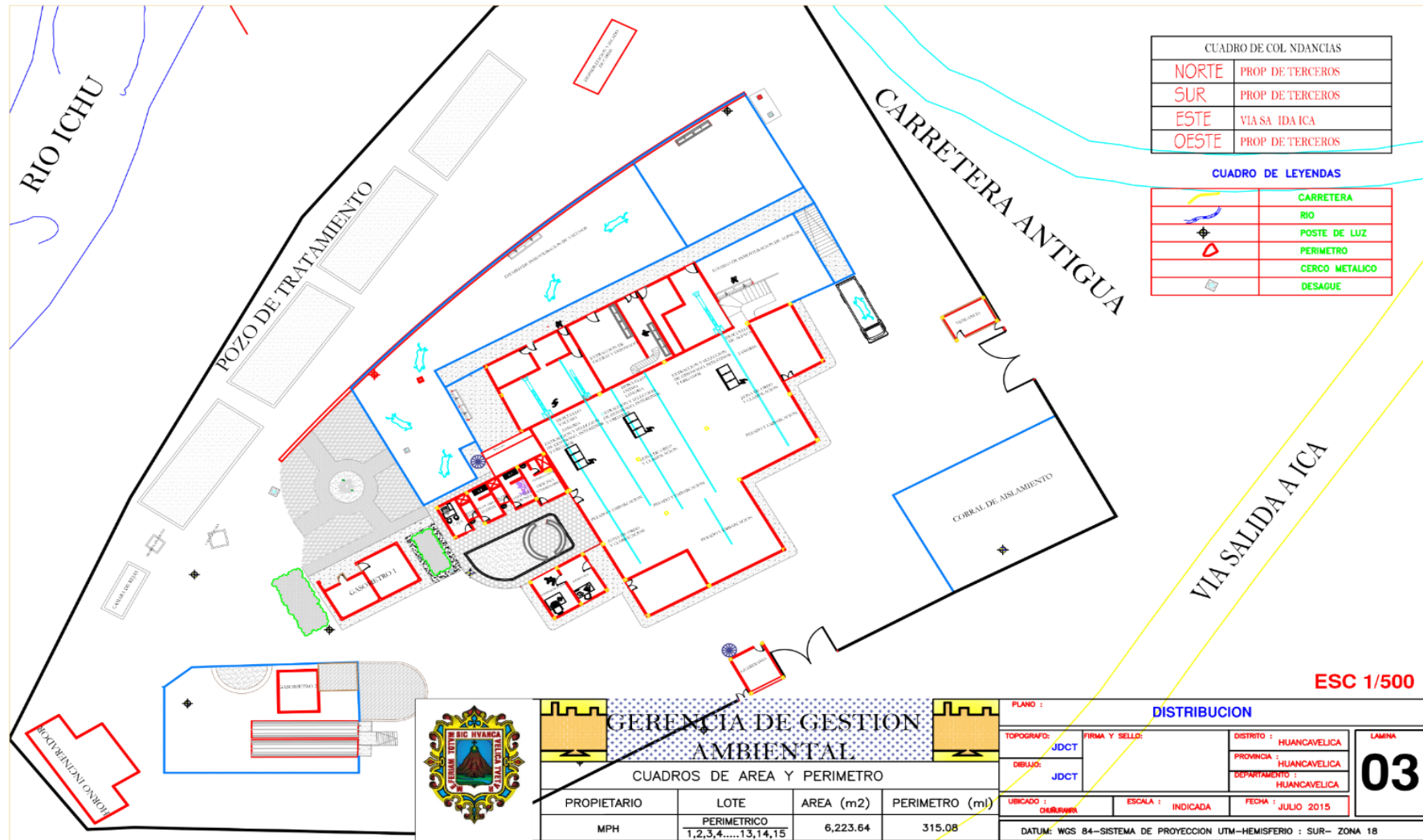
- Huancavelica, Perú. (carlos.smith@upch.pe, Ed.) *Rev Mex Cienc Peru*, I(1). Obtenido de <https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i2.4568>
- Sonco, R. (2014). *Electrocoagulación en Relación a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) en Aguas Residuales*. Villa el Salvador-Perú: Universidad Nacional Tecnológica De Lima Sur.
- Suárez, S. (2014). *Diseño de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Provenientes de Las Descargas de un Centro Comercial de la Ciudad de Quito Mediante Procesos de electrocoagulación y Adsorción en Carbono Activado*. Quito-Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento. (2016). *Diagnostico de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en el Ambito de Operación de las Entidades Prestadoras de Servicio de Saneamiento*. Lima-Perú: Tarea Asociación Gráfica Educativa.
- Tamayo, M. (2003). *El Proceso de la Investigación Científica* (4ta ed.). (L. N. EDITORES, Ed.) Mexico: LIMUSA. S.A. de C.v. Obtenido de [www.noriega.com.mx](http://www.noriega.com.mx)
- Tame, I. (2019). *“La electrocoagulación en relación a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) en aguas residuales”*. Tesis, Universidad Nacional Tecnológica De Lima Sur, Lima-Peru, Villa el Salvador.
- Tippens, P. (2007). *Física, conceptos y Física*,. (U. N. México, Ed.) México: MCGRAW-HILL/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Velázquez, A., & Rey, N. (2013). *Metodología de la Investigación Científica* (Vol. 1ra.). Lima: Sam Marcos E.I.R.L., editores. Obtenido de [www.editorialsanmarcos.com](http://www.editorialsanmarcos.com)
- Villanueva, A., Flores, H., Sahagún, R., Silva, A., Zamora, H., Rojas, R., & Rodríguez, A. (2013). *Conferencia "Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales"*. Cataluña- España: CEPIS/OPS-OMS.
- W.S.Hu, W. B. (2005). *Advances in Biochemical Engineering / Biotechnology*. New York: T. Scheper.
- Wilson, J. (2007). *Física*. (C. P. University, Ed.) California: Pearson Education.

## ANEXOS

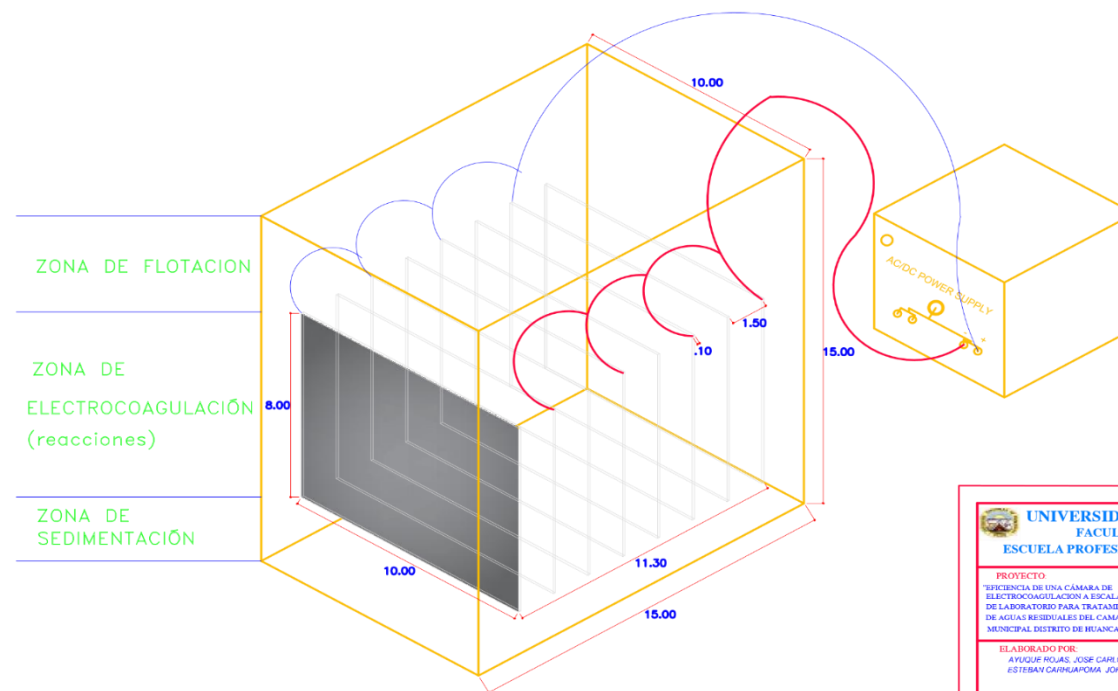
### Anexo 1. Matriz de consistencia.

	PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	METODO
GENERAL	¿Cuál es el grado de influencia del uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica?	Determinar el grado de influencia que tiene el uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.	El uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio influye significativamente en el tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.	<b>Variable Independiente (efecto):</b> - Uso de una Cámara de Electrocoagulación <b>Indicadores</b> ✓ Tiempo (min) ✓ Densidad de corriente eléctrica.	<b>Tipo:</b> Básico <b>Nivel:</b> Explicativo <b>Diseño:</b> <b>O1 X O2</b> Diseño pretest y post test con un solo grupo. (Sánchez, 2018) <b>Donde:</b> X: (Uso de una Cámara de Electrocoagulación) O <sub>1</sub> : Pretest (antes ph, DBO <sub>5</sub> ) O <sub>2</sub> : Post test (después ph, DBO <sub>5</sub> ) <b>Significancia:</b> Al 95%
ESPECIFICO	¿Cuál es el grado de influencia del uso de la cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio en la DBO <sub>5</sub> del tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica?	Estimar el grado de influencia del uso de la cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio en la DBO <sub>5</sub> del tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.	El uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio influye significativamente en la DBO <sub>5</sub> del tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.	<b>Variable Dependiente (causa):</b> - Tratamiento de Aguas Residuales <b>Indicadores</b> ✓ DBO <sub>5</sub> ✓ pH	<b>Técnica:</b> Observación Experimental <b>Población:</b> Agua residual del camal municipal de Huancavelica. <b>Muestra:</b> 2 Litros de Agua residual del camal municipal del distrito de Huancavelica. <b>Método:</b> Muestreo no probabilístico (no aleatoria) de tipo intencional (se basa en la selección de casos que serán más convenientes para el propósito del estudio)
	¿Cuál es el grado de influencia del uso de la cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio en el pH del tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica?	Estimar el grado de influencia del uso de la cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio en el pH del tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.	El uso de una cámara de electrocoagulación a escala de laboratorio influye significativamente en el pH del tratamiento de aguas residuales del camal municipal del distrito de Huancavelica.		

**Anexo 2.** Planos del camal y del prototipo propuesto.



## CAMARA DE ELECTROCOAGULACION A ESCALA DE LABORATORIO



<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA</b> FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA		
<b>PROYECTO:</b> DISEÑO DE UNA CÁMARA DE ELECTROCOAGULACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL CAMAL MUNICIPAL DISTRITO DE HUANCAMELICA	<b>PLANO</b> <b>CAMARA DE ELECTROCOAGULACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO</b>	
<b>ELABORADO POR:</b> AYUQUE ROJAS, JOSE CARLOS ESTEBAN CARRUPOMA JOHNNY	<b>FECHA:</b> DICIEMBRE DE 2020	<b>ESCALA:</b> 1:250
		<b>LÁMINA</b> <b>CE-1</b>

**Anexo 3.** Base de datos.**Datos procesados a nivel escala de laboratorio para DBO<sub>5</sub>**

<b>5 SEMANAS</b>				
<b>Semanas</b>	<b>Densidad</b>	<b>Tiempo</b>	<b>DBO<sub>5</sub></b>	<b>%DBO<sub>5</sub></b>
Semana 1	D10	T5	626.77	7.66
Semana 2	D10	T5	625.21	9.45
Semana 3	D10	T5	605.03	7.45
Semana 4	D10	T5	597.09	7.13
Semana 5	D10	T5	595.82	8.96
Semana 1	D10	T15	574.74	15.33
Semana 2	D10	T15	559.97	18.90
Semana 3	D10	T15	556.35	14.89
Semana 4	D10	T15	551.23	14.27
Semana 5	D10	T15	537.19	17.92
Semana 1	D10	T30	522.71	22.99
Semana 2	D10	T30	494.73	28.35
Semana 3	D10	T30	507.67	22.34
Semana 4	D10	T30	505.37	21.40
Semana 5	D10	T30	578.56	26.88
Semana 1	D30	T5	513.78	24.31
Semana 2	D30	T5	497.01	28.02
Semana 3	D30	T5	495.39	24.22
Semana 4	D30	T5	490.27	23.75
Semana 5	D30	T5	476.23	27.23
Semana 1	D30	T15	431.27	36.47
Semana 2	D30	T15	400.29	42.02
Semana 3	D30	T15	416.23	36.33
Semana 4	D30	T15	413.93	35.62
Semana 5	D30	T15	387.12	40.85
Semana 1	D30	T30	348.76	48.62
Semana 2	D30	T30	303.57	56.03
Semana 3	D30	T30	337.07	48.44
Semana 4	D30	T30	337.59	47.49
Semana 5	D30	T30	298.01	54.46
Semana 1	D50	T5	335.15	50.63
Semana 2	D50	T5	307.17	55.51
Semana 3	D50	T5	320.11	51.03
Semana 4	D50	T5	317.81	50.57
Semana 5	D50	T5	291.00	55.54
Semana 1	D50	T15	220.60	67.50
Semana 2	D50	T15	179.41	74.02
Semana 3	D50	T15	174.73	68.04
Semana 4	D50	T15	209.43	67.43
Semana 5	D50	T15	199.85	74.05
Semana 1	D50	T30	103.05	84.38
Semana 2	D50	T30	51.65	92.52

Semana 3	D50	T30	97.71	85.05
Semana 4	D50	T30	101.05	84.28
Semana 5	D50	T30	88.70	92.56

### Datos procesados a nivel escala de laboratorio conjugados por semana para DBO<sub>5</sub>

Semana1-2					Semana1-3				
Sem.	Densidad	Tiempo	DBO <sub>5</sub>	%DBO <sub>5</sub>	Sem.	Densidad	Tiempo	DBO <sub>5</sub>	%DBO <sub>5</sub>
S1	Densidad10	5	626.77	7.66	S1	Densidad10	5	626.77	7.66
S2	Densidad10	5	625.21	9.45	S3	Densidad10	5	605.03	7.45
S1	Densidad10	15	574.74	15.33	S1	Densidad10	15	574.74	15.33
S2	Densidad10	15	559.97	18.90	S3	Densidad10	15	556.35	14.89
S1	Densidad10	30	522.71	22.99	S1	Densidad10	30	522.71	22.99
S2	Densidad10	30	494.73	28.35	S3	Densidad10	30	507.67	22.34
S1	Densidad30	5	513.78	24.31	S1	Densidad30	5	513.78	24.31
S2	Densidad30	5	497.01	28.02	S3	Densidad30	5	495.39	24.22
S1	Densidad30	15	431.27	36.47	S1	Densidad30	15	431.27	36.47
S2	Densidad30	15	400.29	42.02	S3	Densidad30	15	416.23	36.33
S1	Densidad30	30	348.76	48.62	S1	Densidad30	30	348.76	48.62
S2	Densidad30	30	303.57	56.03	S3	Densidad30	30	337.07	48.44
S1	Densidad50	5	335.15	50.63	S1	Densidad50	5	335.15	50.63
S2	Densidad50	5	307.17	55.51	S3	Densidad50	5	320.11	51.03
S1	Densidad50	15	220.60	67.50	S1	Densidad50	15	220.60	67.50
S2	Densidad50	15	179.41	74.02	S3	Densidad50	15	174.73	68.04
S1	Densidad50	30	103.05	84.38	S1	Densidad50	30	103.05	84.38
S2	Densidad50	30	51.65	92.52	S3	Densidad50	30	97.71	85.05
Semana1-4					Semana1-5				
Sem.	Densidad	Tiempo	DBO <sub>5</sub>	%DBO <sub>5</sub>	Sem.	Densidad	Tiempo	DBO <sub>5</sub>	%DBO <sub>5</sub>
S1	Densidad10	5	626.77	7.66	S1	Densidad10	5	626.77	7.66
S4	Densidad10	5	597.09	7.13	S5	Densidad10	5	595.82	8.96
S1	Densidad10	15	574.74	15.33	S1	Densidad10	15	574.74	15.33
S4	Densidad10	15	551.23	14.27	S5	Densidad10	15	537.19	17.92
S1	Densidad10	30	522.71	22.99	S1	Densidad10	30	522.71	22.99
S4	Densidad10	30	505.37	21.40	S5	Densidad10	30	578.56	26.88
S1	Densidad30	5	513.78	24.31	S1	Densidad30	5	513.78	24.31
S4	Densidad30	5	490.27	23.75	S5	Densidad30	5	476.23	27.23
S1	Densidad30	15	431.27	36.47	S1	Densidad30	15	431.27	36.47
S4	Densidad30	15	413.93	35.62	S5	Densidad30	15	387.12	40.85
S1	Densidad30	30	348.76	48.62	S1	Densidad30	30	348.76	48.62
S4	Densidad30	30	337.59	47.49	S5	Densidad30	30	298.01	54.46
S1	Densidad50	5	335.15	50.63	S1	Densidad50	5	335.15	50.63
S4	Densidad50	5	317.81	50.57	S5	Densidad50	5	291.00	55.54
S1	Densidad50	15	220.60	67.50	S1	Densidad50	15	220.60	67.50

S4	Densidad50	15	209.43	67.43
S1	Densidad50	30	103.05	84.38
S4	Densidad50	30	101.05	84.28

#### Semana2-3

Sem.	Densidad	Tiempo	DBO5	%DBO5
S2	Densidad10	5	625.21	9.45
S3	Densidad10	5	605.03	7.45
S2	Densidad10	15	559.97	18.90
S3	Densidad10	15	556.35	14.89
S2	Densidad10	30	494.73	28.35
S3	Densidad10	30	507.67	22.34
S2	Densidad30	5	497.01	28.02
S3	Densidad30	5	495.39	24.22
S2	Densidad30	15	400.29	42.02
S3	Densidad30	15	416.23	35.62
S2	Densidad30	30	303.57	56.03
S3	Densidad30	30	337.07	48.44
S2	Densidad50	5	307.17	55.51
S3	Densidad50	5	320.11	51.03
S2	Densidad50	15	179.41	74.02
S3	Densidad50	15	174.73	68.04
S2	Densidad50	30	51.65	92.52
S3	Densidad50	30	97.71	85.05

#### Semana2-5

Sem.	Densidad	Tiempo	DBO5	%DBO5
S2	Densidad10	5	625.21	9.45
S5	Densidad10	5	595.82	8.96
S2	Densidad10	15	559.97	18.90
S5	Densidad10	15	537.19	17.92
S2	Densidad10	30	494.73	28.35
S5	Densidad10	30	578.56	26.88
S2	Densidad30	5	497.01	28.02
S5	Densidad30	5	476.23	27.23
S2	Densidad30	15	400.29	42.02
S5	Densidad30	15	387.12	40.85
S2	Densidad30	30	303.57	56.03
S5	Densidad30	30	298.01	54.46
S2	Densidad50	5	307.17	55.51
S5	Densidad50	5	291.00	55.54
S2	Densidad50	15	179.41	74.02
S5	Densidad50	15	199.85	74.05
S2	Densidad50	30	51.65	92.52
S5	Densidad50	30	88.70	92.56

#### Semana3-5

Sem.	Densidad	Tiempo	DBO5	%DBO5
S3	Densidad10	5	605.03	7.45
S5	Densidad10	5	595.82	8.96

S5	Densidad50	15	199.85	74.05
S1	Densidad50	30	103.05	84.38
S5	Densidad50	30	88.70	92.56

#### Semana2-4

Sem.	Densidad	Tiempo	DBO5	%DBO5
S2	Densidad10	5	625.21	9.45
S4	Densidad10	5	597.09	7.13
S2	Densidad10	15	559.97	18.90
S4	Densidad10	15	551.23	14.27
S2	Densidad10	30	494.73	28.35
S4	Densidad10	30	505.37	21.40
S2	Densidad30	5	497.01	28.02
S4	Densidad30	5	490.27	23.75
S2	Densidad30	15	400.29	42.02
S4	Densidad30	15	413.93	35.62
S2	Densidad30	30	303.57	56.03
S4	Densidad30	30	337.59	47.49
S2	Densidad50	5	307.17	55.51
S4	Densidad50	5	317.81	50.57
S2	Densidad50	15	179.41	74.02
S4	Densidad50	15	209.43	67.43
S2	Densidad50	30	51.65	92.52
S4	Densidad50	30	101.05	84.28

#### Semana3-4

Sem.	Densidad	Tiempo	DBO5	%DBO5
S3	Densidad10	5	605.03	7.45
S4	Densidad10	5	597.09	7.13
S3	Densidad10	15	556.35	14.89
S4	Densidad10	15	551.23	14.27
S3	Densidad10	30	507.67	22.34
S4	Densidad10	30	505.37	21.40
S3	Densidad30	5	495.39	24.22
S4	Densidad30	5	490.27	23.75
S3	Densidad30	15	416.23	36.33
S4	Densidad30	15	413.93	35.62
S3	Densidad30	30	337.07	48.44
S4	Densidad30	30	337.59	47.49
S3	Densidad50	5	320.11	51.03
S4	Densidad50	5	317.81	50.57
S3	Densidad50	15	174.73	68.04
S4	Densidad50	15	209.43	67.43
S3	Densidad50	30	97.71	85.05
S4	Densidad50	30	101.05	84.28

#### Semana4-5

Sem.	Densidad	Tiempo	DBO5	%DBO5
S4	Densidad10	5	597.09	7.13
S5	Densidad10	5	595.82	8.96

S3	Densidad10	15	556.35	14.89	S4	Densidad10	15	551.23	14.27
S5	Densidad10	15	537.19	17.92	S5	Densidad10	15	537.19	17.92
S3	Densidad10	30	507.67	22.34	S4	Densidad10	30	505.37	21.40
S5	Densidad10	30	578.56	26.88	S5	Densidad10	30	578.56	26.88
S3	Densidad30	5	495.39	24.22	S4	Densidad30	5	490.27	23.75
S5	Densidad30	5	476.23	27.23	S5	Densidad30	5	476.23	27.23
S3	Densidad30	15	416.23	36.33	S4	Densidad30	15	413.93	35.62
S5	Densidad30	15	387.12	40.85	S5	Densidad30	15	387.12	40.85
S3	Densidad30	30	337.07	48.44	S4	Densidad30	30	337.59	47.49
S5	Densidad30	30	298.01	54.46	S5	Densidad30	30	298.01	54.46
S3	Densidad50	5	320.11	51.03	S4	Densidad50	5	317.81	50.57
S5	Densidad50	5	291.00	55.54	S5	Densidad50	5	291.00	55.54
S3	Densidad50	15	174.73	68.04	S4	Densidad50	15	209.43	67.43
S5	Densidad50	15	199.85	74.05	S5	Densidad50	15	199.85	74.05
S3	Densidad50	30	97.71	85.05	S4	Densidad50	30	101.05	84.28
S5	Densidad50	30	88.70	92.56	S5	Densidad50	30	88.70	92.56

## Datos procesados a nivel escala de laboratorio para el pH

5 SEMANAS				
Semanas	Densidad	Tiempo	pH	%pH
Semana 1	Densidad10	5	4.07	7.66
Semana 2	Densidad10	5	4.06	9.45
Semana 3	Densidad10	5	4.05	7.45
Semana 4	Densidad10	5	4.15	7.13
Semana 5	Densidad10	5	4.13	8.96
Semana 1	Densidad10	15	4.15	15.33
Semana 2	Densidad10	15	4.17	18.90
Semana 3	Densidad10	15	4.2	14.89
Semana 4	Densidad10	15	4.22	14.27
Semana 5	Densidad10	15	4.24	17.92
Semana 1	Densidad10	30	4.53	22.99
Semana 2	Densidad10	30	4.29	28.35
Semana 3	Densidad10	30	4.25	22.34
Semana 4	Densidad10	30	4.26	21.40
Semana 5	Densidad10	30	4.6	26.88
Semana 1	Densidad30	5	6.5	24.31
Semana 2	Densidad30	5	6.17	28.02
Semana 3	Densidad30	5	6.22	24.22
Semana 4	Densidad30	5	6.27	23.75
Semana 5	Densidad30	5	6.34	27.23
Semana 1	Densidad30	15	6.6	36.47
Semana 2	Densidad30	15	6.46	42.02
Semana 3	Densidad30	15	6.38	36.33
Semana 4	Densidad30	15	6.4	35.62
Semana 5	Densidad30	15	6.56	40.85
Semana 1	Densidad30	30	6.36	48.62
Semana 2	Densidad30	30	6.2	56.03



Semana 3	Densidad30	30	6.59	48.44
Semana 4	Densidad30	30	6.68	47.49
Semana 5	Densidad30	30	6.65	54.46
Semana 1	Densidad50	5	5.23	50.63
Semana 2	Densidad50	5	5.39	55.51
Semana 3	Densidad50	5	5.5	51.03
Semana 4	Densidad50	5	5.37	50.57
Semana 5	Densidad50	5	5.47	55.54
Semana 1	Densidad50	15	5.1	67.50
Semana 2	Densidad50	15	5.49	74.02
Semana 3	Densidad50	15	5.07	68.04
Semana 4	Densidad50	15	5.04	67.43
Semana 5	Densidad50	15	5.43	74.05
Semana 1	Densidad50	30	6.15	84.38
Semana 2	Densidad50	30	5.89	92.52
Semana 3	Densidad50	30	6.1	85.05
Semana 4	Densidad50	30	6.23	84.28
Semana 5	Densidad50	30	6	92.56

### Datos procesados a nivel escala de laboratorio conjugados por semana para pH

Sem	Densidad	Tiempo	pH	%pH
S1	Densidad10	5	4.0	7
S2	Densidad10	5	4.0	6
S1	Densidad10	15	4.15	
S2	Densidad10	15	4.17	
S1	Densidad10	30	4.53	
S2	Densidad10	30	4.2	9
S1	Densidad30	5	6.5	0
S2	Densidad30	5	6.17	
S1	Densidad30	15	6.6	0
S2	Densidad30	15	6.4	6
S1	Densidad30	30	6.3	6
S2	Densidad30	30	6.2	0
S1	Densidad50	5	5.23	
S2	Densidad50	5	5.39	
S1	Densidad50	15	5.10	

Sem	Densidad	Tiempo	pH	%pH
S1	Densidad10	5	4.07	
S3	Densidad10	5	4.05	
S1	Densidad10	15	4.15	4.2
S3	Densidad10	15	4.0	
S1	Densidad10	30	4.53	
S3	Densidad10	30	4.25	
S1	Densidad30	5	6.50	
S3	Densidad30	5	6.22	
S1	Densidad30	15	6.6	0
S3	Densidad30	15	6.38	
S1	Densidad30	30	6.36	
S3	Densidad30	30	6.59	
S1	Densidad50	5	5.23	
S3	Densidad50	5	5.50	
S1	Densidad50	15	5.10	

S2	Densidad5	0	15	5.49
S1	Densidad5	0	30	6.15
S2	Densidad5	0	30	5.89

S3	Densidad5	0	15	5.07
S1	Densidad5	0	30	6.15
S3	Densidad5	0	30	6.10

Semana1-4				
Sem	Densidad	Tiempo	pH	%pH
S1	Densidad1	0	5	4.07 7.66
S4	Densidad1	0	5	4.15 7.13
S1	Densidad1	0	15	4.15 15.33
S4	Densidad1	0	15	4.22 14.27
S1	Densidad1	0	30	4.53 22.99
S4	Densidad1	0	30	4.26 21.40
S1	Densidad3	0	5	6.50 24.31
S4	Densidad3	0	5	6.27 23.75
S1	Densidad3	0	15	6.60 36.47
S4	Densidad3	0	15	6.40 35.62
S1	Densidad3	0	30	6.36 48.62
S4	Densidad3	0	30	6.68 47.49
S1	Densidad5	0	5	5.23 50.63
S4	Densidad5	0	5	5.37 50.57
S1	Densidad5	0	15	5.10 67.50
S4	Densidad5	0	15	5.04 67.43
S1	Densidad5	0	30	6.15 84.38
S4	Densidad5	0	30	6.23 84.28

Semana1-5				
Sem	Densidad	Tiempo	pH	%pH
S1	Densidad1	0	5	4.07 7.66
S5	Densidad1	0	5	4.13 8.96
S1	Densidad1	0	15	4.15 15.33
S5	Densidad1	0	15	4.24 17.92
S1	Densidad1	0	30	4.53 22.99
S5	Densidad1	0	30	4.60 26.88
S1	Densidad3	0	5	6.50 24.31
S5	Densidad3	0	5	6.34 27.23
S1	Densidad3	0	15	6.60 36.47
S5	Densidad3	0	15	6.56 40.85
S1	Densidad3	0	30	6.36 48.62
S5	Densidad3	0	30	6.65 54.46
S1	Densidad5	0	5	5.23 50.63
S5	Densidad5	0	5	5.47 55.54
S1	Densidad5	0	15	5.10 67.50
S5	Densidad5	0	15	5.43 74.05
S1	Densidad5	0	30	6.15 84.38
S5	Densidad5	0	30	6.00 92.56

Semana2-3				
Sem	Densidad	Tiempo	pH	%pH
S2	Densidad1	0	5	4.06
S3	Densidad1	0	5	4.05
S2	Densidad1	0	15	4.17
S3	Densidad1	0	15	4.20
S2	Densidad1	0	30	4.29
S3	Densidad1	0	30	4.25

Semana2-4				
Sem.	Densidad	Tiempo	pH	%pH
S2	Densidad1	0	5	4.06
S4	Densidad1	0	5	4.15
S2	Densidad1	0	15	4.17
S4	Densidad1	0	15	4.22
S2	Densidad1	0	30	4.29
S4	Densidad1	0	30	4.26

S2	Densidad3	0	5	6.17
S3	Densidad3	0	5	6.22
S2	Densidad3	0	15	6.46
S3	Densidad3	0	15	6.38
S2	Densidad3	0	30	6.20
S3	Densidad3	0	30	6.59
S2	Densidad5	0	5	5.39
S3	Densidad5	0	5	5.50
S2	Densidad5	0	15	5.49
S3	Densidad5	0	15	5.07
S2	Densidad5	0	30	5.89
S3	Densidad5	0	30	6.10

S2	Densidad3	0	5	6.17
S4	Densidad3	0	5	6.27
S2	Densidad3	0	15	6.46
S4	Densidad3	0	15	6.40
S2	Densidad3	0	30	6.20
S4	Densidad3	0	30	6.68
S2	Densidad5	0	5	5.39
S4	Densidad5	0	5	5.37
S2	Densidad5	0	15	5.49
S4	Densidad5	0	15	5.04
S2	Densidad5	0	30	5.89
S4	Densidad5	0	30	6.23

Sem	Densidad	Tiempo	pH	%pH
S2	Densidad1	0	5	4.0
S5	Densidad1	0	5	4.13
S2	Densidad1	0	15	4.17
S5	Densidad1	0	15	4.24
S2	Densidad1	0	30	4.29
S5	Densidad1	0	30	4.6
S2	Densidad3	0	5	6.17
S5	Densidad3	0	5	6.34
S2	Densidad3	0	15	6.46
S5	Densidad3	0	15	6.56
S2	Densidad3	0	30	6.2
S5	Densidad3	0	30	6.65
S2	Densidad5	0	5	5.39
S5	Densidad5	0	5	5.47
S2	Densidad5	0	15	5.49
S5	Densidad5	0	15	5.43

Sem	Densidad	Tiempo	pH	%pH
S3	Densidad1	0	5	4.05
S4	Densidad1	0	5	4.15
S3	Densidad1	0	15	4.20
S4	Densidad1	0	15	4.22
S3	Densidad1	0	30	4.25
S4	Densidad1	0	30	4.26
S3	Densidad3	0	5	6.22
S4	Densidad3	0	5	6.27
S3	Densidad3	0	15	6.38
S4	Densidad3	0	15	6.40
S3	Densidad3	0	30	6.59
S4	Densidad3	0	30	6.68
S3	Densidad5	0	5	5.50
S4	Densidad5	0	5	5.37
S3	Densidad5	0	15	5.07
S4	Densidad5	0	15	5.04

S2	Densidad50	30	5.89
S5	Densidad50	30	6.00

S3	Densidad50	30	6.10
S4	Densidad50	30	6.23

Semana3-5			
Sem	Densidad	Tiempo	%pH
S3	Densidad10	5	4.05
S5	Densidad10	5	4.13
S3	Densidad10	15	4.20
S5	Densidad10	15	4.24
S3	Densidad10	30	4.25
S5	Densidad10	30	4.60
S3	Densidad30	5	6.22
S5	Densidad30	5	6.34
S3	Densidad30	15	6.38
S5	Densidad30	15	6.56
S3	Densidad30	30	6.59
S5	Densidad30	30	6.65
S3	Densidad50	5	5.50
S5	Densidad50	5	5.47
S3	Densidad50	15	5.07
S5	Densidad50	15	5.43
S3	Densidad50	30	6.10
S5	Densidad50	30	6.00

Semana4-5			
Sem	Densidad	Tiempo	%pH
S4	Densidad10	5	4.15
S5	Densidad10	5	4.13
S4	Densidad10	15	4.22
S5	Densidad10	15	4.24
S4	Densidad10	30	4.26
S5	Densidad10	30	4.60
S4	Densidad30	5	6.27
S5	Densidad30	5	6.34
S4	Densidad30	15	6.40
S5	Densidad30	15	6.56
S4	Densidad30	30	6.68
S5	Densidad30	30	6.65
S4	Densidad50	5	5.37
S5	Densidad50	5	5.47
S4	Densidad50	15	5.04
S5	Densidad50	15	5.43
S4	Densidad50	30	6.23
S5	Densidad50	30	6.00

Este libro se terminó de publicar en la editorial

**Instituto Universitario  
de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú**



ISBN: 978-612-5069-49-8



EDITADA POR  
INSTITUTO  
UNIVERSITARIO  
DE INNOVACIÓN CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA INUDI PERÚ