

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCVELICA**

(Creada por Ley N° 25265)

**FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
AMBIENTAL Y SANITARIA**



**TESIS**

**“TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES  
DOMÉSTICAS UTILIZANDO CELDAS DE  
COMBUSTIBLE MICROBIANO (MFC) EN LA CIUDAD  
DE HUANCVELICA”**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:  
TECNOLOGÍA AMBIENTAL Y/O SANITARIA**

**PRESENTADO POR:**

Bach. MATAMOROS CONDORI, PETER

Bach. ZUÑIGA PARI, ANDERSON

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO

HUANCVELICA, PERÚ

2021



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCVELICA

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA

ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE TESIS



En la ciudad de Huancavelica, a los nueve días (09) del mes de setiembre del año 2021, siendo las dieciocho horas (18:06), se reunieron los miembros del Jurado Calificador conformado por los docentes: Mg. Pedro Antonio Palomino Pastrana (Presidente), M.Sc. Mabel Yesica Escobar Soldevilla (Secretaria), Mg. Wilfredo Sáez Huamán (Vocal), reestructurados con Resolución de Decano N° 006-2020-FCI-UNH, de fecha 08 de julio del 2020, a fin de proceder con la sustentación y calificación virtual mediante el aplicativo MEET del informe final de tesis titulado: **“TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS UTILIZANDO CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO (MFC) EN LA CIUDAD DE HUANCVELICA”**, presentado por los Bachilleres **Anderson ZUÑIGA PARI y Peter MATAMOROS CONDORI**, con presencia del Dr. Víctor Guillermo Sánchez Araujo, Asesor de la presente tesis a fin de optar el **Título Profesional de Ingeniero Ambiental y Sanitaria**. Finalizada la sustentación virtual a horas 6: 50 pm.; se comunicó a los sustentantes y al público en general que los Miembros del Jurado abandonará el aula virtual para deliberar el resultado:

**Anderson ZUÑIGA PARI**

APROBADO  POR UNANIMIDAD

DESAPROBADO

**Peter MATAMOROS CONDORI**

APROBADO  POR UNANIMIDAD

DESAPROBADO

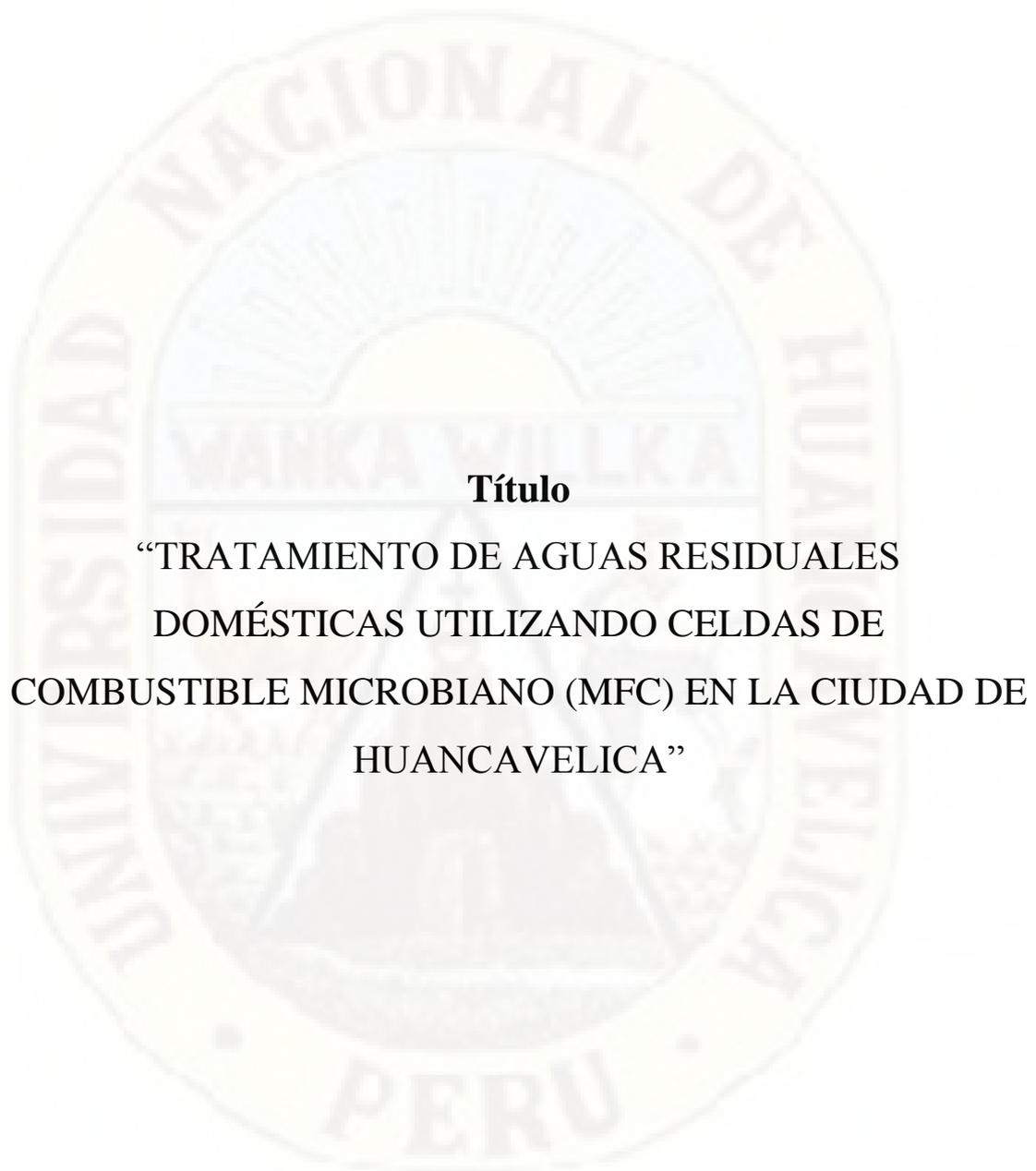
En señal de conformidad, firmamos a continuación:

\_\_\_\_\_  
Presidente

\_\_\_\_\_  
Secretario

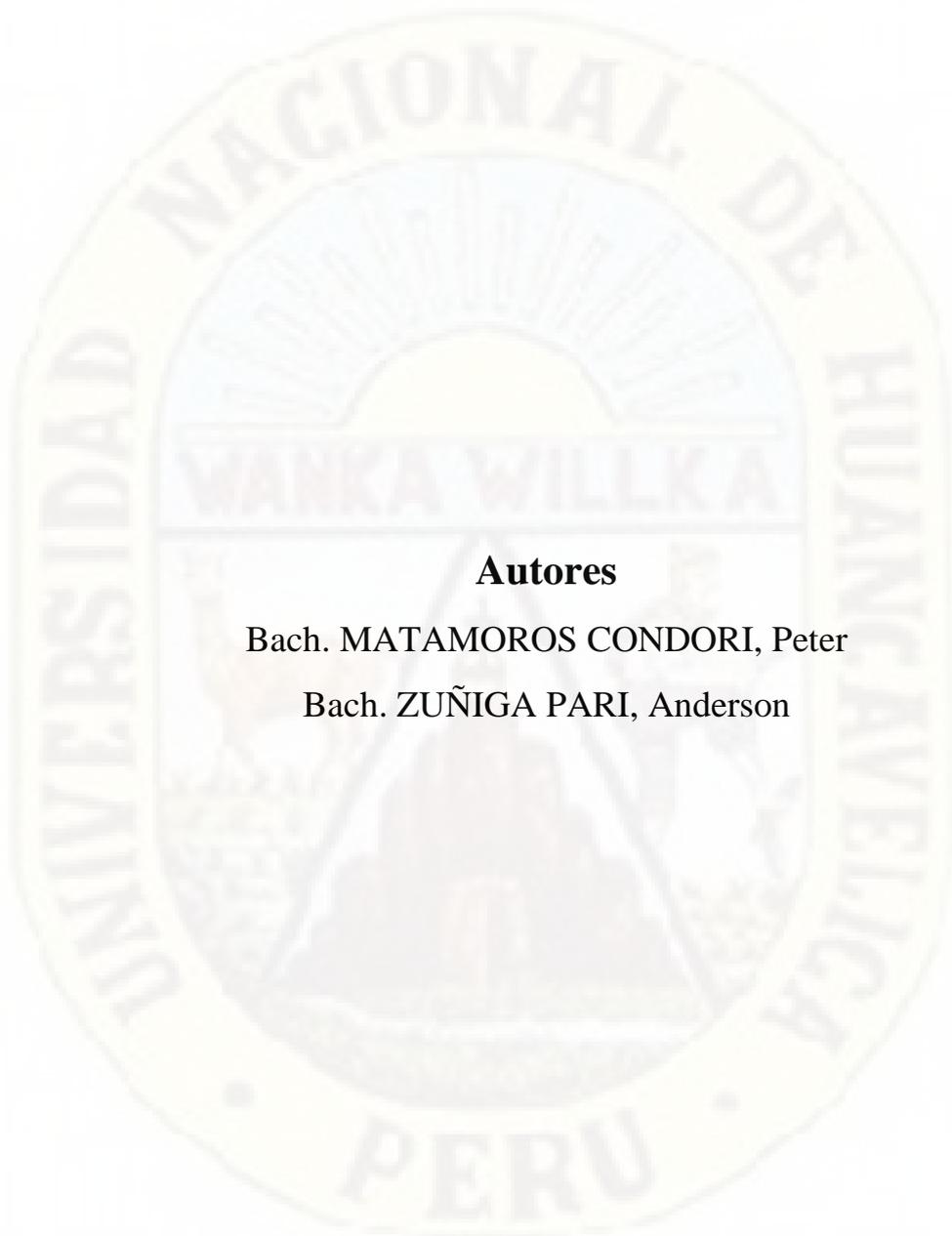
\_\_\_\_\_  
Vocal

\_\_\_\_\_  
V° B° Decano



## **Título**

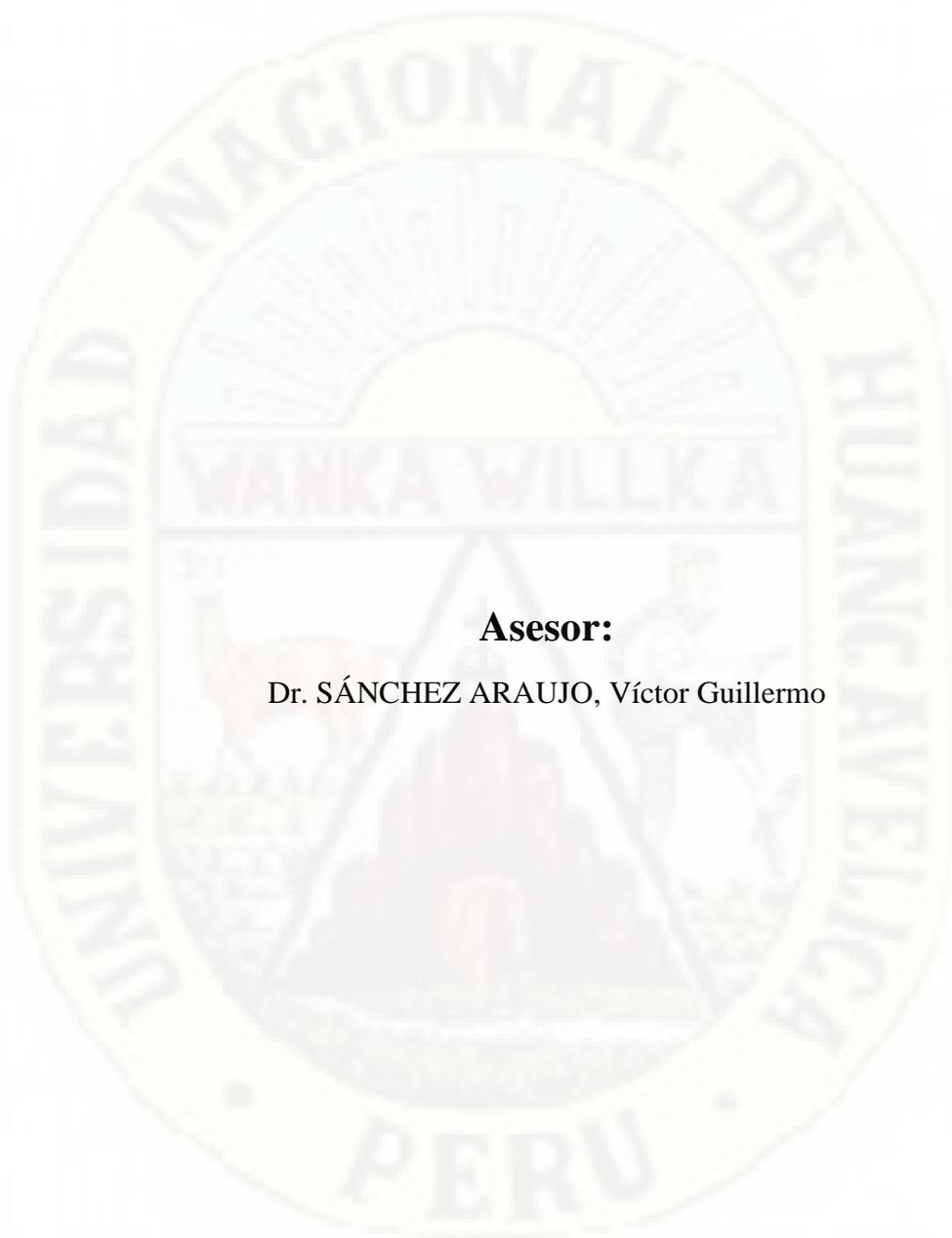
**“TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES  
DOMÉSTICAS UTILIZANDO CELDAS DE  
COMBUSTIBLE MICROBIANO (MFC) EN LA CIUDAD DE  
HUANCAVELICA”**



**Autores**

Bach. MATAMOROS CONDORI, Peter

Bach. ZUÑIGA PARI, Anderson



**Asesor:**

Dr. SÁNCHEZ ARAUJO, Víctor Guillermo

## **DEDICATORIA**

### **PETER**

A mi hija Luna y mi pareja Olinda que son razones de mi esfuerzo y en especial a mi padre Andrés, mi madre Elena, mi hermana Victoria y mi tío Sutil que han sido mi soporte moral y económico y a mis docentes de la escuela profesional de ingeniería ambiental y sanitaria por compartir sus conocimientos durante mi vida académica.

### **ANDERSON**

A mi madre Fortunata, a mi padre Dionisio F. y a mis hermanos Hugo, Angel, Dina, July, Deysi y Emerson, a mi novia Stephane, por su apoyo incondicional. A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, por sus enseñanzas para mi desempeño como futuro profesional.

## **AGRADECIMIENTOS:**

A Dios, por la fortaleza y perseverancia que impartió en nosotras para poder culminar con nuestro proyecto de investigación.

Mi agradecimiento a la Universidad Nacional de Huancavelica. Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, a los docentes que gracias a los conocimientos impartidos nos ayudó con el planteamiento del trabajo de investigación.

A mi asesor de tesis, el Dr. Víctor Guillermo Sánchez Araujo, que nos acogió, motivo y absolvió las dudas en el desarrollo de nuestro trabajo investigación, brindándonos las facilidades para desenvolvemos. Le agradecemos su confianza y tiempo.

A los miembros del jurado de tesis al M.Sc. Pedro Antonio, Palomino Pastrana, M.Sc. Mabel Yesica, Escobar Soldevilla y Wilfredo Sáez Huamán por sus aportes y recomendaciones para realizar un buen trabajo de investigación.

## Índice general

<b>Índice general</b> .....	vii
<b>Índice de tablas</b> .....	iv
<b>Índice de figuras</b> .....	x
<b>Resumen</b> .....	xii
<b>Abstract</b> .....	xiii
<b>Introducción</b> .....	xiv
<b>CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	
<b>1.1 Descripción del problema</b> .....	1
<b>1.2 Formulación del problema</b> .....	3
1.2.1 Problema general: .....	3
1.2.2 Problema específico .....	3
<b>1.3 Objetivos</b> .....	3
1.3.1 Objetivo general: .....	3
1.3.2 Objetivo específico: .....	3
<b>1.4 Justificación</b> .....	3
<b>CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO</b>	
<b>2.1 Antecedentes</b> .....	5
<b>2.2 Bases teóricas</b> .....	10
<b>2.3 Bases conceptuales</b> .....	11
<b>2.4 Definición de términos</b> .....	24
<b>2.5 Hipótesis</b> .....	25
2.5.1 Hipótesis General: .....	25
2.5.2 Hipótesis Específica: .....	26
<b>2.6 Variables</b> .....	26
2.6.1 Variable independiente .....	26
2.6.2 Variable Dependiente .....	26
<b>2.7 Operacionalización de variables:</b> .....	27
<b>CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN</b>	
<b>3.1 Ámbito temporal y espacial</b> .....	29
3.1.1 Ámbito temporal .....	29

3.1.2	Ámbito espacial.....	29
<b>3.2</b>	<b>Tipo de investigación.....</b>	<b>30</b>
<b>3.3</b>	<b>Nivel de investigación.....</b>	<b>30</b>
<b>3.4</b>	<b>Población, muestra y muestreo .....</b>	<b>31</b>
3.4.1	Población:.....	32
3.4.2	Muestra:.....	32
<b>3.5</b>	<b>Muestreo.....</b>	<b>32</b>
<b>3.6</b>	<b>Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....</b>	<b>32</b>
3.6.1	Técnicas de recolección de datos .....	33
3.6.2	Instrumentos de recolección de datos.....	33
3.6.3	Instrumentos de recolección de datos en campo .....	33
<b>3.7</b>	<b>Técnicas de procesamiento y análisis de datos .....</b>	<b>41</b>
<b>CAPÍTULO IV PRESENTACIÓN DE RESULTADOS</b>		
<b>4.1</b>	<b>Análisis de información .....</b>	<b>43</b>
<b>4.2</b>	<b>Prueba de hipótesis .....</b>	<b>46</b>
<b>4.3</b>	<b>Discusión de resultados.....</b>	<b>51</b>
	<b>Conclusiones.....</b>	<b>53</b>
	<b>Recomendaciones.....</b>	<b>54</b>
	<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>55</b>
	<b>Apéndice .....</b>	<b>59</b>

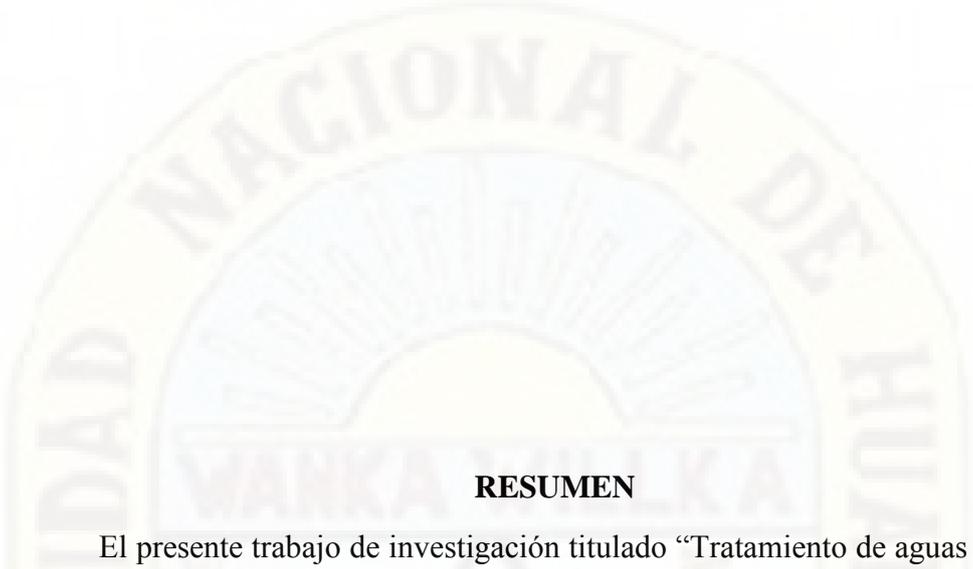
## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Constituyentes típicas de las aguas residuales.</i> .....	12
<b>Tabla 2</b> <i>Operacionalización de variables estudiadas.</i> .....	27
<b>Tabla 3</b> <i>Cronograma de monitoreo y análisis de laboratorio</i> .....	29
<b>Tabla 4</b> <i>Valores medios de amperaje</i> .....	43
<b>Tabla 5</b> <i>valores medios de conductividad eléctrica</i> .....	44
<b>Tabla 6</b> <i>Test de normalidad para las lecturas de amperaje</i> .....	46
<b>Tabla 7</b> <i>Test de normalidad para las lecturas de conductividad eléctrica.</i> .....	46
<b>Tabla 8</b> <i>Análisis de varianza para los valores de amperaje</i> .....	49
<b>Tabla 9</b> <i>Análisis de varianza para los valores de conductividad electrica</i> .....	49
<b>Tabla 10</b> <i>Matriz de consistencia</i> .....	60
<b>Tabla 11</b> <i>Base de datos del amperaje</i> .....	62
<b>Tabla 12</b> <i>Base de datos de la conductividad eléctrica</i> .....	66

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Esquema de los componentes básicos de una MFC.....	17
<b>Figura 2</b> Diversas configuraciones de MFC de dos cámaras.....	20
<b>Figura 3</b> Bacteria del Genero Geobacter.....	22
<b>Figura 4</b> Ubicación geográfica de la zona para pruebas experimentales. ....	30
<b>Figura 5</b> Construcción de la celda de MFC.....	34
<b>Figura 6</b> Lavado de las celdas de MFC.....	35
<b>Figura 7</b> Esterilización de las celdas de combustible microbiano (MFC).....	35
<b>Figura 8</b> Toma de muestra de sustrato.....	36
<b>Figura 9</b> Construcción de la cama anódica.....	37
<b>Figura 10</b> Construcción de la cámara catódica.....	37
<b>Figura 11</b> Limpieza de puente de intercambio de protones.....	38
<b>Figura 12</b> Ubicación del circuito electrico.....	39
<b>Figura 13</b> Monitoreo del amperaje con el multímetro.....	40
<b>Figura 14</b> Monitoreo de la conductividad electrica con el multímetro.....	40
<b>Figura 15</b> Valores de amperaje ( $\mu\text{A}$ ) x celda de combustible microbiano (MFC) ...	43
<b>Figura 16</b> Valores de conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) por celda de combustible microbiano (MFC).....	44
<b>Figura 17</b> Grafica del valor crítico y el valor de Fisher. ....	49
<b>Figura 18</b> Lavado de los materiales de las celdas MFC.....	93
<b>Figura 19</b> Lavado con detergente de las celdas de MFC.....	93
<b>Figura 20</b> Lavado de tapas y chupones de celdas MFC.....	94
<b>Figura 21</b> Lavado del puente de intercambio de las celdas de MFC.....	94
<b>Figura 22</b> Segunda lavada de las celdas de MFC.....	95
<b>Figura 23</b> Enjuagado de las celdas de MFC.....	95
<b>Figura 24</b> Oreado de los materiales.....	96
<b>Figura 25</b> Secado de las celdas de MFC.....	96
<b>Figura 26</b> Lavado de roscas.....	97
<b>Figura 27</b> Lavado del puente ce cambio cationico.....	97
<b>Figura 28</b> Oreado de tapas.....	98
<b>Figura 29</b> Oreado de materiales.....	98
<b>Figura 30</b> Cosntruccion de las celdas de MFC.....	99

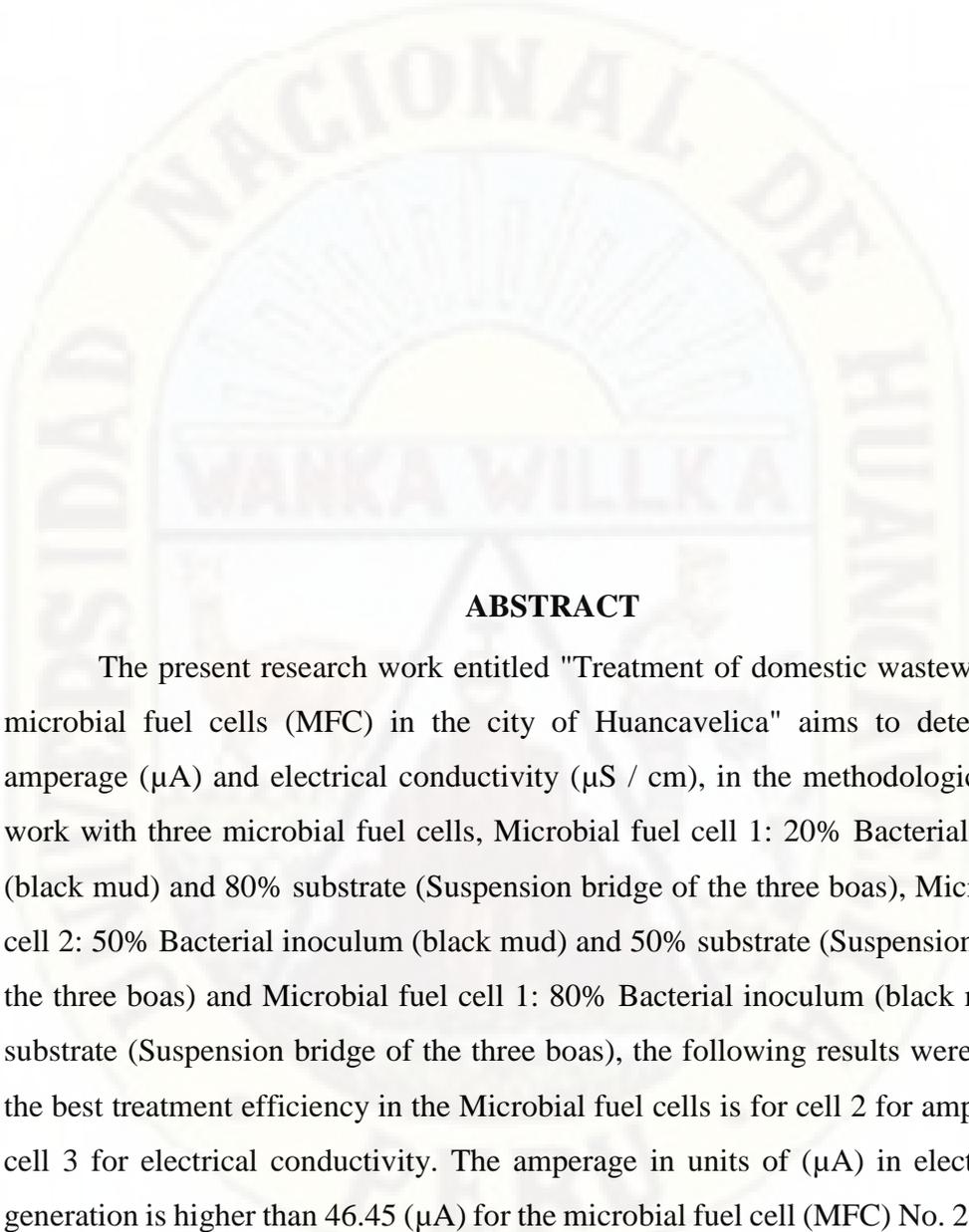
<b>Figura 31</b> Esterilización de las celdas .....	99
<b>Figura 32</b> Esterilización de tapas.....	100
<b>Figura 33</b> Esterilización de chupones .....	100
<b>Figura 34</b> Secado en estufa a 65 ° por 2 horas .....	101
<b>Figura 35</b> Proceso de secado de tapas y chupones.....	101
<b>Figura 36</b> Proceso de secado .....	102
<b>Figura 37</b> Proceso de monitoreo de las dos celdas anódica y catódica .....	102
<b>Figura 38</b> Monitoreo de las lecturas de amperaje. ....	103
<b>Figura 39</b> lectura de las muestras de conductividad eléctrica.....	103
<b>Figura 40</b> Equipo para producir oxígeno en cámara anódica .....	104
<b>Figura 41</b> proceso de pre prueba .....	104
<b>Figura 42</b> proceso de monitoreo de las muestras .....	105
<b>Figura 43</b> lavado y enjuague para la adaptación .....	105
<b>Figura 44</b> oxigenación de las cámaras .....	106
<b>Figura 45</b> proceso de instalado de las celdas de MFC.....	106
<b>Figura 46</b> Proceso de monitoreo de las celdas de MFC.....	107
<b>Figura 47</b> Proceso final para la colección de los datos de amperaje y conductividad eléctrica.....	107



## RESUMEN

El presente trabajo de investigación titulado “Tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica” tiene por objetivo determinar el amperaje ( $\mu\text{A}$ ) y la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), en la parte metodológica de trabajo con tres celdas de combustible microbiano, Celda de combustible microbiano 1: 20 % Inoculo bacteriano (lodo negro) y 80 % sustrato (Puente colgante de las tres boas), Celda de combustible microbiano 2: 50 % Inoculo bacteriano (lodo negro) y 50 % sustrato (Puente colgante de las tres boas) y Celda de combustible microbiano 3: 80 % Inoculo bacteriano (lodo negro) 20 % sustrato (Puente colgante de las tres boas) se llegó a los siguientes resultados la mejor eficiencia de tratamiento en las celdas de combustible microbiano es para la celda 2 para amperaje y en la celda 3 la conductividad eléctrica. El amperaje en unidades de ( $\mu\text{A}$ ) en la generación de energía eléctrica es superior a 46.45 ( $\mu\text{A}$ ) para la celda de combustible microbiano (MFC) N°02 en ciudad de Huancavelica. En la conductividad eléctrica en unidades de ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en la generación de energía eléctrica es superior a 735.58 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) para la celda de combustible microbiano (MFC) N°03 en ciudad de Huancavelica.

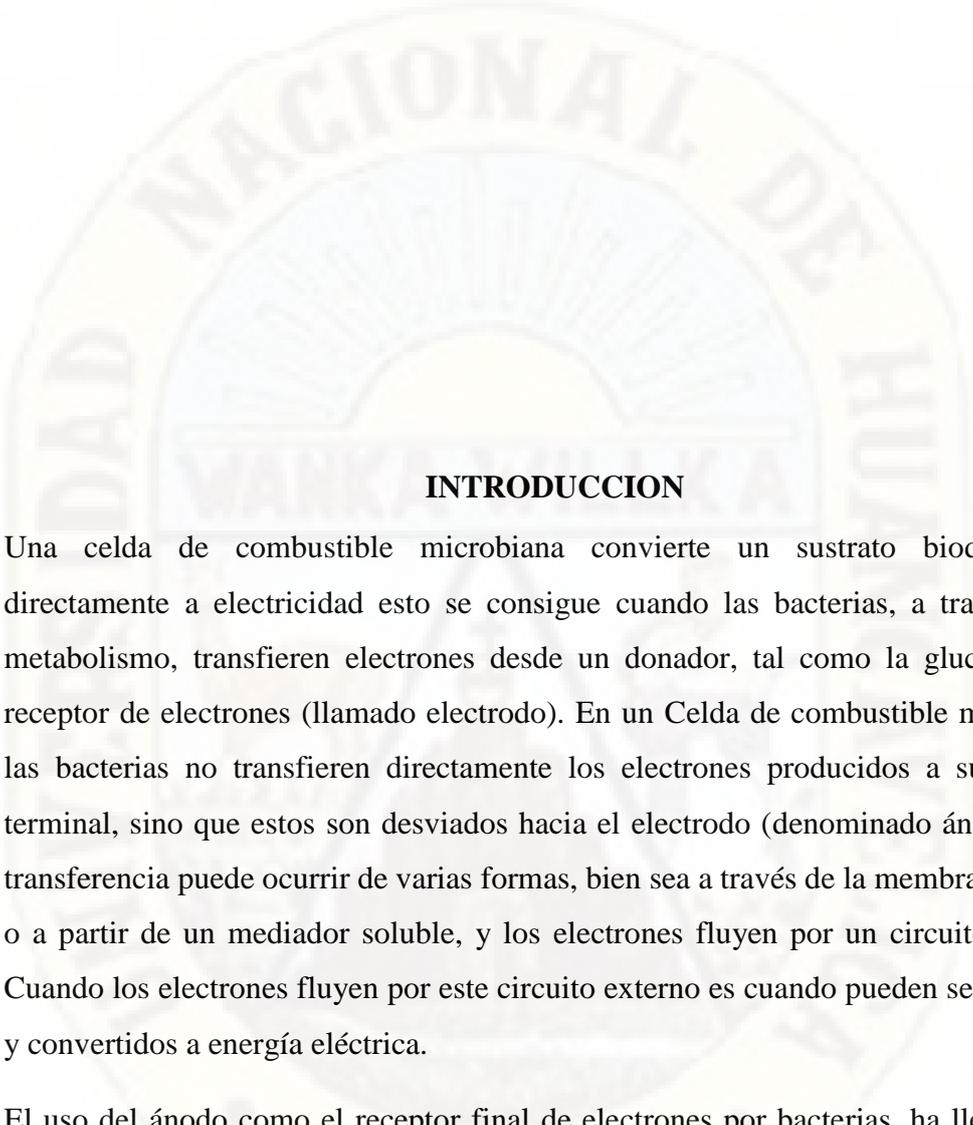
**Palabras clave:** Amperaje, Conductividad, Celdas, Combustible, Microbiano.



## ABSTRACT

The present research work entitled "Treatment of domestic wastewater using microbial fuel cells (MFC) in the city of Huancavelica" aims to determine the amperage ( $\mu\text{A}$ ) and electrical conductivity ( $\mu\text{S} / \text{cm}$ ), in the methodological part of work with three microbial fuel cells, Microbial fuel cell 1: 20% Bacterial inoculum (black mud) and 80% substrate (Suspension bridge of the three boas), Microbial fuel cell 2: 50% Bacterial inoculum (black mud) and 50% substrate (Suspension bridge of the three boas) and Microbial fuel cell 3: 80% Bacterial inoculum (black mud) 20% substrate (Suspension bridge of the three boas), the following results were obtained, the best treatment efficiency in the Microbial fuel cells is for cell 2 for amperage and cell 3 for electrical conductivity. The amperage in units of ( $\mu\text{A}$ ) in electric power generation is higher than 46.45 ( $\mu\text{A}$ ) for the microbial fuel cell (MFC) No. 2 in the city of Huancavelica. The electrical conductivity in units of ( $\mu\text{S} / \text{cm}$ ) in the generation of electrical energy is higher than 735.58 ( $\mu\text{S} / \text{cm}$ ) for the microbial fuel cell (MFC) No. 3 in the city of Huancavelica.

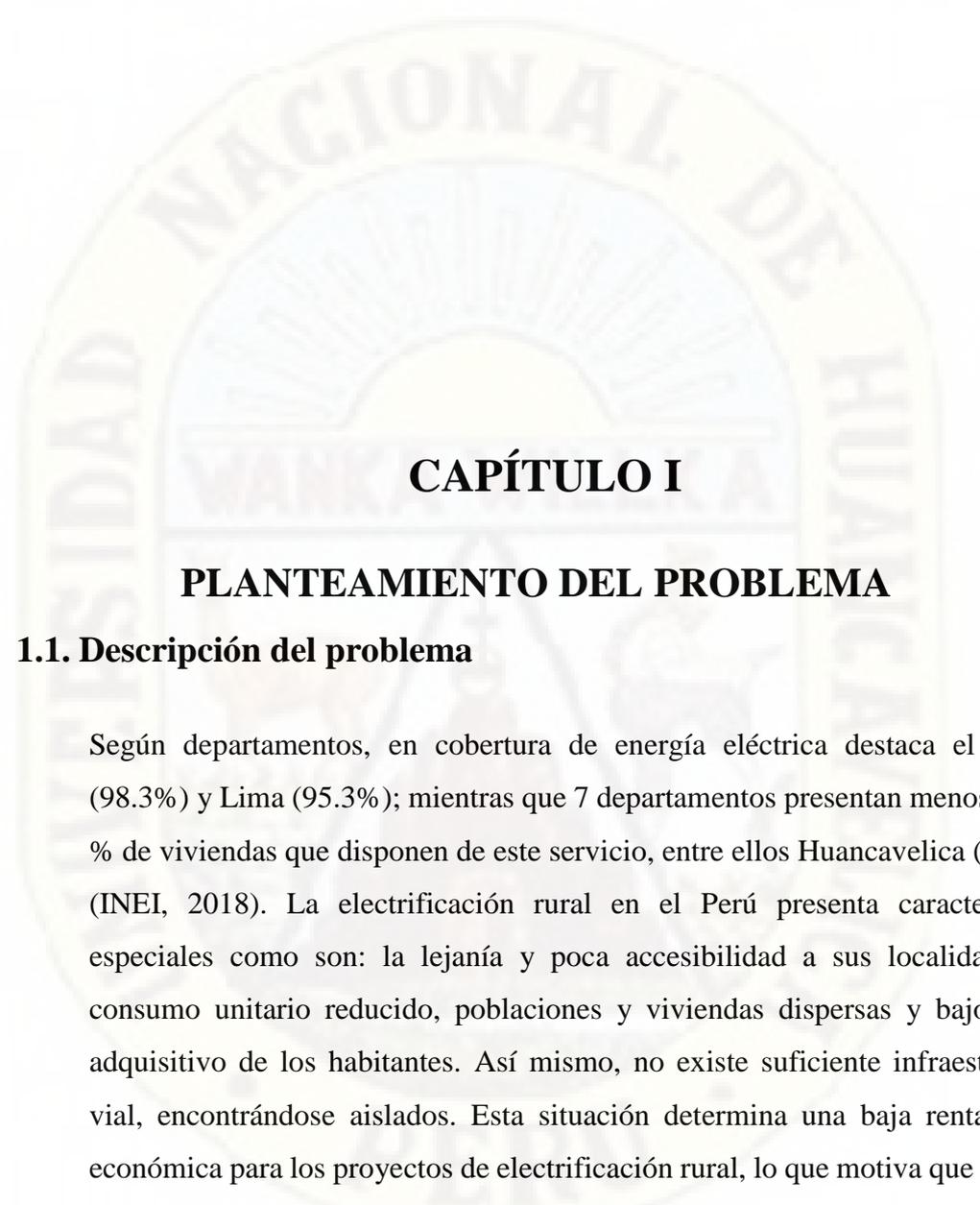
Keywords: Amperage, Conductivity, Cells, Fuel, Microbial



## INTRODUCCION

Una celda de combustible microbiana convierte un sustrato biodegradable directamente a electricidad esto se consigue cuando las bacterias, a través de su metabolismo, transfieren electrones desde un donador, tal como la glucosa, a un receptor de electrones (llamado electrodo). En un Celda de combustible microbiano las bacterias no transfieren directamente los electrones producidos a su receptor terminal, sino que estos son desviados hacia el electrodo (denominado ánodo). Esta transferencia puede ocurrir de varias formas, bien sea a través de la membrana celular o a partir de un mediador soluble, y los electrones fluyen por un circuito externo. Cuando los electrones fluyen por este circuito externo es cuando pueden ser captados y convertidos a energía eléctrica.

El uso del ánodo como el receptor final de electrones por bacterias, ha llevado a la posibilidad de una variedad de aplicaciones, Debe mencionarse, que muchas de estas potenciales aplicaciones aun no son viables y requieren de mejoras significativas. Una de las áreas más activas de la investigación de este tipo de tecnologías, es la producción de energía a partir del agua residual, combinada con la oxidación de los compuestos orgánicos e inorgánicos. Los estudios demuestran que cualquier sustancia biodegradable puede ser convertida en electricidad. Las celdas de combustible microbianas a gran escala para el tratamiento de aguas residuales, aun presentan problemas debido a los costos y a las lentas tasas de degradación del sustrato.



# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Descripción del problema

Según departamentos, en cobertura de energía eléctrica destaca el Callao (98.3%) y Lima (95.3%); mientras que 7 departamentos presentan menos del 80 % de viviendas que disponen de este servicio, entre ellos Huancavelica (77.5%) (INEI, 2018). La electrificación rural en el Perú presenta características especiales como son: la lejanía y poca accesibilidad a sus localidades, el consumo unitario reducido, poblaciones y viviendas dispersas y bajo poder adquisitivo de los habitantes. Así mismo, no existe suficiente infraestructura vial, encontrándose aislados. Esta situación determina una baja rentabilidad económica para los proyectos de electrificación rural, lo que motiva que no sean atractivos a la inversión privada (MINEM, 2015).

Por otra parte, nos enfrentamos a la contaminación del agua, todo ello a consecuencia de las actividades del hombre, ya que constantemente se vierte por negligencia desechos a los ríos, mares, etc. con deficiente tratamiento que se da en las plantas depuradoras de aguas residuales (Llontop, 2018). Los Impactos que vienen generando las aguas residuales se agrupan en tres: el primero es el

impacto directo, sobre los seres humanos, mediante la transmisión de enfermedades; el segundo es el impacto indirecto sobre los cuerpos receptores, presentándose efectos en el medio ambiente y por último los impactos estéticos que alteran el aspecto natural y agradable de cuerpo superficial (Pistonesi, Haure, & D`Elmar, 2010). Es indispensable tratar estos efluentes de agua residuales, para disminuir el impacto ambiental que ocasionan (Bermudez & Bernal, 2018).

En nuestro país, se producen millones de metros cúbicos de aguas residuales al día, provenientes de la población, en actividades como lavado de ropa, aseo personal, necesidades fisiológicas, etc. y que poseen enormes cantidades de materia orgánica e inorgánica (Llontop, 2018). Estas aguas residuales generan un mayor impacto, debido a que el alcantarillado solo brinda servicio al 69.65 % de la población, el resto de la población vierte directamente sus aguas residuales sin tratamiento al mar, ríos, lagos, quebradas o, las emplean para el riego de cultivos (OEFA, 2014). La población que cuenta con red de alcantarillado genera 2 217 946 m<sup>3</sup> por día de aguas residuales, del cual solo el 32 % recibe tratamiento (OEFA, 2014). Según el censo del 2017 el 6.7 % (518 477) de viviendas particulares no tienen ningún tipo de servicios desagüe, sus ocupantes eliminan las excretas en río, acequia, o al aire libre (INEI, 2018).

En respuesta a la mencionada problemática, en las últimas décadas la comunidad científica ha buscado alternativas tecnológicas que contribuyan a la solución de la crisis energética y la contaminación del agua; estos problemas se han abordado individualmente, a través de fuentes de energía renovables no convencionales y sistemas de tratamiento de agua residual (Franco & Ricaurte, 2018). Sin embargo, la competencia por ambos recursos ha llevado al desarrollo de alternativas tecnológicas sostenibles que incorporan sistemas con doble funcionalidad, dentro de estas tecnologías están MFC como una opción promisoriosa para el tratamiento y aprovechamiento del agua residual (Franco & Ricaurte, 2018).

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema general**

¿Cuál será la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- a) ¿Cuál es el amperaje ( $\mu\text{A}$ ) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica?
- b) ¿Cuál es la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Determinar la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- a) Determinar el amperaje ( $\mu\text{A}$ ) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.
- b) Determinar la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

## **1.4. Justificación**

Las plantas de tratamiento de aguas domesticas las cuales están alejadas de toda población y contribuir con la búsqueda e investigación de energías renovables. Del mismo modo para tratar las aguas residuales municipales de la ciudad de

Huancavelica, las cuales no reciben ningún tratamiento y actualmente están siendo vertidas al río Ichu generando efectos perjudiciales para la salud pública, medio ambiente y aspecto agradable de la ciudad. Las celdas de combustible microbianas (MFC) además de tratar las aguas residuales generan energía eléctrica simultánea. Las MFC son de gran importancia para el departamento de Huancavelica porque; en primer lugar, se podrá suministrar de energía eléctrica a las zonas rurales, reducirán los costos de tratamiento de agua residuales; operarán eficientemente a la temperatura baja que presenta el departamento; será de fácil aplicación en localidades remotas por la facilidad de construcción y operación; las aguas tratadas podrán ser utilizadas en usos agrícolas sin efectos adversos y se generarán menores cantidades de lodos que otros tratamientos convencionales. Por último, se realizó la tesis porque las MFC son una tecnología emergente e innovadora, la cual actualmente están en etapa de investigación y promete resultados eficientes.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes

##### 2.1.1. Antecedentes a nivel internacional

Según Ñacato (2018) quien apreció la aplicación del campo magnético (CM) en la producción de energía eléctrica a partir de la degradación de aguas residuales domésticas utilizando MFC tipo batch. Se trabajó con dos aguas: sintéticas (AS) y residuales domésticas (AR), con dos DQO de 500 mg/L y 1000 mg/L y una intensidad de CM de 95 mT y otro de control de 0 mT; las celdas fueron construidas con accesorios de tuberías, membrana de papel celofán e imanes de neodimio para la generación del CM, operando durante una semana (93 horas). Se demostró que la aplicación del CM mejoró la degradación de materia orgánica y disminuyó el tiempo de funcionamiento de la MFC a 2 días, removiendo un máximo porcentaje de DQO de 84.04% en la AR (r. alto); los mayores voltajes (607.67 mV) se produjeron con el CM durante los primeros días. Demostrándose así, que es posible construir MFC con materiales de bajo costo, obteniéndose una mejor remoción de contaminantes y una producción de bioelectricidad con la aplicación de un CM de 95 mT.

Según Medina & Zapata (2017) quienes calcularon la producción de energía eléctrica y disminución de DQO en agua residual sintética mediante MFC a escala laboratorio, mediante la acción de dos bacterias,

*Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*, y electrodos de grafito y tela de carbono. Los resultados mostraron que *Escherichia coli* fue la bacteria que con determinadas condiciones de pH, temperatura, mediador y material del electrodo se obtuvo los mayores valores de voltaje (386 mV) y la mayor disminución de DQO (11.53% de 23248 mg/L a 20568mg/L) Lo anterior permite determinar la factibilidad del uso de bacterias para la producción de energía eléctrica y disminución de DQO simultaneo, con lo que se busca la disminución en los costos de operación de cualquier planta de tratamiento de aguas residuales.

Según la tesis doctoral de Gonzáles (2015) quien realizó la valorización energética y tratamiento de efluentes residuales de la industria de los zumos de frutas mediante MFC. Se trabajaron en tres etapas, la primera mediante MFC de hidrógeno acoplado a celda de combustible donde el biohidrógeno generado se utilizó como combustible para producir electricidad; la segunda una microMFC donde se realizó la aclimatación a flujo discontinuo y tratamiento a flujo continuo; y finalmente MFC fotosintética donde se sustituyó la aireación por un cultivo de algas. Obteniéndose un máximo porcentaje de eliminación de DQO del 70 % con las microMFC y una máxima producción de electricidad de 32 mV con las MFC fotosintética. También se observó que al aumentar la resistencia externa desde 120 hasta 1 000  $\Omega$ , aumentó la potencia eléctrica generada y la velocidad de eliminación de DQO debido a que disminuyeron las pérdidas energéticas.

Según Saavedra (2012) quien evaluó el diseño de una MFC con el uso de bacterias oxidantes de azufre y hierro, a fin de probar la viabilidad de la generación de bioelectricidad, se construyó una celda a escala de laboratorio, operada en forma discontinua (biopila), de doble cámara de 135 mL y 35 mL respectivamente, con discos de grafito de 1.6 cm de diámetro como electrodos, una membrana de intercambio de cationes Nafion como separador, y un área transversal de 2 cm de diámetro. La

celda se operó durante 526 h a 25 °C manteniéndose con una carga (resistencia externa) en circuito cerrado de 1 K $\Omega$  entre mediciones. Se halló un valor de máxima densidad de potencia de 9 W/m<sup>2</sup> y voltaje 460 mV a las 507 h de operación. Concluyéndose que la operación de la celda confirmó la viabilidad de generar bioelectricidad a partir de compuestos inorgánicos reducidos de azufre.

Según Buitrón & Pérez (2011) quienes estudiaron la producción de electricidad y la eliminación de materia orgánica en MFC utilizando agua residual: midiendo el efecto de la distancia entre electrodos. Para ello se construyeron 3 celdas de geometría semejante, pero con diferente volumen. En promedio, se obtuvo una eficiencia de eliminación de materia orgánica del 71%, la duración del ciclo fue de 0.97, 1.03 y 5.93 días para la celda de 40, 80 y 120 mL respectivamente. Demostrándose que el aumento de distancia entre los electrodos no causó un efecto negativo en la generación de energía eléctrica, en la mayor separación (celda de 120 mL) se alcanzó un máximo voltaje de 660 mV y una máxima densidad de potencia de 408 mW/m<sup>2</sup>.

Según Cervantes (2011) quien observó la biodegradación de aguas residuales y producción de electricidad en MFC. Para ello se construyeron y operaron 4 MFC con cátodo flotante (CF) y 1 con bafles y ánodo en forma de escobillón (BAE). Primero, se comparó el efecto de la presencia de fenol; segundo, la resistencia externa fija (220, 460 y 1000  $\Omega$ ) y la resistencia externa variable; tercero, el comportamiento electroquímico de 2 MFC-CF previamente aclimatadas; y, por último, se operó, evaluó y comparó el comportamiento de una MFC construida con materiales de bajo costo (BAE) con el comportamiento de la MFC operada anteriormente (CF). Los mayores valores de degradación de fenol (60.9 %) y de densidad de potencia (31.6 mW/m<sup>2</sup>) se obtuvieron cuando la resistencia externa del circuito fue igual a la resistencia interna

de la MFC (460  $\Omega$ ). La MFC-BAE generó una menor densidad potencia y degradación de materia orgánica.

Según Huitzil (2010) quien calculó la generación de electricidad empleando *Geobacter Sulfurreducens*, al explicar el funcionamiento de las MFC para aprovechar la electricidad generada por este tipo de bacterias. Evaluó 5 estudios del empleo de *Geobacter Sulfurreducens* en diferentes países (México, EUA, Argentina y Corea del Sur), comparando los parámetros: medio de crecimiento, electrodos, valores eléctricos obtenidos, temperatura y pH. El medio de crecimiento siempre estuvo compuesto por cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), fosfato diácido de sodio ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ), cloruro de potasio (KCl) y bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ); los electrodos en todos los casos fueron de carbón con tamaños desde 1.7 a 15.8 cm de largo, y 1.6 a 3.8 cm de ancho; la temperatura promedio de estos estudios fue de 34 °C, y el pH promedio fue de 6.1. Las resistencias empleadas tenían valores entre 100 y 4000  $\Omega$ , los valores de Voltaje oscilaron entre 0.35mV y 0.24 V, los valores de potencia se encontraron entre 335 y 880  $\text{mW/m}^2$ .

### **2.1.2. Antecedentes a nivel nacional**

Según Llontop (2018) quien apreció la influencia de los niveles de DBO de las aguas residuales crudas con la cantidad de energía eléctrica y los ligeros incrementos del pH en las cámaras anódicas utilizando MFC, Se recolectó 6 L de muestra de agua residual, se midió la producción de electricidad a tres distintos DBO (242, 150, 50 mg/L), se escogieron tres puntos de pH comunes (7.00, 7.24, 7.30) y se determinó si el incremento pH tuvo efecto sobre la cantidad de electricidad, se calculó el % de remoción de DBO. Los resultados obtenidos fueron evaluados mediante un análisis estadístico de varianza, la celda con 242 mg/L alcanzó la máxima potencia de 190.021  $\text{mW/m}^2$  a las 83.3 h y en el aumento del pH desde 7.16 a 7.32 se obtuvieron las densidades de potencia más altas

(175.9 mW/m<sup>2</sup>). El porcentaje de remoción de materia orgánica disminuyó con el incremento de DBO y la celda con 150 mg/L obtuvo el máximo de 86.67 %.

Según Rojas (2017) quien estudió la eficiencia de la generación eléctrica de un agente biológico en un sistema Bioelectroquímico. Se diseñó y se construyó una MFC usando una membrana de intercambio protónico (MIP) Nafion 117, electrodos de grafito de alta densidad y como agente biológico se aisló una bacteria nativa a partir de biomasa residual de origen porcícola, el sustrato usado fue el caldo de infusión, el sistema trabajó en régimen Batch que fue inoculado con la bacteria *E. faecium*, el cual estuvo funcionando por 10 000 minutos de manera continua. Los resultados muestran una media de producción energética de 3 kJ y una media de densidad de potencia de 4.5 W/m<sup>2</sup>. Por tanto, se puede concluir que es posible generar energía eléctrica con el *microorganismo E. faecium*.

Según Calderón (2017) quien apreció la generación y acumulación de energía eléctrica utilizando sistemas de MFC inoculadas con lodos activos procedentes de la PTAP “La Tomilla”- Arequipa. Se diseñó y construyó una MFC en ausencia de membrana de intercambio protónico, y se comparó con un sistema control con membrana Nafion 117 de esta manera se intentó demostrar que se puede excluir a las costosas membranas en la construcción de las MFC reduciendo costos de manera exponencial. Ambos sistemas se mantuvieron funcionando por 25 días de manera continua, produciendo una media de densidad de potencia de 200.22 mW/m<sup>2</sup> y 197.7mW/m<sup>2</sup> para cada sistema respectivamente. El análisis estadístico demostró que no existía diferencia significativa entre los resultados de ambos sistemas, por lo tanto, se demostró que las membranas de intercambio protónico pueden ser removidas de los diseños sin tener repercusiones negativas.

Según Pineda (2015) quien observó la producción de energía eléctrica en una MFC empleando Cascarilla de Arroz (*Oryza sativa*) como sustrato y Licor Ruminal Bovino como inóculo microbiano. Se realizó una comparación del sustrato consumido con la energía total producida. La MFC tuvo un diseño de dos cámaras cilíndricas concéntricas, tipo batch, con puente salino de cloruro de potasio y electrodos de malla de acero inoxidable 301. Se realizó una comparación entre celdas con rumen bovino y cascarilla de arroz (RB+CA) y celdas con rumen bovino (RB), Las celdas operaron durante 46 y 20 días respectivamente sin agotarse. Ambos tipos de celda reportaron valores de parámetros de producción de energía estadísticamente similares, siendo la máxima densidad de potencia de 4.94 mW/m<sup>2</sup>. Estos resultados demuestran que la cascarilla de arroz es un sustrato que puede ser degradado por microorganismos del rumen bovino para la producción de electricidad.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Teoría de transferencia de electrones en una célula.**

#### **A. Teoría enzimática.**

La teoría enzimática para la remoción de materia orgánica fue sustentada a través del trabajo de Weston y Eckenfelder (1955). Ellos propusieron un fenómeno superficial en el cual la formación de un complejo enzimático fue postulada como el responsable de la rápida remoción de la materia orgánica de la solución, y de la subsecuente asociación de la materia orgánica con el lodo. También sugirieron que la cantidad del complejo formado está relacionada con la cantidad de materia orgánica y la concentración de lodo activado. Más tarde se incorporó el mecanismo de permeabilidad mediante el cual se transportaba materia orgánica dentro de los microorganismos donde era almacenado o eliminados (19).

#### **B. Teoría de transferencia de masa.**

La transferencia de masa a través de una película estable del fluido se utiliza para explicar el ingreso de materia al agua residual y la posterior la remoción de materia orgánica (20).

- **Teoría de película:** El concepto básico de la resistencia a la difusión puede considerarse equivalente a la de una película estancada de un cierto espesor. La teoría de película se utiliza para problemas complejos de difusión o de difusión con reacción química.

- **Tratamientos convencionales para aguas residuales.**

La siguiente clasificación la realiza la mayoría de textos, las cuales se catalogan en tres niveles:

- **Tratamiento Primario:** Remoción de una porción de los sólidos suspendidos y materia orgánica.

- **Tratamiento Secundario:** Remoción de la materia orgánica biodegradable (en solución o en suspensión) y sólidos suspendidos. La desinfección es también típicamente incluida en la definición de tratamiento secundario convencional.

- **Tratamiento terciario:** Remoción de sólidos suspendidos residuales (después del tratamiento secundario), usualmente por medios de filtración granular o micro pantallas. La desinfección es también típicamente incluida al igual que la remoción de nutrientes.

- **Avanzado:** Remoción de materiales disueltos y suspendidos remanentes después de los normales tratamientos biológicos o cuando requiere varias aplicaciones de reúso del agua.

## 2.3. Bases conceptuales

### A. Agua Residual.

Es el agua que ha sido usada por una población o industria y contiene material orgánico o inorgánico disuelto o en suspensión.

Los factores que contribuyen a la contaminación del agua son:

- Aumento de la población.
- Diversidad y complejidad de procesos industriales.
- Producción de elementos de consumo en gran escala.

➤ Desecho de excretas a ríos, lagunas, esteros y litorales.

Para hablar de aguas residuales es indispensable conocer, en primera instancia, la fuente de las mismas y, los componentes que la forman.

### B. Clasificación de las aguas residuales.

- **Aguas residuales industriales:** Son aquellas que resultan del desarrollo de un proceso productivo.
- **Aguas residuales domésticas:** Son aquellas de origen residencial y comercial que contienen desechos fisiológicos.
- **Aguas residuales municipales:** Son aquellas aguas residuales domésticas que pueden estar mezcladas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales industriales tratadas.

### C. Características físicas del agua residual.

Las aguas residuales se componen, de 99.9% de agua potable y de 0.1% por peso de sólidos, sean éstos disueltos o suspendidos.

**Tabla 1**

*Constituyentes típicas de las aguas residuales.*

Agua potable	Sólidos	Gases disueltos	Componentes biológicos
99.9%	0.1% (en peso)	O <sub>2</sub>	Bacterias
	Suspendidos	CO <sub>2</sub>	Micro y Macro organismos
	Disueltos	H <sub>2</sub> S	Virus
	Coloidales	N <sub>2</sub>	
	Sedimentables		

- **Temperatura:** En el agua residual es mayor que en el agua para abastecimiento. Su medición es de suma importancia debido a que los procesos biológicos dependen de ella. Es un parámetro muy importante ya que afecta directamente las reacciones químicas y las velocidades de reacción, la vida acuática y la adecuación del agua para fines benéficos.

### D. Características químicas del agua residual.

Dentro del agua residual existe una cantidad considerable de elementos químicos inorgánicos; estos son nutrientes, constituyentes no metálicos y

metales. Las pruebas como pH, alcalinidad, cloruros y sulfatos son realizadas para estimar la capacidad de reutilización de las aguas residuales tratadas y como pruebas para el control de distintos procesos de tratamiento

- **pH:** Es la expresión para medir la concentración del ion hidrógeno en una solución. Este se define como el logaritmo negativo de la concentración de ion hidrógeno.

#### **E. Compuestos orgánicos agregados del agua residual.**

La materia orgánica en aguas residuales se constituye básicamente de proteínas (40 a 60 %), carbohidratos (25 a 50 %) y grasas y aceites (8 a 12 %), así como pequeñas cantidades de moléculas orgánicas sintéticas. La diferencia que existe entre un agua residual tratada y otra no tratada, es la cantidad de compuestos orgánicos presentes en las muestras. Este parámetro es de mucha ayuda cuando se trata de analizar el desempeño de los procesos de tratamiento y estudiar su comportamiento en las fuentes receptoras.

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO<sub>5</sub>):** Es la cantidad de oxígeno que utilizan los microorganismos para llevar a cabo la reducción de la materia orgánica.
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Es la parte de los materiales orgánicos que no se pueden degradar biológicamente porque resultan ser tóxicos a los microorganismos o porque su son tan lenta que son considerados como no biodegradables.
- **Relaciones entre DBO y DQO:** Dependiendo de la relación existente se puede hacer un análisis del tipo de tratamiento que se ha llevado a cabo en el agua residual.

#### **F. Energía eléctrica.**

##### **Teoría electrónica.**

Cualquier átomo está constituido por un núcleo subdividido, a su vez, en protones y neutrones; en torno a dicho núcleo giran los electrones. El protón tiene carga positiva y el electrón carga negativa. En un átomo eléctricamente neutro, el número de protones es igual al número de electrones, Si un átomo

pierde electrones queda electrizado positivamente; si, por el contrario, los adquiere, queda electrizado negativamente. De todos es conocido el fenómeno de electrización de los cuerpos por frotamiento. El electrón es la parte más importante del átomo, ya que de su facilidad para moverse a lo largo de los cuerpos va a depender que éstos sean conductores o aislantes. Por tanto, podemos decir que la unidad elemental de carga eléctrica es el electrón (24).

#### **G. Teoría de las vías metabólicas del flujo de electrones.**

Muchas rutas metabólicas pueden distinguirse basándonos en el potencial del ánodo, desde los metabolismos redox altamente oxidativos, los medianamente oxidativos y los poco oxidativos, incluso las fermentaciones. Las razones por las cuales los microorganismos emplean la transferencia de electrones extracelular son:

#### **H. Transferencia con ayuda de mediadores externos o producidos por el mismo organismo:**

El compuesto que actúa como mediador tiene la capacidad de entrar en la célula, aceptar los electrones, desde la célula en estado reducido y los dona a los electrodos:

- **Mediadores externos:** Son especies redox de bajo peso molecular que sirven para transportar los electrones hacia los electrodos. El mediador debía ser soluble, químicamente estable en su estado reducido y oxidado en la solución electrolítica, en estado de oxidación debía poder penetrar la membrana de las bacterias para alcanzar las especies reducidas en su interior, Una gran variedad de químicos ha sido utilizados resultando tóxicos para las bacterias (15)
- **Mediadores secretados por bacterias:** Se demostró que no era necesario el uso de mediadores externos debido a que los mismos microorganismos, podrían producir mediadores endógenos como excelentes transportadores de electrones.
- **Transferencia directa con la participación de citocromos:** Algunas bacterias cuentan con mecanismos de transporte de electrones interno, utilizan citocromo Tipo-C, como transporte hacia el electrodo. Los

citocromos de Tipo-C son proteínas redox que contiene uno o más grupos hemo, cuya función es el transporte de electrones en la cadena respiratoria de diversos organismos; gracias a ellos es que pueden transferir electrones desde su membrana interna hacia la superficie externa celular; es aquí donde entran los pilis o “nanocables” (15).

#### **J. Definición de energía eléctrica.**

Es el movimiento de electrones a través de los átomos de un material conductor. Los electrones circulan desde un polo negativo de un generador hasta el polo positivo. Un conductor es cualquier material cuyo último nivel de la configuración electrónica de sus átomos contiene pocos electrones, por lo que es sencillo el movimiento de estos. Por otra parte, un material aislante es aquel cuyo último nivel de la configuración electrónica se encuentra completo, por lo tanto, sus electrones no se mueven (18).

Para formar un circuito eléctrico se tienen que cumplir dos condiciones fundamentales: se debe contar con un dispositivo que cree una diferencia de cargas, mediante la amplificación de la energía potencial y un circuito por donde se realice el paso de electrones (18).

**K. Intensidad de corriente eléctrica:** Se emplea para medir el caudal del movimiento de electrones en un conductor, la cual se define como la cantidad de electricidad que recorre un circuito en una unidad de tiempo expresándose en amperios por segundo. Para medir la intensidad de corriente se emplea el amperímetro (18).

Existen dos clases de corriente eléctrica clasificadas de acuerdo al sentido en que se mueven los electrones:

- **La corriente alterna:** tiene un flujo de electrones que se mueve en un sentido y en otro y cuyo valor de corriente es variable, es producida por los alternadores en las centrales eléctricas (18).
- **La corriente continua:** se caracteriza porque los electrones siempre se mueven en el mismo sentido y con una intensidad constante, es producida por los dínamos, las baterías de acumuladores, pilas, celdas fotovoltaicas y por ende por celdas de combustible químicas y microbianas (18).

#### **L. Generación eléctrica en celdas de combustible microbiano.**

El desempeño de una MFC se puede evaluar mediante diversos factores, como diferencia de potencial, densidad de corriente (DC), potencia (P), y corriente (CE) (15).

- **La carga eléctrica:** Es la propiedad eléctrica de las partículas atómicas, medida en Coulombs (15).
- **La potencial:** Es capacidad de la carga para realizar un trabajo.
- **El voltaje:** Es la diferencia de potencias en una celda convencional que tiene dos cargas distintas. La unidad básica es el volumen (15).
- **La corriente:** Es el agrupamiento de electrones, producto de la aplicación de la diferencia de potencial, desde el punto de carga negativa, hacia el punto de carga positiva, a través de un elemento conductor, siendo su unidad básica el ampere (A) (15).

En un elemento conductor, los electrones libres son cargas que podemos poner en movimiento (15).

El movimiento unidireccional es provocado por las fuentes de voltaje, ya sea celdas o baterías, que mantienen la misma polaridad en su voltaje de salida (15).

El circuito eléctrico para ser considerado como tal, debe estar formado por un dispositivo que cree una diferencia de cargas; que en este caso sería las celdas de combustible microbianas; y un circuito por el cual se realiza el paso de electrones; como un cable de cobre (15).

## **M. Celdas de Combustible Microbiano (MFC).**

### **1. Origen de las Celdas de Combustible Microbiano.**

El primer reporte de una celda de combustible microbiana, fue en 1912 con el Profesor M.C. Potter, de la Universidad de Durham en el Reino Unido, quien logró producir electricidad de una bacteria *E.coli*; sin mucha notoriedad (15), sin embargo retomaron importancia en los años 60 cuando la NASA se interesó en transformar desechos orgánicos en electricidad para su uso en viajes espaciales de larga duración (2). Recientemente, se han llevado a cabo estudios que han demostrado la posibilidad de producir

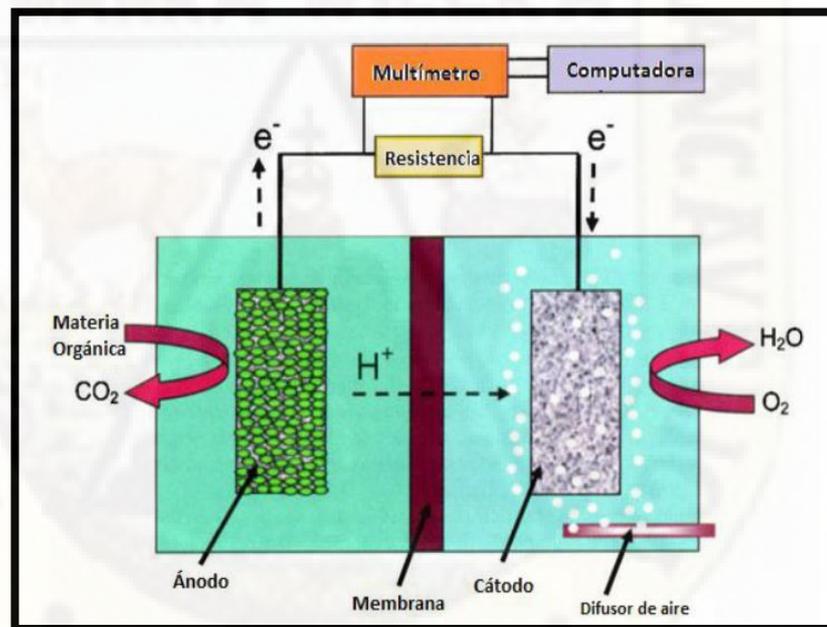
energía eléctrica a la vez que se logra el tratamiento de aguas residuales (2).

## 2. Definición de las Celdas de Combustible Microbiano.

Una MFC se describe como un sistema el cual genera energía eléctrica a partir de la energía química de un compuesto (generalmente orgánico), mediante la acción bacteriana. Una MFC está conformada por: cámara anódica; cámara catódica; electrodos, medio de intercambio protónico, inóculo bacteriano, aceptor de electrones y sustrato (15).

**Figura 1**

*Esquema de los componentes básicos de una MFC*



En el compartimiento anaeróbico, el combustible es oxidado por los microorganismos, generando electrones y protones; los electrones son transferidos a la cámara catódica a través de un circuito eléctrico externo (resistencia) que conecta el ánodo y el cátodo; mientras que los protones son transferidos a través de la membrana de intercambio de protones al compartimiento catódico que se encuentra en condiciones aeróbicas, en esta cámara se combinan los protones, los electrones y el oxígeno con el fin de generar agua; sin embargo, en la cámara anódica no hay oxígeno, por lo que

la bacteria se ven obligada a cambiar su aceptor natural de electrones a un aceptor insoluble; tal como un ánodo de MFC. Gracias a la habilidad de la bacteria de transferir electrones hacia un aceptor insoluble de electrones, es que se puede recolectar los electrones del metabolismo microbológico (9) (15).

La transferencia de electrones sobre el electrodo es directa, no necesita de un agente oxidante gracias a los Pili, que se adhieren a los electrodos y permiten que los electrones se transfieran desde la materia orgánica hasta el ánodo directamente (9).

### 3. Componentes de una MFC.

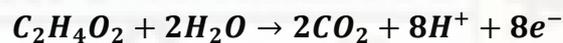
- **Membrana de intercambio de protones (PEM):** La membrana actúa como un separador y electrolito sólido, cuya función ideal es la de separar la reacción de la cámara anódica y catódica, en el sistema electroquímico mientras permite el transporte selectivo de protones del ánodo al cátodo, previniendo la difusión de oxígeno hacia la cámara anódica (15).
- **Nafion 117 de 0.019 cm de grosor:** Es la membrana más utilizada por el momento sigue siendo, Su estructura base está diseñada para incluir una amplia cantidad de regiones hidratadas. Nafion es una membrana polimérica, en el cual se reemplaza el hidrógeno con flúor, formando una estructura conocida como politetrafluoroetileno (PTFE); de esta manera Nafion se transforma en una estructura químicamente resistente, estable y duradera. El electrolito se logra añadiendo bisulfito ( $\text{HSO}_3^-$ ). Al hidratarse la membrana, los protones son débilmente atraídos a las regiones  $\text{SO}_3^-$  con alta negatividad electrónica, lo que permite que sean transportados con facilidad; así mismo al resultar la membrana como un conductor de protones altamente efectivo, logra actuar como un aislante de electrones (15).
- **Electrodos:** El electrodo debe ser de un material que cumpla con las siguientes características: ha de ser un material conductor, bio-compatible y químicamente estable en la solución del reactor. El material más utilizado en las investigaciones son los electrodos de carbón en diversas

formas como: barras de grafito, fieltro de grafito, tela de carbón, papel carbón, grafito revestido (15).

- **Ánodo:** Las características de la superficie del ánodo y su afinidad hacia las bacterias, son factores decisivos en la adhesión bacteriana al ánodo y en las conexiones eléctricas (15).

En el caso del grafito proporciona una superficie áspera, no sólo para las que células individuales se enlacen directamente al ánodo, sino que también permite a estas bacterias anclarse firmemente a la superficie por medio de Pili (9).

La reacción en el ánodo, donde la bacteria interactúa con la materia orgánica “acetato” oxidándola completamente, es de acuerdo con la siguiente ecuación (9).



- **Cátodo:** El cátodo es del mismo material del ánodo y suele revestirse con metales preciosos tales como platino, cobalto y hierro; cuya función es aumentar la velocidad de reducción del oxígeno. En la cámara catódica se da la captura de electrones, por lo que se necesita un aceptor de electrones en el medio. El oxígeno, es el aceptor más recomendado, debido a su accesibilidad, bajo costo en caso de escalamiento y no toxicidad. El medio en el cual se esparce el aceptor es agua destilada (15).

La reacción del oxígeno puro con los protones y electrones, para formar agua, es de acuerdo con la siguiente ecuación (9).



#### 4. Diseño de las Celdas de Combustible Microbiano.

Existen diversos diseños de MFCs, la arquitectura de cada uno de ellos se desarrolla en relación a los objetivos de la investigación (15).

- **Celda de dos Cámaras (Tipo H):** Este es el diseño más simple y conocido de la MFC, consiste en dos cámaras unidas por un medio de intercambio (membranas de intercambio), cátodo suspendido en agua el cual es rociado con aire de manera continua. Este sistema es el más utilizado por los investigadores que enfocan sus investigaciones únicamente en la

producción energética, y presenta varios desafíos como el consumo energético producto de la implementación de bombas de aireación. En siguiente ilustración se muestran varios tipos de MFC del tipo H. (A) Sistema con dos cámaras ambas con conexión para esparcimiento de gases, el ánodo con nitrógeno para mantener las condiciones anaeróbicas, y el cátodo con aire. (B) El tamaño de PEM puede ser incrementado con el fin de aumentar la producción energética. Desventajas, en el precio y difusión de oxígeno. (C) Reactores modificados para mantener las condiciones anaeróbicas en ambas cámaras. (D) Diseño simple de una botella crimpltop con un puerto simple de muestreo en la cámara anódica (15).

**Figura 2**

*Diversas configuraciones de MFC de dos cámaras.*



### **5. Fuentes de microorganismos electrogénicos.**

El factor más importante para que una MFC genere una corriente de electrones, es sin duda alguna, los microorganismos utilizados para llevar a

cabo el proceso de degradación de la materia orgánica a compuestos como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y la liberación de electrones al sistema, los inóculos bacterianos pueden ser:

- **Inóculos de cultivos puros:** La bacteria *Geobacter metallireducens* es la más conocida y la más estudiada, de todas las bacterias electrogénicas descubiertas, tienen la capacidad de transferir electrones insolubles tales como Fe (III), es difícil y costoso aislar las bacterias (15).
- **Inóculos de consorcios bacterianos:** Los cultivos mixtos utilizados como inóculo pueden llegar a generar mayor energía en comparación al empleo de ciertos cultivos puros, esto se debe a las interacciones sinérgicas que se presentan en el ánodo.

El inóculo bacteriano es obtenido de lodos activos, lodos anaeróbicos, aguas residuales domésticas, aguas residuales industriales, sedimentos marinos o sedimentos acuáticos. Aunque los mejores resultados se han obtenido empleando lodos de plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) (15).

#### **6. Lodos activos de PTAP como fuente microbiana.**

Los lodos producidos durante el tratamiento de agua contienen contaminantes orgánicos e inorgánicos como: microorganismos, arcilla y arena, y son recolectados en la etapa de floculación y sedimentación. Los microorganismos que conforman los lodos son bacterias metanogénicas, fermentativas y sulfa-reductores. Entre ellas destaca la presencia de bacteria del género *Geobacter*, *Methanobacteriaceae*, *Shewanella*, *Pseudomonas aeruginosa*, las cuales tendrían cierta actividad electrogénica. Debido a la presencia de bacterias patógenas, así como el elevado número de metanogénicas presentes, se recomienda tratar los lodos activados e inhibir patógenos y metanogénicas (15).

#### **7. Bacterias Generadoras de Energía Eléctrica.**

El término “bacteria” es asociado a infecciones, enfermedades y descomposición. Sin embargo, hay microorganismos como la especie *Geobacter* que se ha empleado como aliado en la investigación (9).

La bacteria del género *Geobacter* tiene la capacidad de transferir electrones a moléculas como el Fe (III) y Mn (IV). Además, permite la transferencia de electrones de forma directa a los electrodos, generando pequeñas corrientes eléctricas. Esta capacidad permite obtener electricidad a partir de materia orgánica (9).

**Figura 3**

*Bacteria del Genero Geobacter.*



- **Origen y Evolución:** El *Geobacter* fue descubierto en 1987 en el sedimento de agua dulce del río Potomac en Washington D.C, por el Dr. Derek Lovley y un equipo de investigadores de la Universidad de Massachusetts Amherst. Desde el hallazgo hasta nuestros días, Derek Lovley y sus colegas han encontrado más de 20 especies de la familia *Geobacter*, precisando nuevas habilidades (9).
- **Descripción General:** El género de bacterias “*Geobacter*” se encuentra clasificado en el grupo *Delta proteobacteria* de la familia *Geobacteraceae*, son *Gram-negativas*, se caracteriza en general por poseer una forma recta o ligeramente curvada, su tamaño puede variar de 1.2-2.0  $\mu\text{m}$  de longitud por 0.5-0.6  $\mu\text{m}$  de diámetro, además se caracteriza en general por poseer

dos tipos de apéndices celulares, Flagelos y Pili. La presencia del flagelo es imprescindible para desplazarse de una partícula sólida a otra, una vez se agota el oxígeno respirable. Los Pili son estructuras eléctricamente conductoras, cuya función es transferir electrones desde la superficie externa del *Geobacter* hasta aquellos materiales que se logran reducir (9).

- **Hábitat:** El *Geobacter* se puede encontrar en sedimentos de agua dulce, sedimentos marinos anóxicos, sedimentos de sal de pantano, ambientes subterráneos, y acuíferos. Estos ambientes se caracterizan principalmente por ser ricos en nitratos y sulfatos, pero al mismo tiempo deben ser espacios libres de oxígeno puro (9).
- **Metabolismo:** El metabolismo celular de la especie *Geobacter* es quimioorganótrofo anaerobio, es decir, utilizan compuestos orgánicos como fuente de energía y de carbono para su crecimiento y desarrollo. El *Geobacter* posee una red de Citocromos tipo C multihemo, una proteína que funciona como mecanismo de transporte electrónico y vincula entre sí la membrana interna, el Periplasma y la membrana externa, con el fin de transferir los electrones desde una sustancia que es oxidada a otra que se reduce o acepta electrones. Para obtener los electrones el *Geobacter* utiliza la respiración e internamente aplica el ciclo Krebs, una sucesión de reacciones químicas que oxidan completamente la materia orgánica hasta producir dióxido de carbono, agua, energía en forma utilizable (electrones) y ATP. Además, la red de Citocromos Tipo C actúa como un capacitor almacenando energía para mantener la célula activa en su búsqueda de nuevos aceptores de electrones (9).
- **Crecimiento y Reproducción:** El crecimiento y reproducción del Género *Geobacter* ocurre a medida que los nutrientes son procesados e incorporados como nuevo material de célula. El proceso reproductivo de esta bacteria es fisión binaria, donde las células individuales se duplican a una tasa característica. El tiempo que requiere una célula de *Geobacter* en duplicarse es aproximadamente  $19 \pm 3.6$  h en laboratorio. El crecimiento de esta población se compone de una serie de fases. El crecimiento óptimo

de esta especie se produce cuando el pH se encuentra en el rango de 6.2 - 7.4 y la temperatura en el rango de 22 - 30°C (9).

### 2.3. Definición de términos

**Biofilm o biopelícula.-** Organizaciones microbianas compuestas por microorganismos que se adhieren a diferentes superficies gracias a la secreción de un ex polímero (Bermudez & Bernal, 2018).

**Cantidad de electricidad.-** Número total de electrones que recorren un conductor (Flores, 2013).

**Caudal.-** Cantidad de agua residual que pasa por una sección determinada en una unidad de tiempo (MVCS, 2013).

**Citocromo C.-** Proteína pequeña, que funciona como transportador electrónico mitocondrial entre los complejos respiratorios III y IV (González, 2015).

**Corriente eléctrica.-** Desplazamiento de electrones a lo largo de un cuerpo conductor (Flores, 2013).

**Densidad de potencia. -** Cantidad de energía generada por unidad de área del electrodo. La potencia de salida suele ser normalizada con respecto a la superficie del ánodo, debido a que es el lugar en donde se produce la reacción (Franco & Ricaurte, 2018).

**DQO (Demanda Química de Oxígeno).-** Cantidad de oxidante que reacciona con la muestra bajo condiciones controladas, la cantidad de oxidante consumido es expresado en términos de su equivalente en oxígeno (MVCS, 2013).

**Efluente.-** Agua residual que sale de un proceso de tratamiento (MVCS, 2013).

**Energía eléctrica.-** Trabajo desarrollado en un circuito eléctrico en un determinado tiempo, es igual al producto de la potencia eléctrica por tiempo (Flores, 2013).

**Flujo continuo. -** Circulación del agua de un recipiente a otro.

**Flujo estable o de biopila. -** Permanencia del agua en un recipiente.

**Potencia eléctrica.-** Cantidad de trabajo desarrollada en la unidad de tiempo, en un circuito eléctrico es igual al producto de la tensión por la intensidad, su unidad es el vatio (W) (Flores, 2013).

**Protocolo.-** Documento guía que contiene pautas, instrucciones y procedimientos establecidos para desarrollar una actividad específica (MVCS, 2013)

**Puente de intercambio de protones.-** Dispositivo que conecta las dos celdas, es un medio iónico con una barrera semipermeable en cada uno de sus extremos; por medio de estas barreras pueden pasar pequeñas moléculas e iones (Bermudez & Bernal, 2018).

**Resistencia eléctrica.-** Dificultad que presenta un material al paso de la corriente eléctrica, se representa con la letra R y su unidad es el ohmio ( $\Omega$ ) (Flores, 2013).

## **2.4. Hipótesis**

### **2.4.3. Hipótesis general**

La eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

#### **2.4.4. Hipótesis específicas**

Existe diferencia en el amperaje ( $\mu\text{A}$ ) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

Existe diferencia en la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S/cm}$ ) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

### **2.5. Variables**

#### **2.5.3. Variable dependiente**

- Potencial de generación de energía eléctrica.
  - Amperaje
  - Conductividad eléctrica

#### **2.5.4. Variables independientes**

Celdas de Combustible Microbiano (MFC).

Celda N°01: 20% de inóculo bacteriano y 80% de sustrato.

Celda N°02: 50% de inóculo bacteriano y 50% de sustrato.

Celda N°03: 80% de inóculo bacteriano y 20% de sustrato.

### **2.6. Operacionalización de variables**

**Tabla 2**

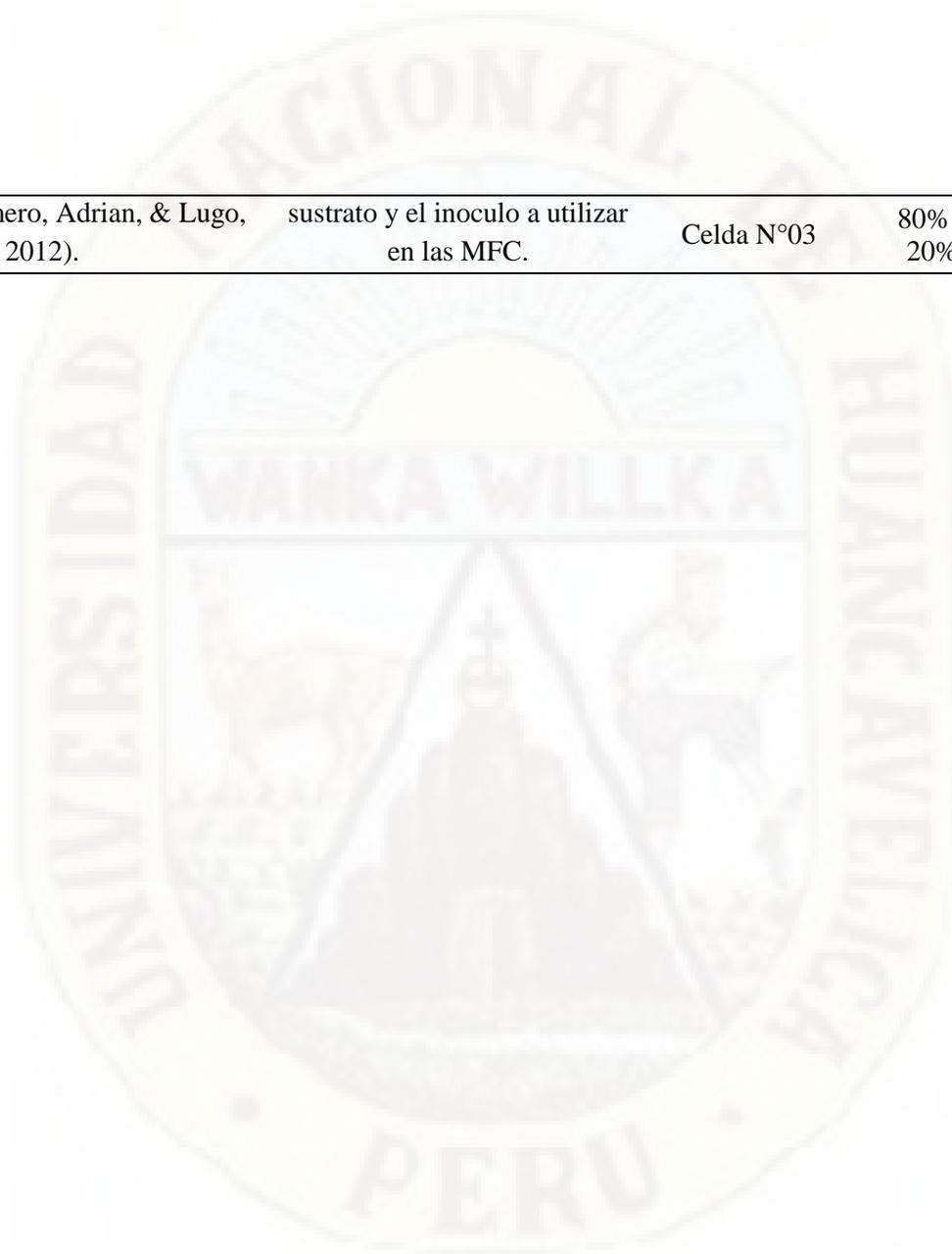
Operacionalización de variables estudiadas.

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicador	Unid.	Instrumento
<b>Variable Dependiente (efectos o respuesta o medición):</b>						
Tratamiento de aguas residuales domesticas	Porcentual de indicadores apropiados, considerados en forma acumulativa o de determinadas sustancias. <b>Fuente:</b> (Galvez, 2013).	Se establece para el indicador específico, una relación entre la carga que fluye en el sistema y la correspondiente carga en el flujo de salida. Se calcula:	Tratamiento del agua residual.	Remoción DQO.	%	Colorímetro
Amperaje				Voltaje	$\mu A$	Multímetro
Conductividad eléctrica	Es la acción que producen los electrones al trasladarse de un punto a otro, falta o exceso de electrones en un material. <b>Fuente:</b> (Bosques & Suacedo, 2005).	La medida de diferencias de potencial o voltaje se efectúa con un multímetro.	Parámetros de potencial de generación de energía eléctrica.	Voltaje	$mV$	Multímetro
<b>Variable Independiente (causa o pregunta o manipulación):</b>						
Celdas de Combustible Microbiano (MFC) tipo H.	Es un reactor bioelectroquímico capaz de convertir la energía química en energía eléctrica	Las mediciones del volumen del material que contiene el	Celda N°01 Celda N°02	20% inoculo y 80% sustrato 50% inoculo y 50% sustrato	$m^3$ $m^3$	Probeta Probeta

---

<b>Fuente:</b> (Romero, Adrian, & Lugo, 2012).	sustrato y el inculo a utilizar en las MFC.	Celda N°03	80% inculo y 20% sustrato	m <sup>3</sup>	Probeta
--	---	------------	---------------------------	----------------	---------

---



## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. Ámbito temporal y espacial

##### 3.1.1. Ámbito temporal

La toma de datos y el procesamiento del trabajo de investigación comprende los meses de octubre del 2019 al mes de marzo del 2020.

**Tabla 3**

*Cronograma de monitoreo y análisis de laboratorio*

Actividades	Año 2018-2019																							
	Meses																							
	Octubre				Noviembre				Diciembre				Enero				Febrero				Marzo			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Ejecución del proyecto	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
a) Visita de campo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
b) Toma de muestras	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
c) Análisis de laboratorio	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
d) Sistematización de datos				X				X				X				X				X				X

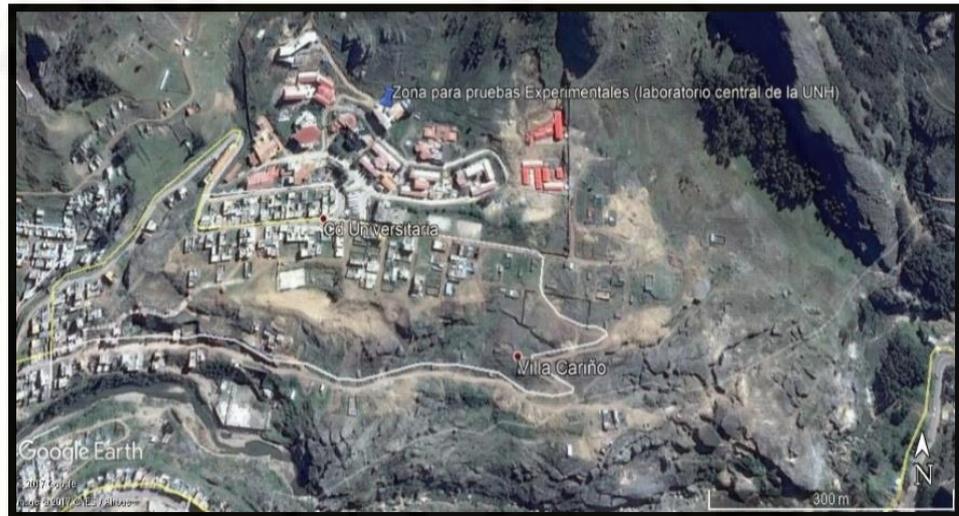
##### 3.1.2. Ámbito espacial

**Trabajo de laboratorio:** El proyecto de tesis se ejecutará en el laboratorio de Biología y Microbiología de la Universidad Nacional de Huancavelica, donde se determinarán los diferentes parámetros de análisis.

**Provincia:** Huancavelica, **Distrito:** Huancavelica, **Lugar:** Paturpampa.

#### **Figura 4**

*Ubicación geográfica de la zona para pruebas experimentales.*



Fuente: Google Earth Pro

**Trabajo de campo:** La muestra de agua residual municipal fueron obtenidas del puente colgante del sector denominado as tres boas.

### **3.2. Tipo de investigación**

Aplicativo: por el tipo de investigación, el presente utilizo la naturaleza metodológica de una investigación aplicada, en razón que se utilizaran conocimientos de las ciencias a fin de aplicarlas (Sampieri, 2010).

La investigación aplicada le interesa por solucionar dificultades prácticas con diligencia de los conocimientos teóricos asimismo busca conocer el estado actual para poder actuar, modificar, etc. (Sampieri, 2010)

### **3.3. Nivel de investigación**

Explicativo: se realizó la experimentación en las unidades experimentales, en un área y tiempo determinado en el cual se manipula la variable independiente

y se mide el efecto de esta variable dependiente, de acuerdo a la naturaleza del estudio de la investigación, reúne por su nivel las características de un estudio experimental. (Sampieri, 2010)

Es una investigación que se manipula cuidadosamente las variables, para determinar sus influencias. Responde a las preguntas ¿Cómo? y ¿Por qué? Es decir, se realiza la investigación sobre la base de la causa y efecto, con la finalidad de determinar su influencia. Como su nombre lo indica, su interés se centra en explicar el por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se a este, o porque se relacionan dos o más variables. (Sampieri, 2010)

### **3.3.1 Método de investigación**

El método científico es un proceso sistemático para construir la ciencia y desarrollar el conocimiento científico que incluye dos actividades básicas: el razonamiento lógico (racionalismo) para deducir consecuencias contrastables de una teoría en la realidad, y la observación de los hechos empíricos (el empirismo) para corroborar o modificar lo predicho por la teoría. En este proceso el investigador necesita ir de los datos a la teoría y de la teoría a los datos. A veces se inicia con la observación de una situación problemática a partir de la cual se infieren posibles explicaciones y leyes que hay que confirmar en la realidad. Con este fin se deducen una serie de respuesta al problema planteado, formuladas en términos de hipótesis operativas y contrastables. La inferencia inductiva resultante a la verificación de estas consecuencias formará parte del área de influencia de las explicaciones y teorías iniciales y permitirá aportar nuevos datos que ampliarán y complementarán sus estructuras y conceptos (Bisquerra, 2009).

### **3.3.2. Diseño de la investigación**

La investigación se encuentra enmarcada dentro del diseño experimentos “Puros” con pre prueba y post prueba para ello se

utilizó como diseño de investigación experimental DCA la fórmula matemática:

$$y_{ij} = \mu + M_i + E_{IJ}$$

Donde:

$y_{ij}$  = Tratamiento de intensidad de voltaje, potencia

$\mu$  = Media

$M_i$  = Medio (inoculo + sustrato) i: 1, 2 Y 3

$E_{IJ}$  = Error experimental de 0.05 %

### **3.4. Población, muestra y muestreo**

#### **3.4.1. Población**

La población de la investigación es el caudal de aguas residuales de las aguas residuales de la boca toma de santa Ana que es igual a 250 L/día

#### **3.4.2. Muestra**

Para la colección de caudal de 04 litro por periodo de muestreo, se tomó una muestra pequeña debido a que los ensayos son a escala de laboratorio.

#### **3.4.3. Muestreo**

La técnica aplicada es no probabilística con tipo de muestreo por conveniencia. Se utilizará la guía de protocolo de monitoreo de calidad de agua de la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

### **3.5. Técnicas e instrumentos para recolección de datos**

#### **3.5.1. Técnicas de recolección de datos**

Para la recolección de datos se tendrá en cuenta. El programa de monitoreo, de la colección de las muestras y los equipos se realizó un procedimiento para la toma de muestras.

A. Definición del programa de monitoreo

Las pruebas físico-químicas de pH y temperatura se realizarán 2 veces a la semana ya que estos parámetros son reguladores enzimáticos en el tratamiento físico – químicos y biológicos.

El amperaje ( $\mu\text{A}$ ), se realizó 3 veces por día por medio del multímetro PRASEK PREMIUN PR-75C por un tiempo de un mes. La conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), se realizó 3 veces por día por medio del multímetro PRASEK PREMIUN PR-75C por un tiempo de un mes.

**3.5.2. Instrumentos de recolección de datos**

Instrumentos:

**Multímetro PRASEK PREMIUM PR-75C:** para la lectura del amperaje y conductividad eléctrica

**Multiparámetro Hach HQ40D:** Para determinar el pH.

**Termómetro ambiental:** Para determinar la temperatura del ambiente.

**3.5.3. Instrumentos de recolección de datos en campo**

**a. Proceso de construcción de la celda de combustible microbiana (MFC)**

Se construyeron celdas tipo H de capacidad de 500 ml cuadrado tipo rosca (7cm x 7cm x 10cm).

## Figura 5

### *Construcción de la celda de MFC*



#### **b. Construcción de las celdas de combustible microbiano**

Para realizar la construcción de las celdas de combustible microbiano consta de las siguientes partes:

- Tapón de hule de 1” – para ingreso de las muestras
- Alambre de platino – para la captación de electrodos
- Electrodo de carbón de platino – cámara anódica, cámara catódica
- Puente de intercambio entre las dos cámaras
- Membrana de nafion 117 para realizar el intercambio de la cámara catódica
- Circuito eléctrico - mas 2 cocodrilos
- Bomba de aire de pecera

**Figura 6**

*Lavado de las celdas de MFC*



**c. Esterilización de las celdas**

Los envases de plástico se lavaron y se esterilizaron a 65° C de temperatura por 2 horas

**Figura 7**

*Esterilización de las celdas de combustible microbiano (MFC)*



#### **d. Toma de muestra del agua residual**

El agua residual municipal se obtuvo del puente colgante del sector de las tres boas -Huancavelica, ubicado al lado derecho del río Ichu, kilómetro 2.5 de la carretera Huancavelica – Huancayo, coordenada Este: 514045.55 m E y coordenada Norte: 8482055.01 m S

#### **Figura 8**

*Toma de muestra de sustrato*



#### **e. Cámara anódica**

Se trabaja de manera anaerobia y se realiza la oxidación de los electrones y el respectivo transporte:

Está compuesto de:

- Tapón de hule de 1” – para ingreso de las muestras
- Alambre de platino – para la captación de electrodos
- Electrodo de carbón de platino – cámara anódica, cámara catódica

**Figura 9**

*Construcción de la cama anódica*



**f. Cámara Catódica**

- Tapón de hule de 1” – para ingreso de las muestras
- Alambre de platino – para la captación de electrodos
- Electrodo de carbón de platino – cámara anódica, cámara catódica
- Circuito eléctrico - mas 2 cocodrilos
- Bomba de aire de pecera

**Figura 10**

*Construcción de la cámara catódica*



### **g. Ubicación del Inoculo microbiano**

El inoculo microbiano (lodo negro), se colecto en el rio Ichu en los cúmulos de tierra y materia orgánica puente santo rosa, dicha muestra se colecto en la última semana de diciembre

### **h. Ubicación del sustrato**

La muestra de agua residual se colecto del puente colgante del lugar denominado las tres boas, aguas abajo donde se colecto dicha muestra en la última semana de diciembre.

### **i. Puente de intercambio de protones**

- Puente de intercambio entre las dos cámaras
- Membrana de nafion 117 para realizar el intercambio de la cámara catódica, espesor de 183 micrómetros.

### **Figura 11**

*Limpieza de puente de intercambio de protones*



#### **j. El circuito eléctrico**

- Circuito eléctrico - mas 2 cocodrilos

#### **Figura 12**

*Ubicación del circuito eléctrico*



#### **k. Análisis de la Amperaje ( $\mu\text{A}$ )**

Para realizar los monitoreos se utilizó el Multímetro PRASEK PREMIUM PR-75C: donde se obtuvo la lectura del amperaje en unidades de micro amperios ( $\mu\text{A}$ )

El tiempo de monitoreo se realizó 15 días de prueba y 1 mes de monitoreo todos los días.

La frecuencia de los monitoreos es 3 veces al día en las mañanas a las 9:00 a.m. medio día 12:00 p.m. y en las noches a las 9:00 p.m.

**Figura 13**

*Monitoreo del amperaje con el multímetro*



**1. Análisis de la Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )**

Para realizar los monitoreos se utilizó el Multímetro PRASEK PREMIUM PR-75C: donde se obtuvo la lectura de la conductividad eléctrica en unidades de conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

El tiempo de monitoreo se realizó 15 días de prueba y 1 mes de monitoreo todos los días. La frecuencia de los monitoreos es 3 veces al día en las mañanas a las 9:00 a.m. medio día 12:00 p.m. y en las noches a las 9:00 p.m.

**Figura 14**

*Monitoreo de la conductividad eléctrica con el multímetro*



### **m. Concentración de las celdas de combustible microbiano**

#### **Celda de combustible microbiano 1**

- 20 % Inoculo bacteriano (lodo negro)
- 80 % sustrato (Puente colgante de las tres boas)

#### **Celda de combustible microbiano 2**

- 50 % Inoculo bacteriano (lodo negro)
- 50 % sustrato (Puente colgante de las tres boas)

#### **Celda de combustible microbiano 1**

- 80 % Inoculo bacteriano (lodo negro)
- 20 % sustrato (Puente colgante de las tres boas)

## **3.6. Técnicas y procesamiento de análisis de datos**

### **3.6.1. Técnica**

La técnica utilizada es la estadística descriptiva de los datos, se empleó la estadística descriptiva de los parámetros intensidad de voltaje, potencia y densidad de potencia, desarrollando tablas de contingencia y gráficos de barras para explicar los datos obtenidos medidas de tendencia central, dispersión y asimetría.

### **3.6.2. Procesamiento**

Para el procesamiento y análisis de datos se utilizó el paquete estadístico SAS versión 9.4 donde se realizará la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro wilk. El estadígrafo de la Prueba análisis de varianza ANOVA y una prueba de medias cuyo objeto es determinar la existencia de la hipótesis nula o la hipótesis de investigación, con una confiabilidad de 95% y el programa Microsoft Office Excel 2017.

## CAPÍTULO IV

### PRESENTACION DE RESULTADOS

#### 4.1. Análisis de la información

##### 4.1.1. Análisis del amperaje ( $\mu\text{A}$ ) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

En la Tabla 4 se observa los monitoreos del amperaje en las tres celdas de combustible microbiano: el mayor valor se obtuvo para la celda de combustible microbiano 2 (50% - 50%) 46.45 ( $\mu\text{A}$ ) y la celda de combustible microbiano 1 y 3 presentan valores de amperaje iguales de 27.75 y 23.50 ( $\mu\text{A}$ ) respectivamente.

**Tabla 4**  
*Valores medios de amperaje*

Factor	Amperaje					
	Celda 1		Celda 2		Celda 3	
	Media	SD	Media	SD	Media	SD
Hora						
9:00 am	26.75 <sup>b</sup>	7.97	44.67 <sup>a</sup>	16.66	25.53 <sup>b</sup>	8.84
12:00 pm	28.57 <sup>b</sup>	9.13	48.50 <sup>a</sup>	17.44	24.07 <sup>b</sup>	8.57
9:00 pm	27.92 <sup>b</sup>	7.58	46.17 <sup>a</sup>	17.10	23.50 <sup>b</sup>	8.03
Media	27.75 <sup>b</sup>	8.19	46.45 <sup>a</sup>	16.94	24.36 <sup>b</sup>	8.43

**4.1.2. Análisis de la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.**

En la Tabla 5 se observa los monitoreos de la conductividad eléctrica en las tres celdas de combustible microbiano: el mayor valor se obtuvo para la celda de combustible microbiano 3 (80% - 20%) 735.58 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y la celda de combustible microbiano 2 presentan valores de conductividad eléctrica se obtuvo un valor de 665.99 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y por último la celda de combustible microbiano 3 presenta un valor de 640.68 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) se observa que existen valores de las celdas de combustible microbiano que difieren entre sí ( $P > 0,05$ ).

**Tabla 5**  
*valores medios de conductividad eléctrica*

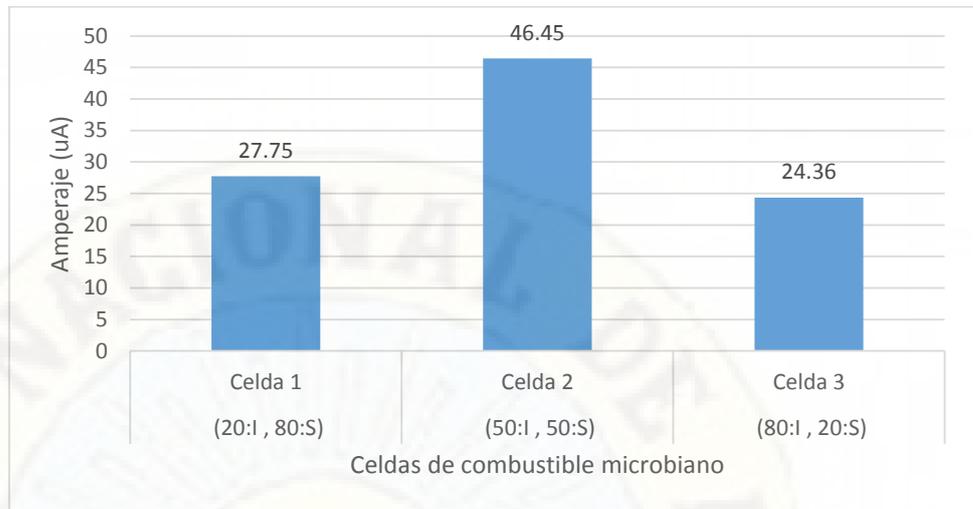
Factor	Conductividad eléctrica					
	Celda 1		Celda 2		Celda 3	
	Media	SD	Media	SD	Media	SD
Hora						
9:00 am	642.54 <sup>b</sup>	2.94	670.02 <sup>b</sup>	9.62	736.08 <sup>a</sup>	8.46
12:00 pm	646.17 <sup>b</sup>	8.14	659.66 <sup>b</sup>	8.04	735.71 <sup>a</sup>	2.95
9:00 pm	633.34 <sup>c</sup>	4.05	668.30 <sup>b</sup>	4.11	734.96 <sup>a</sup>	9.38
Media	640.68 <sup>c</sup>	4.52	665.99 <sup>b</sup>	7.15	735.58 <sup>a</sup>	9.39

**4.1.3. Grafico del amperaje ( $\mu\text{A}$ ) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.**

En el siguiente grafico 14 se observa que la celda 2 obtuvo mayor cantidad de amperaje ( $\mu\text{A}$ ) con una proporción de 50 % de inculo (lodo negro) y 50 % de sustrato, como mejor valor se obtuvo 46.45 ( $\mu\text{A}$ ).

**Figura 15**

*Valores de amperaje ( $\mu\text{A}$ ) x celda de combustible microbiano (MFC)*

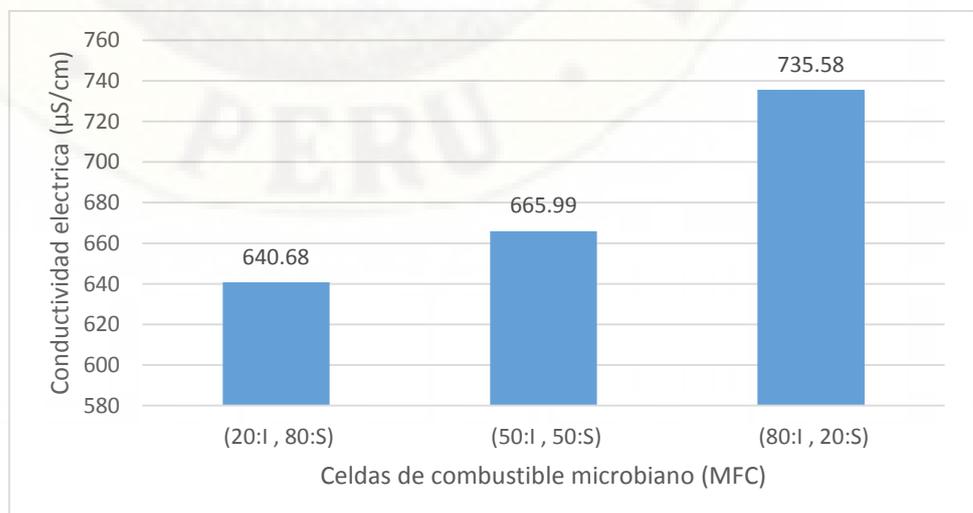


**4.1.4. Gráfico de la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.**

En el siguiente grafico 15 se observa que la celda 3 obtuvo mayor cantidad de conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) con una proporción de 80 % de inoculo (lodo negro) y 20 % de sustrato, como mejor valor se obtuvo 735.58 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

**Figura 16**

*Valores de conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) por celda de combustible microbiano (MFC)*



## 4.2. Prueba de hipótesis

Para el contraste de hipótesis se realizó las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, siendo los supuestos que debería cumplir los datos para realizar el correcto análisis de varianza.

### A. Test de normalidad para amperaje

**Tabla 6**

Test de normalidad para las lecturas de amperaje

---

Test para normalidad				
Test		Estadístico		p valor
Kolmogorov-Smirnov	<b>D</b>	0.123064	<b>Pr &gt; D</b>	>0.1500

---

La prueba de normalidad se realizó con el estadístico SAS mediante el contraste de Kolmogorov-Smirnov que es adecuado cuando las muestras son grandes ( $n > 50$ ). Se observa que todo los p-valores (Sig.) son mayores que el nivel de significación 0.05, por tanto, se concluye que las muestras de amperaje se comportan de manera normal, por tanto, se cumple con el supuesto de normalidad.

### B. Test de normalidad para conductividad eléctrica

**Tabla 7**

Test de normalidad para las lecturas de conductividad eléctrica.

---

Test para normalidad				
Test		Estadístico		p valor
Kolmogorov-Smirnov	<b>D</b>	0.453064	<b>Pr &gt; D</b>	>0.1500

---

La prueba de normalidad se realizó con el estadístico SAS mediante el contraste de Kolmogorov-Smirnov que es adecuado cuando las muestras son grandes ( $n > 50$ ). Se observa que todo los p-valores (Sig.) son mayores que el nivel de significación 0.05, por tanto, se concluye que las muestras de conductividad eléctrica se comportan de manera normal, por tanto, se cumple con el supuesto de normalidad.

#### **4.2.1. Pasos para la prueba de hipótesis**

Como señala Hernández *et al.* (2014), la contratación de hipótesis se resume a 6 pasos, y estando en este último paso, se tiene ya la posibilidad de tomar la decisión de aceptar o rechazar la hipótesis nula; atendiendo a este planteamiento, que a criterio propio es el más coherente; sin dejar de lado otros planteamientos, se ha optado por seguir estos pasos para el contraste de la hipótesis:

1. Formular la hipótesis nula y alterna de acuerdo al problema.
2. Escoger un nivel de significancia o riesgo " $\alpha$ ".
3. Escoger el estadígrafo de prueba más apropiado.
4. Establecer la región crítica.
5. Calcular los valores de la prueba estadística de una muestra aleatoria de tamaño " $n$ ".
6. Decisión estadística: rechazar la hipótesis nula ( $H_0$ ) si el estadígrafo tiene un valor en la región crítica y no rechazar (aceptar) igual en el otro caso.

#### **1. Formulación de la hipótesis nula y alterna**

##### **a) Formulación de la hipótesis nula y alterna para el primer objetivo**

- ✓ Formulación de la hipótesis para Amperaje

Ho: No Existe diferencia en el amperaje ( $\mu A$ ) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

$$\mu = 30\mu A$$

Ha: Existe diferencia en el amperaje ( $\mu A$ ) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

$$\mu \neq 30\mu A$$

✓ Formulación de la hipótesis para Conductividad eléctrica

Ho: No existe diferencia en la conductividad eléctrica ( $\mu S/cm$ ) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

$$\mu = 700CE(\mu S/cm)$$

Ha: Existe diferencia en la conductividad eléctrica ( $\mu S/cm$ ) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

$$\mu \neq 700CE(\mu S/cm)$$

## 2. Nivel de significación

En la presente investigación se trabajó con un error de 5 %; es decir:

$\alpha = 0.05$ , por lo que el error del trabajo no debe ser mayor al planteado y con un grado de confianza de 95 %, es decir con  $1 - \alpha = 0.95$ .

## 3. Estadístico de prueba

Se trabajó con el estadístico F de Fisher para el análisis de varianzas ANOVA (Sampieri, 2010).

## 4. Estimación de p-valor

Para la prueba de una cola con  $\alpha=0.05$  en la tabla de Fisher tenemos los valores críticos de  $F_{\alpha, V_1, V_2}$ .

Se utilizó la tabla de Fisher con valores críticos de la distribución de 0.05

$$F_{\text{tabla}}(1,27) = 3.35$$

$F_{\text{cal}} \leq$  que el valor del F de la tabla se acepta la hipótesis nula

$F_{\text{cal}} >=$  que el valor del F de la tabla se rechaza la hipótesis nula.

## 5. Cálculo de los estadígrafos de prueba

### - Análisis de varianza para amperaje ( $\mu\text{A}$ )

Análisis de varianza (ANOVA) para el amperaje de las celdas de combustible microbiano.

Siguen el análisis de varianza las celdas de combustible microbiano (C1, C2 y C3) fue altamente significativo ( $P < 0,05$ ) para las celdas de combustible.

**Tabla 8**

Análisis de varianza para los valores de amperaje

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	2	23768.73810	11884.36905	83.83	<.0001
Error	249	35298.11905	141.75951		
Total corregido	251	59066.85714			

### - Análisis de varianza para conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )

Análisis de varianza (ANOVA) para la conductividad eléctrica de las celdas de combustible microbiano.

Siguen el análisis de varianza las celdas de combustible microbiano (C1, C2 y C3) fue altamente significativo ( $P < 0,05$ ) para las celdas de combustible.

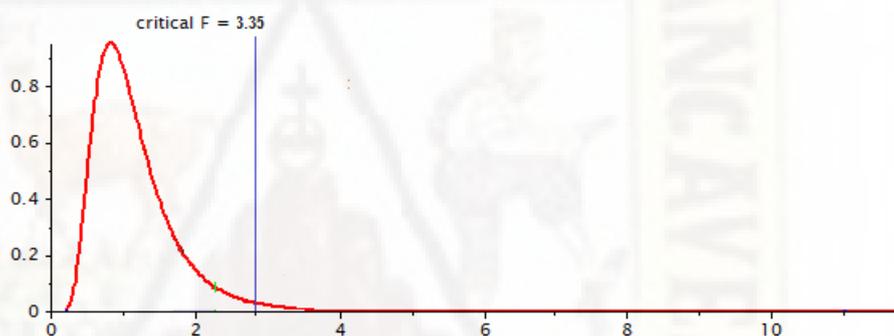
**Tabla 9**

Análisis de varianza para los valores de conductividad eléctrica

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
<b>Modelo</b>	2	405682.8659	202841.4330	102.78	<b>&lt;.0001</b>
<b>Error</b>	249	491409.2776	1973.5312		
<b>Total corregido</b>	251	897092.1435			

**Figura 17**

*Grafica del valor crítico y el valor de Fisher.*



Amperaje:

El valor de Fischer (F) calculado es igual a 83.83 > que el valor de Fischer (F) tabla igual 3.35.

Conductividad eléctrica:

El valor de Fischer (F) calculado es igual a 102.78 > que el valor de Fischer (F) tabla igual 3.35.

## 6. Decisión estadística

### a) Decisión estadística para el primer hipótesis amperaje

Acepto la hipótesis nula ( $H_0$ ) y rechazo la hipótesis alterna ( $H_a$ ). Debido a que el valor F calculado es igual a 83.83 > que el valor de F de la tabla igual 3.35. Además de la prueba de medias determinó que existe diferencias entre las celdas de combustible microbiano (MFC) (C2-46.

45<sup>a</sup>) (C3-24.36<sup>b</sup>) y (C1-27.75<sup>b</sup>) por lo tanto, se afirma que: **Existe diferencia en el amperaje ( $\mu\text{A}$ ) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.** Con un grado de significancia estadística un alfa de 0.05 %.

**b) Decisión estadística para la segunda hipótesis conductividad eléctrica**

Acepto la hipótesis nula ( $H_a$ ) y rechazo la hipótesis alterna ( $H_o$ ). Debido a que el valor F calculado es igual a 102.78 > que el valor de F de la tabla igual 3.35. Además de la prueba de medias determinó que existe diferencias entre las celdas de combustible microbiano (MFC) (C3-735.58<sup>a</sup>), (C2-665.99<sup>b</sup>) (C1-640.68<sup>c</sup>) por lo tanto, se afirma que: **Existe diferencia en la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.** Con un grado de significancia estadística un alfa de 0.05 %.

### **4.3. Discusión de resultados**

En la celda de combustible microbiano (MFC) se obtuvo mayor cantidad de amperaje ( $\mu\text{A}$ ) para la celda 2 con 46.45<sup>a</sup> ( $\mu\text{A}$ ) similares a los comportamientos de Llontop (2018) y Rojas (2017) con valores medio de amperaje ( $\mu\text{A}$ ), 50.23 valores que se obtuvieron en condiciones con temperaturas medias de 26 °C y Nafion 117, electrodos de grafito de alta densidad y como agente biológico se aisló una bacteria nativa a partir de biomasa residual de origen porcícola, el sustrato usado fue el caldo de infusión. Las celdas de combustible microbiano (MFC) se obtuvieron valor iguales 27.75<sup>b</sup> y 24.36<sup>b</sup> ( $\mu\text{A}$ ) difiere con Pineda (2015) donde se obtuvo producción de amperaje 60.45 ( $\mu\text{A}$ ) donde se trabajó en condiciones de quien observó la producción de energía eléctrica en una MFC empleando Cascarilla de Arroz (*Oryza sativa*) como sustrato y Licor Ruminant Bovino como inóculo microbiano. Se realizó una comparación del sustrato consumido con la energía total producida. La MFC tuvo un diseño de

dos cámaras cilíndricas concéntricas, tipo batch, con puente salino de cloruro de potasio y electrodos de malla de acero inoxidable 301

En el monitoreo realizado se obtuvo en las celdas de combustible microbiano (MFC) se obtuvo como mayor cantidad de conductividad eléctrica para la celda 3 con 735.58 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) se puede contrastar con Cervantes (2011) donde difiere con los valores reportados 977.56 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) se puede destacar que trabajo con 4 MFC con cátodo flotante (CF) y 1 con baffles y ánodo en forma de escobillón (BAE). Primero, se comparó el efecto de la presencia de fenol; segundo, la resistencia externa fija (220, 460 y 1000  $\Omega$ ) y la resistencia externa variable; tercero, el comportamiento electroquímico de 2 MFC-CF previamente aclimatadas; y, por último, se operó, evaluó y comparó el comportamiento de una MFC construida con materiales de bajo costo (BAE) con el comportamiento de la MFC operada anteriormente (CF). La celda de combustible microbiano (MFC) se obtuvo un valor de 665.99 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) de conductividad eléctrica valores similares reportados con Huitzil (2010) donde trabajo con empleo de *Geobacter Sulfurreducens* en diferentes países (México, EUA, Argentina y Corea del Sur), comparando los parámetros: medio de crecimiento, electrodos, valores eléctricos obtenidos, temperatura y pH. El medio de crecimiento siempre estuvo compuesto por cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), fosfato diácido de sodio ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ), cloruro de potasio (KCl) y bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ).

## Conclusiones

- ✓ La mejor eficiencia de tratamiento en las celdas de combustible microbiano es para la celda 2 para amperaje y en la celda 3 la conductividad eléctrica.
- ✓ El amperaje en unidades de ( $\mu\text{A}$ ) en la generación de energía eléctrica es superior a 46.45 ( $\mu\text{A}$ ) para la celda de combustible microbiano (MFC) N°02 en ciudad de Huancavelica.
- ✓ En la conductividad eléctrica en unidades de ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en la generación de energía eléctrica es superior a 735.58 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) para la celda de combustible microbiano (MFC) N°03 en ciudad de Huancavelica.

## **Recomendaciones**

- Se recomienda utilizar otras fuentes de sustrato como de granja de porcinos, granja de vacunos para poder observar el rendimiento de la energía en las celdas de combustible microbiano (MFC).
- Se debe utilizar otras proporciones de inóculo para poder observar sus rendimientos en las celdas de combustible microbiano.
- Se recomienda utilizar un aireador de mayor intensidad para poder observar la mayor oxidación de los inóculos bacteriano.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bermudez, M. A., & Bernal, E. D. (2018). "Implementación de una celda de combustible microbiana a escala laboratorio para generación de energía eléctrica". Retrieved from <http://e-journal.uajy.ac.id/14649/1/JURNAL.pdf>
- Bosques, J. L., & Suacedo, L. (2005). "Electricidad Básica". *Facultad de Trabajo Social de La UNLP*, 107. Retrieved from [http://www.trabajosocial.unlp.edu.ar/uploads/docs/electricidad\\_basica\\_ii.pdf](http://www.trabajosocial.unlp.edu.ar/uploads/docs/electricidad_basica_ii.pdf)
- Briceño, K. (2015). "Qué es la Curva de Crecimiento Bacteriano Características Principales" - Lifeder. *Lifeder*. Retrieved from <https://www.lifeder.com/curva-crecimiento-bacteriano/>
- Buitrón, G., & Pérez, J. (2011). "Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos". *Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 14(1), 5–11.
- Calderón, H. M. (2017). "Generación y acumulación de energía eléctrica utilizando sistemas de Celdas de Combustible Microbianas (MFC) inoculadas con lodos activos procedentes de la PTAP" - La Tomilla- Arequipa, 1–114.
- Carmona, A. A. (2008). "Obtención de energía eléctrica directa de una celda de combustible microbiana mediante el tratamiento de lixiviados de la producción fermentativa". <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15755.90400>
- Cervantes, C. (2011). "Biodegradación De Aguas Residuales Y Producción De Electricidad En Una Celda De Combustible Microbiana", 87.
- Falcón, A., Lozano, J. E., & Juárez, K. (2009). "Bioelectricidad". *BioTecnología*, 13(3), 62–78.
- Flores, M. (2013). "Conocimientos básicos de electricidad", 44. Retrieved from [http://ricardoprieto.es/mediapool/61/615322/data/TECNOLOGIA\\_ELECTRIC A0001.pdf](http://ricardoprieto.es/mediapool/61/615322/data/TECNOLOGIA_ELECTRIC A0001.pdf)
- Franco, L. I., & Ricaurte, S. A. (2018). "Evaluación de una celda de combustible

microbiana para el tratamiento del agua residual del campus universitario Meléndez".

Galvez, C. (2013). "Eficiencia de la PTAR" de San Lucas Sacatepequez, Sacatepequez, 98.

González, A. (2015). "Valorización energética y tratamiento de efluentes residuales mediante celdas de combustible microbiológicas", 1–410.

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). "*Metodología de la investigación. Journal of Chemical Information and Modeling*" (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Huitzil, T. E. (2010). "Generación de electricidad empleando *Geobacter Sulfurreducens*". Retrieved from [http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/7309/1/TE\\_SIS.pdf](http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/7309/1/TE_SIS.pdf)

INEI. (2018). "Perfil Sociodemográfico del Perú CENSO NACIONAL 2017: XII de Población", VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas, 1–644. Retrieved from [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1539/index.html](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1539/index.html)

Jibaja, S. J. (2018). "Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas a partir de tiosulfato utilizando cepas de *Acidithiobacillus ferrooxidans*", 106.

Llontop, E. O. (2018). "Influencia de los niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de las aguas residuales crudas con la cantidad de energía eléctrica utilizando celdas de combustible microbiana".

Logan, B. E. (2007). "Microbial Fuel Cells. In *Biochemical Engineering and Biotechnology*" (pp. 527–555). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63357-6.00018-3>

Medina, S. A., & Zapata, M. J. (2017). "Evaluación de la producción de energía eléctrica y disminución de dco en agua residual sintética mediante celdas de

- combustible microbianas a escala laboratorio". *Universitas Nusantara PGRI Kediri, 01*, 1–7. Retrieved from <http://www.albayan.ae>
- Metcalf, & Eddy. (1995). "*Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización*". *McGraw-Hill*. <https://doi.org/10.1036/0070418780>
- MINEM. (2015). "*Plan nacional de electrificación rural (PNER) periodo 2016 - 2025*". *Republica Del Peru*. Retrieved from [http://www.minem.gob.pe/\\_publicaSector.php?idSector=12](http://www.minem.gob.pe/_publicaSector.php?idSector=12)
- MVCS. (2006). "Reglamento nacional de edificaciones". *El Peruano*, 1–439. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- MVCS. (2013). "Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales".
- Ñacato, D. C. (2018). "Evaluación de la aplicación del campo magnético en la producción de energía eléctrica a partir de la degradación de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbianas tipo batch". Retrieved from <http://e-journal.uajy.ac.id/14649/1/JURNAL.pdf>
- OEFA. (2014). "Fiscalización ambiental en aguas residuales". *Biblioteca Nacional Del Perú N° 2014-05991*, 42. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- OTASS. (2015). "EMAPA Huancavelica informe final de evaluación 2013-2015".
- Pineda, K. M. (2015). "Producción de energía eléctrica en una Celda de Combustible Microbiana empleando Cascarrilla de Arroz (*Oryza sativa*) como sustrato y Licor Ruminant Bovino como inóculo microbiano".
- Pistonesi, C., Haure, J. L., & D'Elmar, R. (2010). "Energía a partir de las aguas residuales". *EdUTecNe*, 1–63.
- Ramirez, E. (2004). "Fundamentos teóricos de lodos activados y aereación extendida", 46–81. Retrieved from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018834/MEMORIAS2004/CapituloII/1Fundamentosdelprocesodelodosactivados.pdf>
- Revelo, D. M., Hurtado, N. H., & Ruiz, J. O. (2013). "Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la

Generación de Energía Eléctrica". *Información Tecnológica*, 24(6), 17–28.

<https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>

Rojas, M. C. (2017). "Análisis de la eficiencia de la generación eléctrica de un agente biológico en un sistema bioelectroquímico", 93.

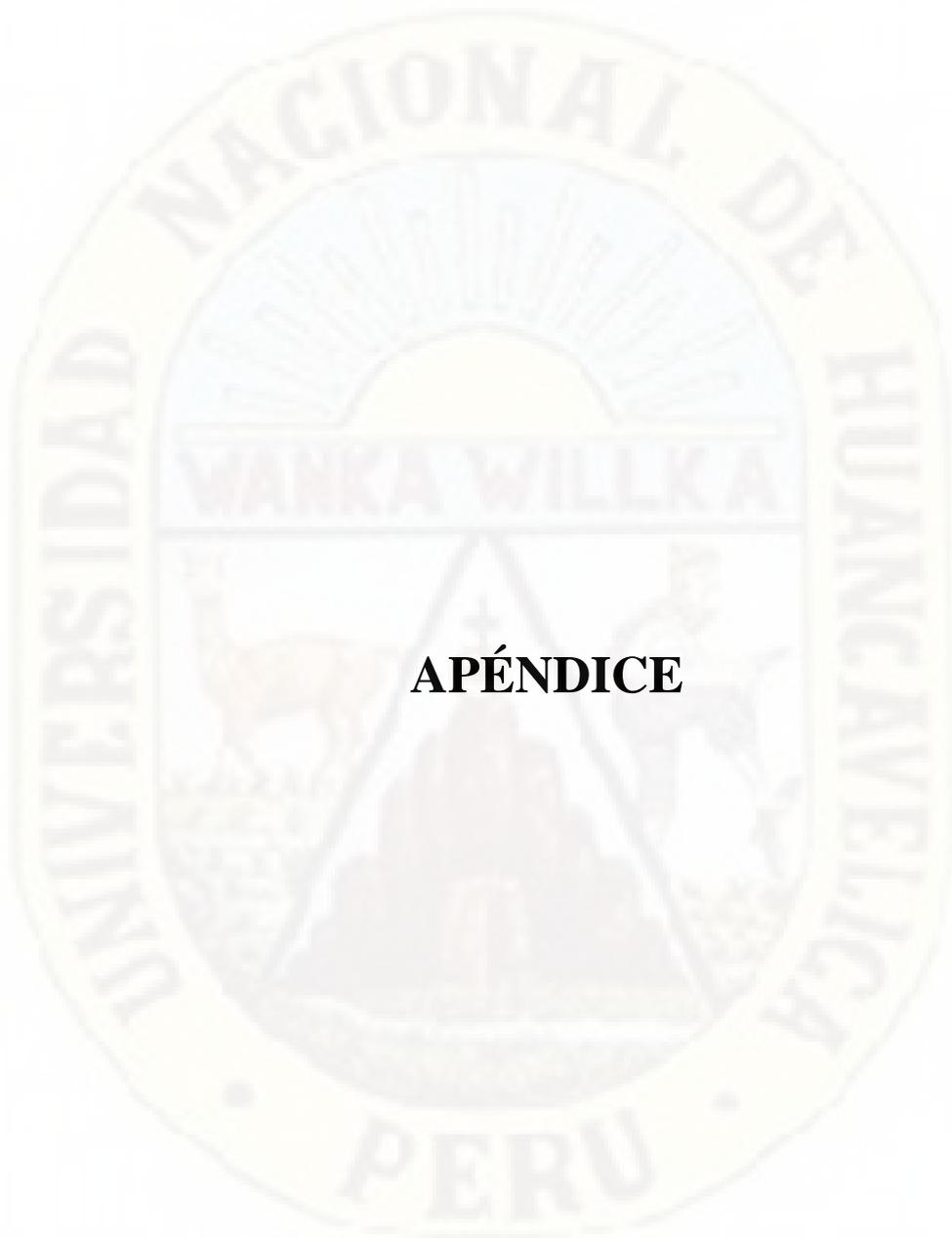
Romero, A. A., Vásquez, J., & González, A. (2012). "Bacterias, fuente de energía para el futuro. *Tecnura*", (32), 118–143.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2012.2.a10>

Romero, A., Adrian, J., & Lugo, A. (2012). "Bacterias, fuente de energía para el futuro". *Tecnura*, (32), 118–143.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2012.2.a10>

Saavedra, I. M. (2012). "Diseño de una celda de combustible microbiológica con uso de bacterias oxidantes de azufre y hierro", 57.



## **APÉNDICE**

**Tabla 10**

Matriz de consistencia

Formulación Del Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
<p><b>Problema General</b></p> <p>¿Cuál será la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica?</p>	<p><b>Objetivo General</b></p> <p>Determinar el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.</p>	<p><b>Hipótesis General:</b></p> <p>La eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.</p>	<p><b>variable dependiente</b></p> <p>Eficiencia en el tratamiento de aguas residuales.</p>	<p><b>Tipo de investigación:</b></p> <p>Investigación aplicada.</p> <p><b>Nivel de investigación:</b></p> <p>Explicativo</p> <p><b>Método de investigación:</b></p> <p>Científico</p> <p><b>Diseño de investigación:</b></p> <p>Experimental - DCA</p>
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	Variables independientes	Población
<p>¿Cuál es el amperaje (<math>\mu A</math>) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica?</p> <p>¿Determinar la conductividad eléctrica (<math>\mu S/cm</math>) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible</p>	<p>Determinar el amperaje (<math>\mu A</math>) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.</p> <p>Determinar la conductividad eléctrica (<math>\mu S/cm</math>) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible</p>	<p>Existe diferencia en el amperaje (<math>\mu A</math>) en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.</p> <p>Existe diferencia en la conductividad eléctrica (<math>\mu S/cm</math>) en el tratamiento de aguas</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amperaje (<math>\mu A</math>).</li> <li>• Conductividad eléctrica (<math>\mu S/cm</math>).</li> </ul>	<p>La población de la investigación es el caudal de aguas doméstica residuales del puente Colgate del lugar denominado las tres boas</p>

---

microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica?

microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica.

**Muestra**

Un caudal de 1 litro por muestreo.

**Muestreo**

no probabilístico, muestreo por conveniencia

**técnicas e instrumentos de recolección de datos:**

Observación, Trabajo experimental.

**técnicas de procesamiento y análisis de datos:**

SAS versión 9.4

---

## Apéndice 2

**Tabla 11**

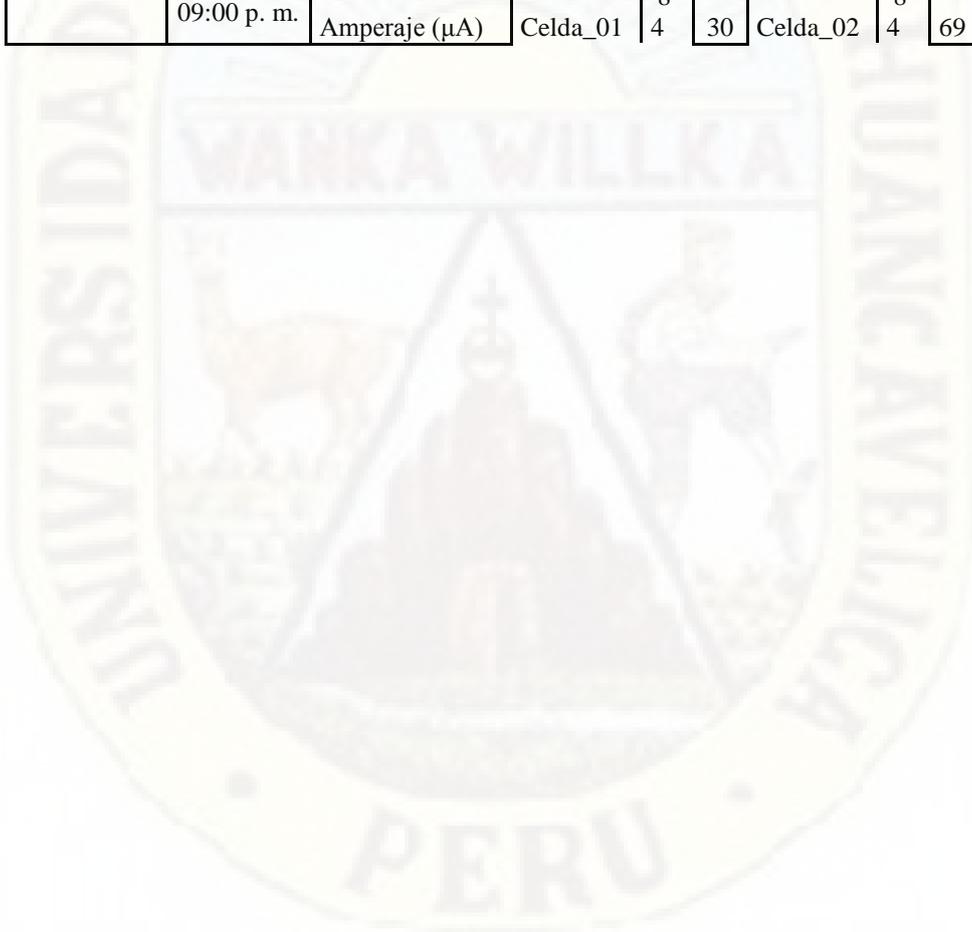
*Base de datos del amperaje*

DIA	Hora	Parametro	CELDA N° 01			CELDA N° 02			CELDA N° 03		
			Celda_01	1	16	Celda_02	1	20	Celda_03	1	38
02/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	1	16	Celda_02	1	20	Celda_03	1	38
	12:00 p. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	2	17	Celda_02	2	30	Celda_03	2	42
	09:00 p. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	3	19	Celda_02	3	31	Celda_03	3	35
03/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	4	18	Celda_02	4	31	Celda_03	4	39
	12:00 p. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	5	18	Celda_02	5	32	Celda_03	5	10
	09:00 p. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	6	21	Celda_02	6	33	Celda_03	6	9
04/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	7	19	Celda_02	7	33	Celda_03	7	13
	12:00 p. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	8	19	Celda_02	8	36	Celda_03	8	16
	09:00 p. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	9	19	Celda_02	9	39	Celda_03	9	16
05/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	0	22	Celda_02	0	38	Celda_03	0	17
	12:00 p. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	1	29	Celda_02	1	42	Celda_03	1	19
	09:00 p. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	2	28	Celda_02	2	35	Celda_03	2	19
06/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	3	23	Celda_02	3	39	Celda_03	3	21
	12:00 p. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	4	25	Celda_02	4	36	Celda_03	4	22
	09:00 p. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	5	24	Celda_02	5	31	Celda_03	5	24
07/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	6	25	Celda_02	6	38	Celda_03	6	26
	12:00 p. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	7	30	Celda_02	7	29	Celda_03	7	25
	09:00 p. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	8	31	Celda_02	8	32	Celda_03	8	29
08/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	9	30	Celda_02	9	36	Celda_03	9	28
	12:00 p. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	0	28	Celda_02	0	32	Celda_03	0	29
	09:00 p. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	2	22	Celda_02	2	28	Celda_03	2	31
09/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje (μA)	Celda_01	2	21	Celda_02	2	29	Celda_03	2	32

	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	2 3	20	Celda_02	2 3	18	Celda_0 3	2 3	24
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	2 4	18	Celda_02	2 4	12	Celda_0 3	2 4	28
10/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	2 5	22	Celda_02	2 5	14	Celda_0 3	2 5	25
	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	2 6	24	Celda_02	2 6	30	Celda_0 3	2 6	26
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	2 7	23	Celda_02	2 7	31	Celda_0 3	2 7	24
11/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	2 8	24	Celda_02	2 8	30	Celda_0 3	2 8	26
	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	2 9	32	Celda_02	2 9	28	Celda_0 3	2 9	24
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	3 0	28	Celda_02	3 0	22	Celda_0 3	3 0	27
12/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	3 1	34	Celda_02	3 1	16	Celda_0 3	3 1	25
	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	3 2	34	Celda_02	3 2	16	Celda_0 3	3 2	25
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	3 3	34	Celda_02	3 3	44	Celda_0 3	3 3	29
13/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	3 4	37	Celda_02	3 4	42	Celda_0 3	3 4	31
	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	3 5	44	Celda_02	3 5	52	Celda_0 3	3 5	32
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	3 6	39	Celda_02	3 6	40	Celda_0 3	3 6	31
14/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	3 7	41	Celda_02	3 7	48	Celda_0 3	3 7	31
	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	3 8	45	Celda_02	3 8	50	Celda_0 3	3 8	33
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	3 9	41	Celda_02	3 9	49	Celda_0 3	3 9	30
15/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	4 0	43	Celda_02	4 0	45	Celda_0 3	4 0	34
	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	4 1	53	Celda_02	4 1	40	Celda_0 3	4 1	32
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	4 2	45	Celda_02	4 2	40	Celda_0 3	4 2	31
16/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	4 3	37	Celda_02	4 3	42	Celda_0 3	4 3	25
	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	4 4	43	Celda_02	4 4	53	Celda_0 3	4 4	35
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	4 5	42	Celda_02	4 5	20	Celda_0 3	4 5	44
17/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	4 6	42	Celda_02	4 6	20	Celda_0 3	4 6	44
	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	4 7	28	Celda_02	4 7	61	Celda_0 3	4 7	43
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	4 8	22	Celda_02	4 8	58	Celda_0 3	4 8	18
18/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	4 9	19	Celda_02	4 9	49	Celda_0 3	4 9	29

	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	5 0	22	Celda_02	5 0	54	Celda_03	5 0	17
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	5 1	25	Celda_02	5 1	52	Celda_03	5 1	18
19/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	5 2	19	Celda_02	5 2	51	Celda_03	5 2	41
	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	5 3	22	Celda_02	5 3	53	Celda_03	5 3	21
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	5 4	33	Celda_02	5 4	50	Celda_03	5 4	26
20/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	5 5	32	Celda_02	5 5	55	Celda_03	5 5	23
	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	5 6	34	Celda_02	5 6	59	Celda_03	5 6	30
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	5 7	35	Celda_02	5 7	62	Celda_03	5 7	24
21/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	5 8	32	Celda_02	5 8	64	Celda_03	5 8	25
	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	5 9	29	Celda_02	5 9	66	Celda_03	5 9	20
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	6 0	32	Celda_02	6 0	72	Celda_03	6 0	24
22/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	6 1	25	Celda_02	6 1	66	Celda_03	6 1	20
	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	6 2	16	Celda_02	6 2	62	Celda_03	6 2	14
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	6 3	22	Celda_02	6 3	56	Celda_03	6 3	19
23/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	6 4	24	Celda_02	6 4	64	Celda_03	6 4	15
	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	6 5	30	Celda_02	6 5	69	Celda_03	6 5	14
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	6 6	28	Celda_02	6 6	70	Celda_03	6 6	13
24/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	6 7	23	Celda_02	6 7	64	Celda_03	6 7	14
	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	6 8	27	Celda_02	6 8	71	Celda_03	6 8	13
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	6 9	21	Celda_02	6 9	66	Celda_03	6 9	9
25/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	7 0	24	Celda_02	7 0	67	Celda_03	7 0	9
	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	7 1	23	Celda_02	7 1	67	Celda_03	7 1	18
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	7 2	20	Celda_02	7 2	64	Celda_03	7 2	26
26/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	7 3	20	Celda_02	7 3	63	Celda_03	7 3	30
	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	7 4	19	Celda_02	7 4	67	Celda_03	7 4	22
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	7 5	22	Celda_02	7 5	59	Celda_03	7 5	24
27/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	7 6	27	Celda_02	7 6	61	Celda_03	7 6	18

	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	7	24	Celda_02	7	65	Celda_03	7	20
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	7	26	Celda_02	7	64	Celda_03	7	15
28/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	7	33	Celda_02	7	63	Celda_03	7	16
	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	8	32	Celda_02	8	78	Celda_03	8	33
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	8	32	Celda_02	8	64	Celda_03	8	22
29/01/2020	09:00 a. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	8	17	Celda_02	8	63	Celda_03	8	20
	12:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	8	33	Celda_02	8	62	Celda_03	8	15
	09:00 p. m.	Amperaje ( $\mu\text{A}$ )	Celda_01	8	30	Celda_02	8	69	Celda_03	8	13



**Tabla 12***Base de datos de la conductividad eléctrica*

DIA	Hora	Parámetro	CELDA N° 01			CELDA N° 02			CELDA N° 03		
						Celda_01			Celda_02		
02/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	1	715.14	Celda_02	1	744.65	Celda_03	1	751.18
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	2	751.88	Celda_02	2	751.48	Celda_03	2	751.48
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	3	764.48	Celda_02	3	756.48	Celda_03	3	715.18
03/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	4	764.00	Celda_02	4	774.00	Celda_03	4	763.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	5	761.00	Celda_02	5	772.00	Celda_03	5	789.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	6	758.00	Celda_02	6	759.00	Celda_03	6	789.00
04/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	7	742.00	Celda_02	7	754.00	Celda_03	7	775.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	8	764.00	Celda_02	8	751.00	Celda_03	8	784.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	9	745.00	Celda_02	9	744.00	Celda_03	9	778.00
05/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	10	741.00	Celda_02	10	732.00	Celda_03	10	760.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	11	741.00	Celda_02	11	701.00	Celda_03	11	786.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	12	726.00	Celda_02	12	722.00	Celda_03	12	777.00
06/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	13	727.00	Celda_02	13	747.00	Celda_03	13	775.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	14	723.00	Celda_02	14	634.00	Celda_03	14	766.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	15	615.00	Celda_02	15	615.00	Celda_03	15	714.00
07/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	16	709.00	Celda_02	16	666.00	Celda_03	16	746.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	17	703.00	Celda_02	17	668.00	Celda_03	17	752.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	18	643.00	Celda_02	18	668.00	Celda_03	18	742.00
08/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	19	701.00	Celda_02	19	669.00	Celda_03	19	753.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	20	698.00	Celda_02	20	630.00	Celda_03	20	720.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	21	677.00	Celda_02	21	665.00	Celda_03	21	743.00
09/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	22	672.00	Celda_02	22	662.00	Celda_03	22	746.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	23	657.00	Celda_02	23	653.00	Celda_03	23	728.00

	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	24	649.00	Celda_02	24	656.00	Celda_03	24	723.00
10/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	25	639.00	Celda_02	25	653.00	Celda_03	25	719.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	26	638.00	Celda_02	26	649.00	Celda_03	26	729.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	27	626.00	Celda_02	27	650.00	Celda_03	27	723.30
11/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	28	626.00	Celda_02	28	642.00	Celda_03	28	720.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	29	620.00	Celda_02	29	630.00	Celda_03	29	720.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	30	621.00	Celda_02	30	665.00	Celda_03	30	743.00
12/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	31	622.00	Celda_02	31	662.00	Celda_03	31	746.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	32	619.00	Celda_02	32	653.00	Celda_03	32	728.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	33	619.00	Celda_02	33	656.00	Celda_03	33	723.00
13/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	34	615.00	Celda_02	34	653.00	Celda_03	34	719.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	35	615.00	Celda_02	35	649.00	Celda_03	35	729.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	36	613.00	Celda_02	36	650.00	Celda_03	36	723.30
14/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	37	613.00	Celda_02	37	642.00	Celda_03	37	720.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	38	698.00	Celda_02	38	630.00	Celda_03	38	720.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	39	677.00	Celda_02	39	665.00	Celda_03	39	743.00
15/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	40	672.00	Celda_02	40	662.00	Celda_03	40	746.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	41	657.00	Celda_02	41	653.00	Celda_03	41	728.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	42	649.00	Celda_02	42	656.00	Celda_03	42	723.00
16/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	43	639.00	Celda_02	43	653.00	Celda_03	43	719.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	44	638.00	Celda_02	44	649.00	Celda_03	44	729.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	45	626.00	Celda_02	45	650.00	Celda_03	45	723.30
17/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	46	626.00	Celda_02	46	642.00	Celda_03	46	720.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	47	698.00	Celda_02	47	630.00	Celda_03	47	720.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	48	677.00	Celda_02	48	665.00	Celda_03	48	743.00
18/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	49	672.00	Celda_02	49	662.00	Celda_03	49	746.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	50	657.00	Celda_02	50	653.00	Celda_03	50	728.00

	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	51	649.00	Celda_02	51	656.00	Celda_03	51	723.00
19/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	52	639.00	Celda_02	52	653.00	Celda_03	52	719.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	53	638.00	Celda_02	53	649.00	Celda_03	53	729.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	54	626.00	Celda_02	54	650.00	Celda_03	54	723.30
20/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	55	626.00	Celda_02	55	642.00	Celda_03	55	720.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	56	625.00	Celda_02	56	630.00	Celda_03	56	720.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	57	624.00	Celda_02	57	665.00	Celda_03	57	743.00
21/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	58	623.00	Celda_02	58	662.00	Celda_03	58	746.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	59	622.00	Celda_02	59	653.00	Celda_03	59	728.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	60	623.00	Celda_02	60	656.00	Celda_03	60	723.00
22/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	61	622.00	Celda_02	61	653.00	Celda_03	61	719.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	62	621.00	Celda_02	62	649.00	Celda_03	62	729.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	63	620.00	Celda_02	63	650.00	Celda_03	63	723.30
23/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	64	620.00	Celda_02	64	642.00	Celda_03	64	720.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	65	618.00	Celda_02	65	630.00	Celda_03	65	720.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	66	612.00	Celda_02	66	665.00	Celda_03	66	743.00
24/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	67	606.00	Celda_02	67	662.00	Celda_03	67	746.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	68	600.00	Celda_02	68	653.00	Celda_03	68	728.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	69	594.00	Celda_02	69	656.00	Celda_03	69	723.00
25/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	70	588.00	Celda_02	70	653.00	Celda_03	70	719.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	71	582.00	Celda_02	71	649.00	Celda_03	71	729.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	72	576.00	Celda_02	72	650.00	Celda_03	72	723.30
26/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	73	570.00	Celda_02	73	642.00	Celda_03	73	720.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	74	564.00	Celda_02	74	630.00	Celda_03	74	720.00
	09:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	75	558.00	Celda_02	75	665.00	Celda_03	75	743.00
27/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	76	552.00	Celda_02	76	630.00	Celda_03	76	720.00
	12:00 p. m.	Cond Elect (μS/cm)	Celda_01	77	546.00	Celda_02	77	665.00	Celda_03	77	743.00

	09:00 p. m.	Cond Elect ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Celda_01	78	540.00	Celda_02	78	662.00	Celda_03	78	746.00
28/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Celda_01	79	534.00	Celda_02	79	653.00	Celda_03	79	728.00
	12:00 p. m.	Cond Elect ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Celda_01	80	528.00	Celda_02	80	656.00	Celda_03	80	723.00
	09:00 p. m.	Cond Elect ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Celda_01	81	522.00	Celda_02	81	653.00	Celda_03	81	719.00
29/01/2020	09:00 a. m.	Cond Elect ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Celda_01	82	516.00	Celda_02	82	649.00	Celda_03	82	729.00
	12:00 p. m.	Cond Elect ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Celda_01	83	510.00	Celda_02	83	650.00	Celda_03	83	723.30
	09:00 p. m.	Cond Elect ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Celda_01	84	504.00	Celda_02	84	642.00	Celda_03	84	720.00



### Apéndice 3

#### Análisis estadístico

**DATA** ZUNIGAMATAMOROS;

**INPUT** TRATAMIENTOS \$ REPET AMPERAJE@@;

**CARDS**;

Celda01 1	16	Celda02 1	20	Celda03 1	38
Celda01 2	17	Celda02 2	30	Celda03 2	42
Celda01 3	19	Celda02 3	31	Celda03 3	35
Celda01 4	18	Celda02 4	31	Celda03 4	39
Celda01 5	18	Celda02 5	32	Celda03 5	10
Celda01 6	21	Celda02 6	33	Celda03 6	9
Celda01 7	19	Celda02 7	33	Celda03 7	13
Celda01 8	19	Celda02 8	36	Celda03 8	16
Celda01 9	19	Celda02 9	39	Celda03 9	16
Celda01 10	22	Celda02 10	38	Celda03 10	17
Celda01 11	29	Celda02 11	42	Celda03 11	19
Celda01 12	28	Celda02 12	35	Celda03 12	19
Celda01 13	23	Celda02 13	39	Celda03 13	21
Celda01 14	25	Celda02 14	36	Celda03 14	22
Celda01 15	24	Celda02 15	31	Celda03 15	24
Celda01 16	25	Celda02 16	38	Celda03 16	26
Celda01 17	30	Celda02 17	29	Celda03 17	25
Celda01 18	31	Celda02 18	32	Celda03 18	29
Celda01 19	30	Celda02 19	36	Celda03 19	28
Celda01 20	28	Celda02 20	32	Celda03 20	29
Celda01 21	22	Celda02 21	28	Celda03 21	31
Celda01 22	21	Celda02 22	29	Celda03 22	32
Celda01 23	20	Celda02 23	18	Celda03 23	24

Celda01	24	18	Celda02	24	12	Celda03	24	28
Celda01	25	22	Celda02	25	14	Celda03	25	25
Celda01	26	24	Celda02	26	30	Celda03	26	26
Celda01	27	23	Celda02	27	31	Celda03	27	24
Celda01	28	24	Celda02	28	30	Celda03	28	26
Celda01	29	32	Celda02	29	28	Celda03	29	24
Celda01	30	28	Celda02	30	22	Celda03	30	27
Celda01	31	34	Celda02	31	16	Celda03	31	25
Celda01	32	34	Celda02	32	16	Celda03	32	25
Celda01	33	34	Celda02	33	44	Celda03	33	29
Celda01	34	37	Celda02	34	42	Celda03	34	31
Celda01	35	44	Celda02	35	52	Celda03	35	32
Celda01	36	39	Celda02	36	40	Celda03	36	31
Celda01	37	41	Celda02	37	48	Celda03	37	31
Celda01	38	45	Celda02	38	50	Celda03	38	33
Celda01	39	41	Celda02	39	49	Celda03	39	30
Celda01	40	43	Celda02	40	45	Celda03	40	34
Celda01	41	53	Celda02	41	40	Celda03	41	32
Celda01	42	45	Celda02	42	40	Celda03	42	31
Celda01	43	37	Celda02	43	42	Celda03	43	25
Celda01	44	43	Celda02	44	53	Celda03	44	35
Celda01	45	42	Celda02	45	20	Celda03	45	44
Celda01	46	42	Celda02	46	20	Celda03	46	44
Celda01	47	28	Celda02	47	61	Celda03	47	43
Celda01	48	22	Celda02	48	58	Celda03	48	18
Celda01	49	19	Celda02	49	49	Celda03	49	29
Celda01	50	22	Celda02	50	54	Celda03	50	17
Celda01	51	25	Celda02	51	52	Celda03	51	18
Celda01	52	19	Celda02	52	51	Celda03	52	41

Celda01	53	22	Celda02	53	53	Celda03	53	21
Celda01	54	33	Celda02	54	50	Celda03	54	26
Celda01	55	32	Celda02	55	55	Celda03	55	23
Celda01	56	34	Celda02	56	59	Celda03	56	30
Celda01	57	35	Celda02	57	62	Celda03	57	24
Celda01	58	32	Celda02	58	64	Celda03	58	25
Celda01	59	29	Celda02	59	66	Celda03	59	20
Celda01	60	32	Celda02	60	72	Celda03	60	24
Celda01	61	25	Celda02	61	66	Celda03	61	20
Celda01	62	16	Celda02	62	62	Celda03	62	14
Celda01	63	22	Celda02	63	56	Celda03	63	19
Celda01	64	24	Celda02	64	64	Celda03	64	15
Celda01	65	30	Celda02	65	69	Celda03	65	14
Celda01	66	28	Celda02	66	70	Celda03	66	13
Celda01	67	23	Celda02	67	64	Celda03	67	14
Celda01	68	27	Celda02	68	71	Celda03	68	13
Celda01	69	21	Celda02	69	66	Celda03	69	9
Celda01	70	24	Celda02	70	67	Celda03	70	9
Celda01	71	23	Celda02	71	67	Celda03	71	18
Celda01	72	20	Celda02	72	64	Celda03	72	26
Celda01	73	20	Celda02	73	63	Celda03	73	30
Celda01	74	19	Celda02	74	67	Celda03	74	22
Celda01	75	22	Celda02	75	59	Celda03	75	24
Celda01	76	27	Celda02	76	61	Celda03	76	18
Celda01	77	24	Celda02	77	65	Celda03	77	20
Celda01	78	26	Celda02	78	64	Celda03	78	15
Celda01	79	33	Celda02	79	63	Celda03	79	16
Celda01	80	32	Celda02	80	78	Celda03	80	33
Celda01	81	32	Celda02	81	64	Celda03	81	22

Celda01	82	17	Celda02	82	63	Celda03	82	20
Celda01	83	33	Celda02	83	62	Celda03	83	15
Celda01	84	30	Celda02	84	69	Celda03	84	13

**PROC ANOVA DATA = ZUNIGAMATAMOROS;**

**CLASS TRATAMIENTOS;**

**MODEL AMPERAJE = TRATAMIENTOS;**

**RUN;**

**MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=OBRIEN;**

**MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=BARTLETT;**

**MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST= BF;**

**MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=LEVENE;**

**MEANS TRATAMIENTOS/TUKEY;**

**RUN;**

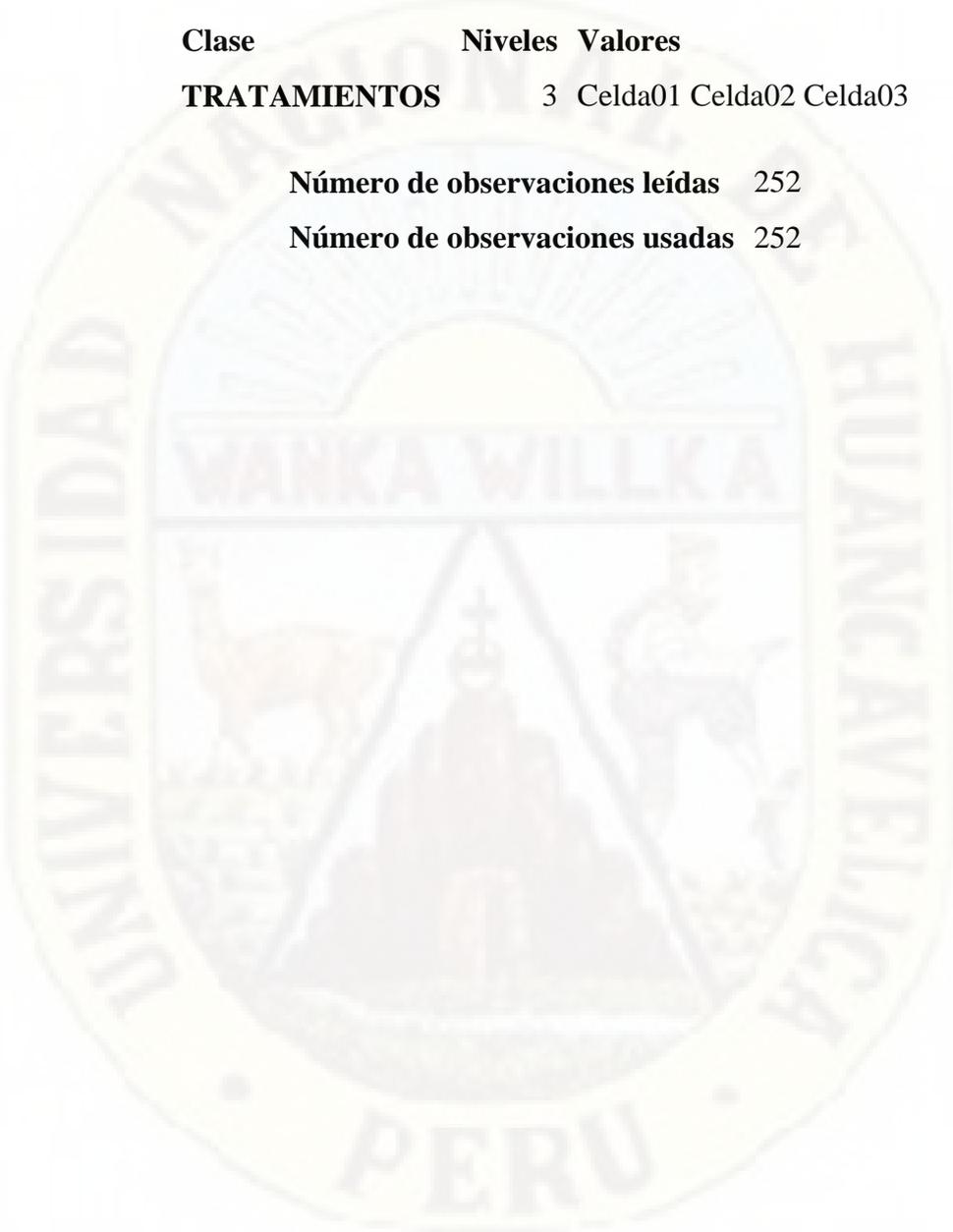
Procedimiento ANOVA

**Información de nivel de clase**

<b>Clase</b>	<b>Niveles</b>	<b>Valores</b>
<b>TRATAMIENTOS</b>	3	Celda01 Celda02 Celda03

**Número de observaciones leídas** 252

**Número de observaciones usadas** 252



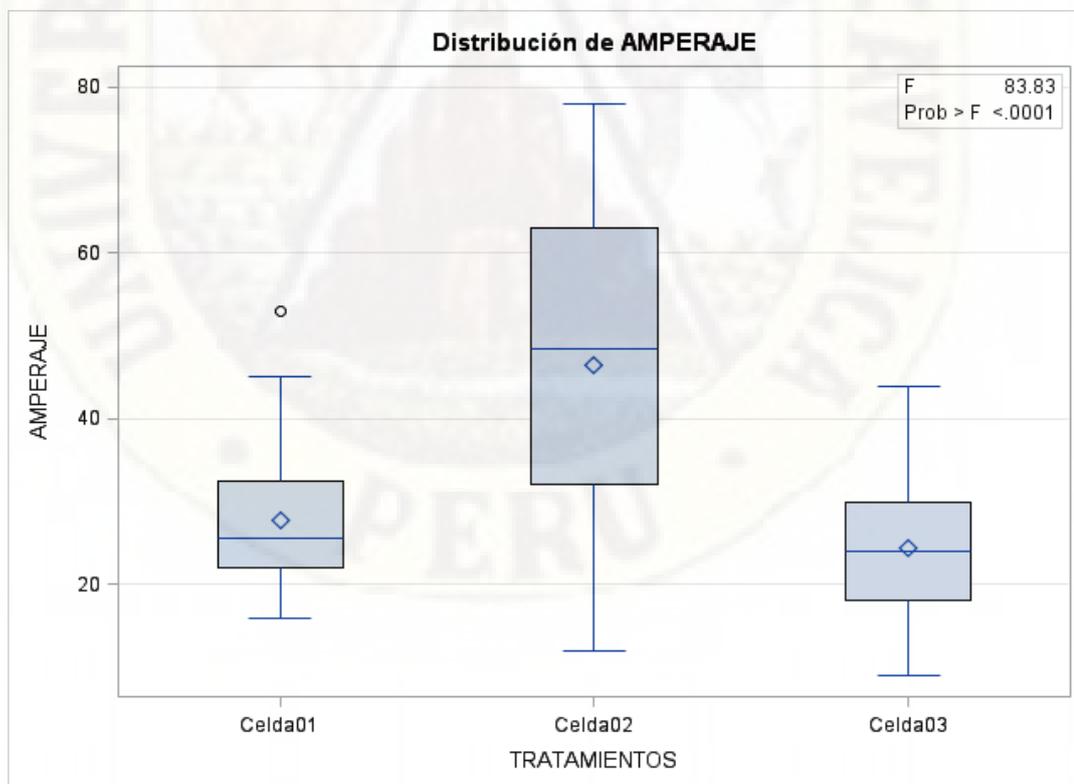
## Procedimiento ANOVA

Variable dependiente: AMPERAJE

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
<b>Modelo</b>	2	23768.73810	11884.36905	83.83	<.0001
<b>Error</b>	249	35298.11905	141.75951		
<b>Total corregido</b>	251	59066.85714			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	AMPERAJE Media
0.402404	36.23651	11.90628	32.85714

Fuente	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
<b>TRATAMIENTOS</b>	2	23768.73810	11884.36905	83.83	<.0001



Sistema SAS

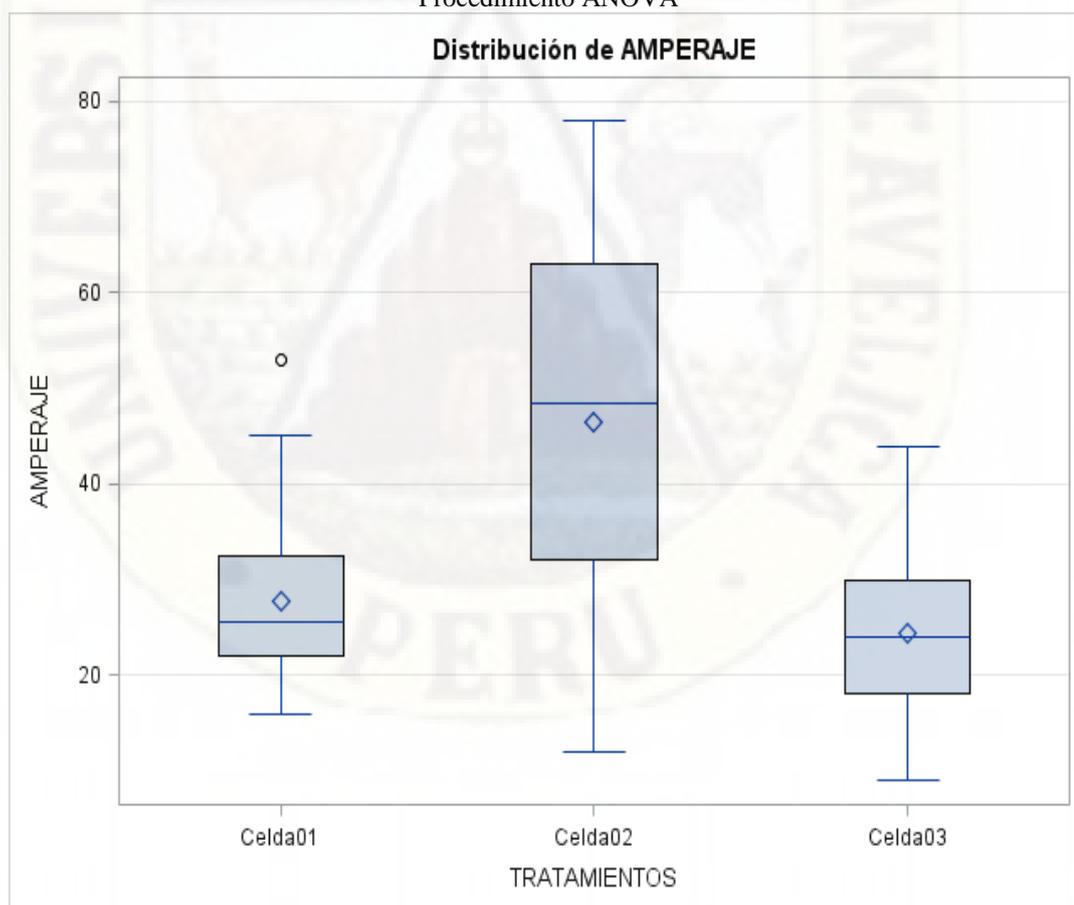
Procedimiento ANOVA

**Test de O'Brien para homogeneidad de la varianza AMPERAJE**  
**ANOVA de variable de extensión de O'Brien, W = 0.5**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
<b>TRATAMIENTOS</b>	2	2661178	1330589	43.31	<.0001
<b>Error</b>	249	7649808	30722.1		

Sistema SAS

Procedimiento ANOVA



Nivel de TRATAMIENTOS	N	AMPERAJE	
		Media	Dev std
Celda01	84	27.7500000	8.1917899
Celda02	84	46.4523810	16.9431400
Celda03	84	24.3690476	8.4322670

Sistema SAS

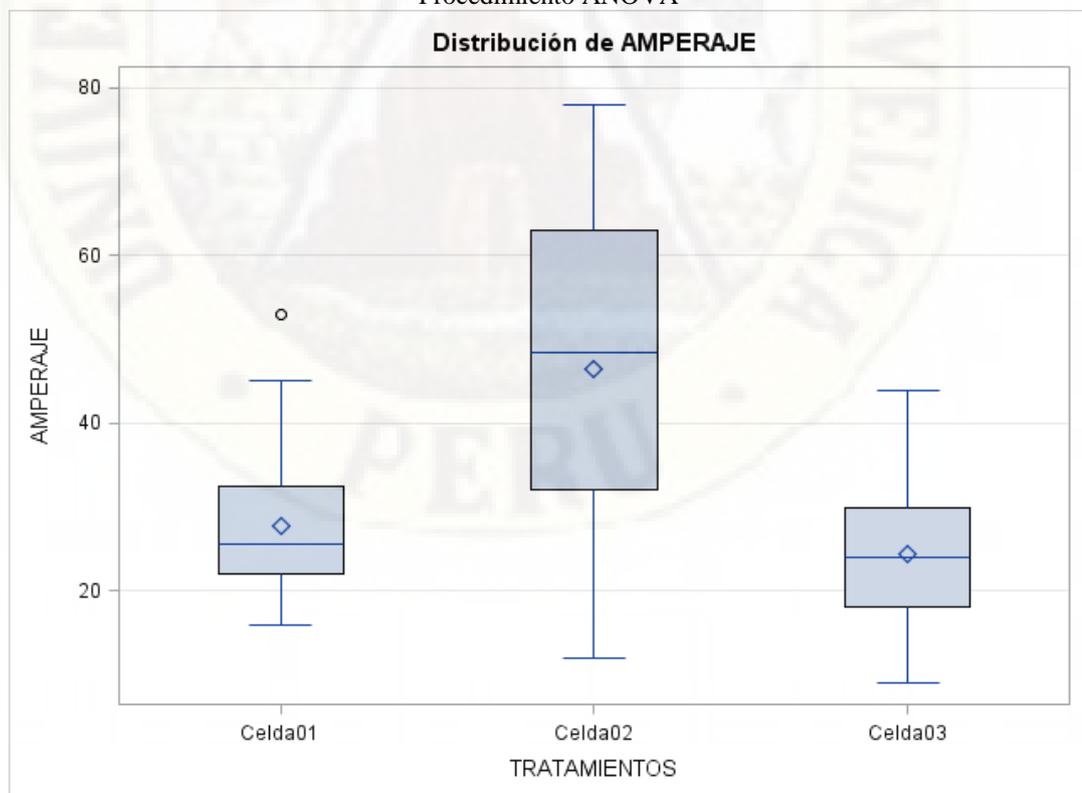
Procedimiento ANOVA

**Test de Bartlett para la homogeneidad de la varianza AMPERAJE**

Fuente	DF	Chi-cuadrado	Pr > ChiSq
TRATAMIENTOS	2	60.4550	<.0001

Sistema SAS

Procedimiento ANOVA



Nivel de TRATAMIENTOS	N	AMPERAJE	
		Media	Dev std
Celda01	84	27.7500000	8.1917899
Celda02	84	46.4523810	16.9431400
Celda03	84	24.3690476	8.4322670

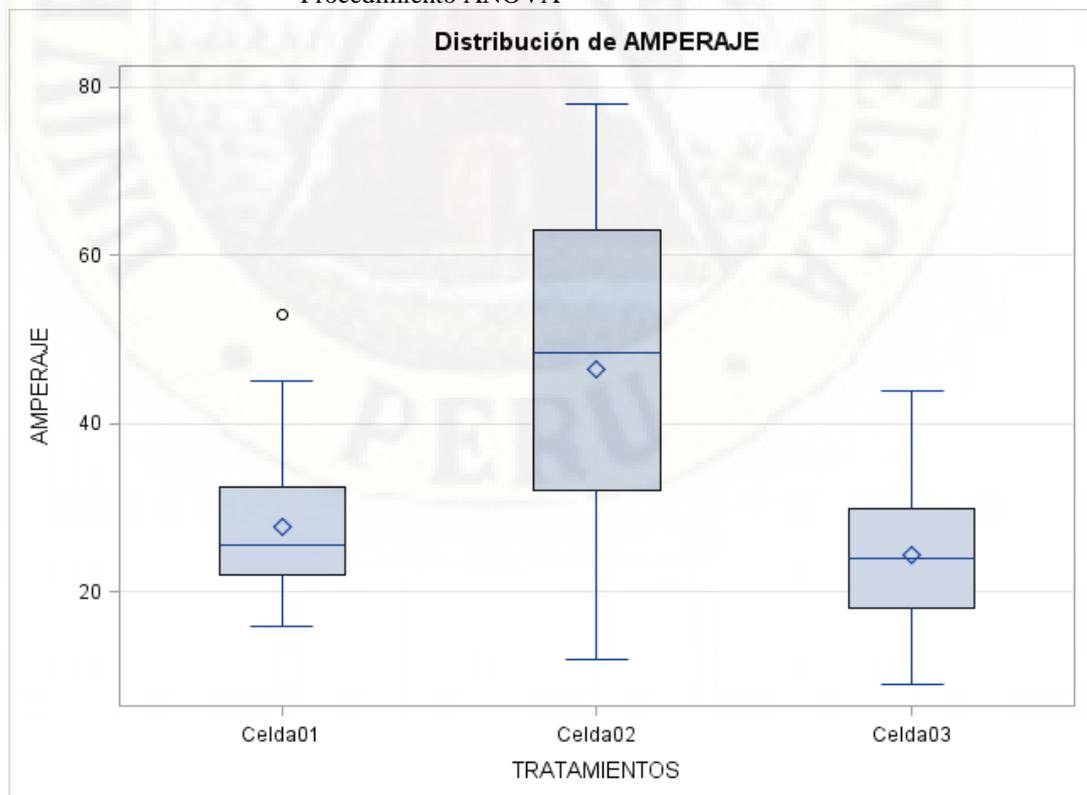
Sistema SAS

Procedimiento ANOVA

**Test Brown y Forsythe para la homogeneidad de la varianza AMPERAJE**  
**ANOVA de desviaciones absolutas de las medianas de grupo**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
TRATAMIENTOS	2	3746.2	1873.1	45.89	<.0001
Error	249	10164.3	40.8203		

Procedimiento ANOVA



Nivel de TRATAMIENTOS	N	AMPERAJE	
		Media	Dev std
Celda01	84	27.7500000	8.1917899
Celda02	84	46.4523810	16.9431400
Celda03	84	24.3690476	8.4322670

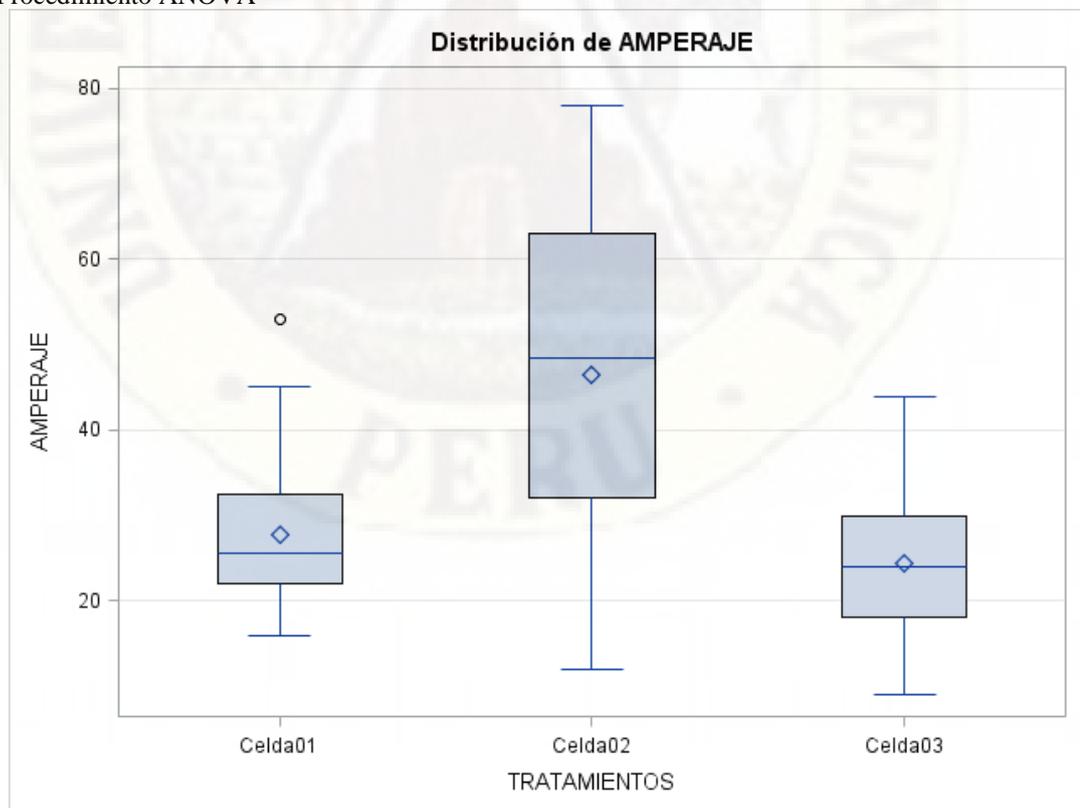
Sistema SAS

Procedimiento ANOVA

**Test de Levene para homogeneidad de la varianza AMPERAJE**  
**ANOVA de las desviaciones cuadradas de las medias de grupo**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
TRATAMIENTOS	2	2598194	1299097	43.84	<.0001
Error	249	7378498	29632.5		

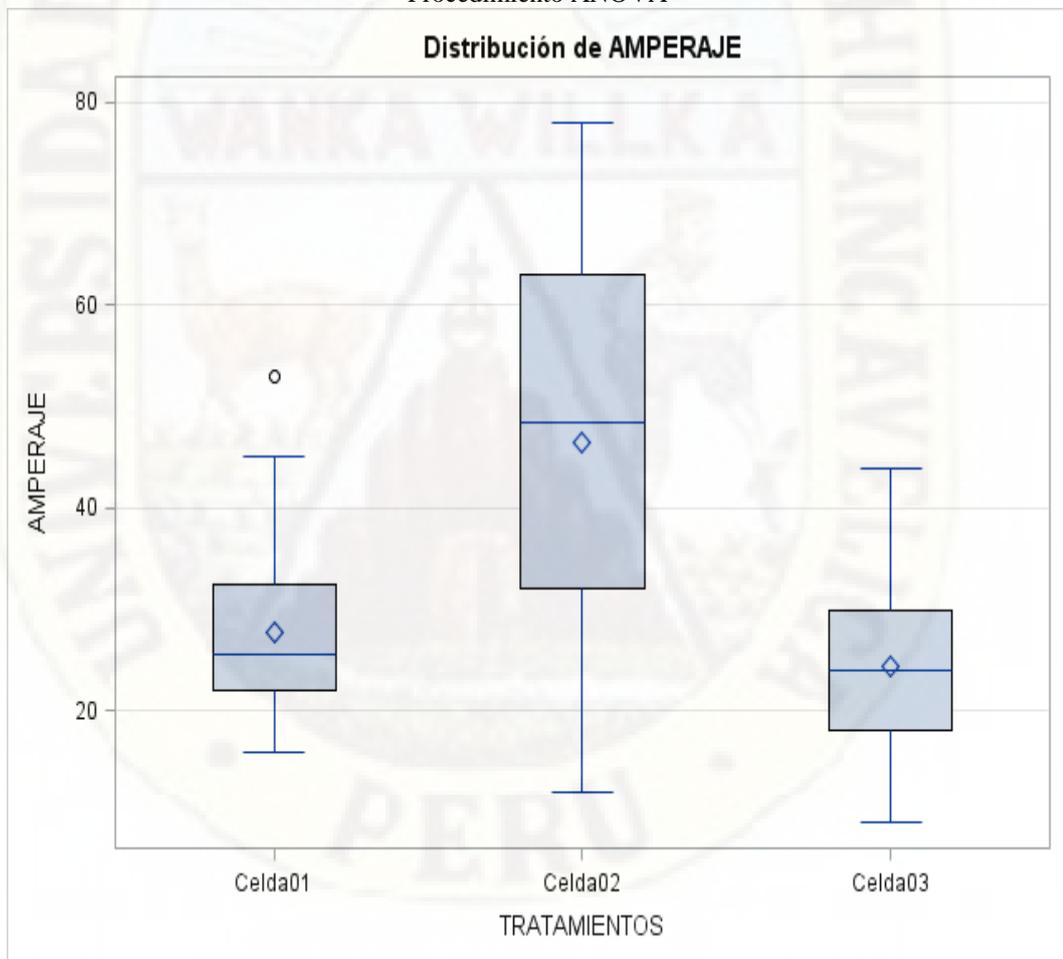
Procedimiento ANOVA



Nivel de TRATAMIENTOS	N	AMPERAJE	
		Media	Dev std
Celda01	84	27.7500000	8.1917899
Celda02	84	46.4523810	16.9431400
Celda03	84	24.3690476	8.4322670

Sistema SAS

Procedimiento ANOVA



Procedimiento ANOVA

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para AMPERAJE

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

<b>Alpha</b>	0.05
<b>Grados de error de libertad</b>	249
<b>Error de cuadrado medio</b>	141.7595
<b>Valor crítico del rango estudentizado</b>	3.33446
<b>Diferencia significativa mínima</b>	4.3317

**Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.**

<b>Tukey Agrupamiento</b>	<b>Media</b>	<b>N</b>	<b>TRATAMIENTOS</b>
A	46.452	84	Celda02
B	27.750	84	Celda01
B			
B	24.369	84	Celda03

**DATA ZUNIGAMATAMOROS;**

**INPUT TRATAMIENTOS \$ REPET CONDUCTIVIDAD\_ELECTRICA@@;**

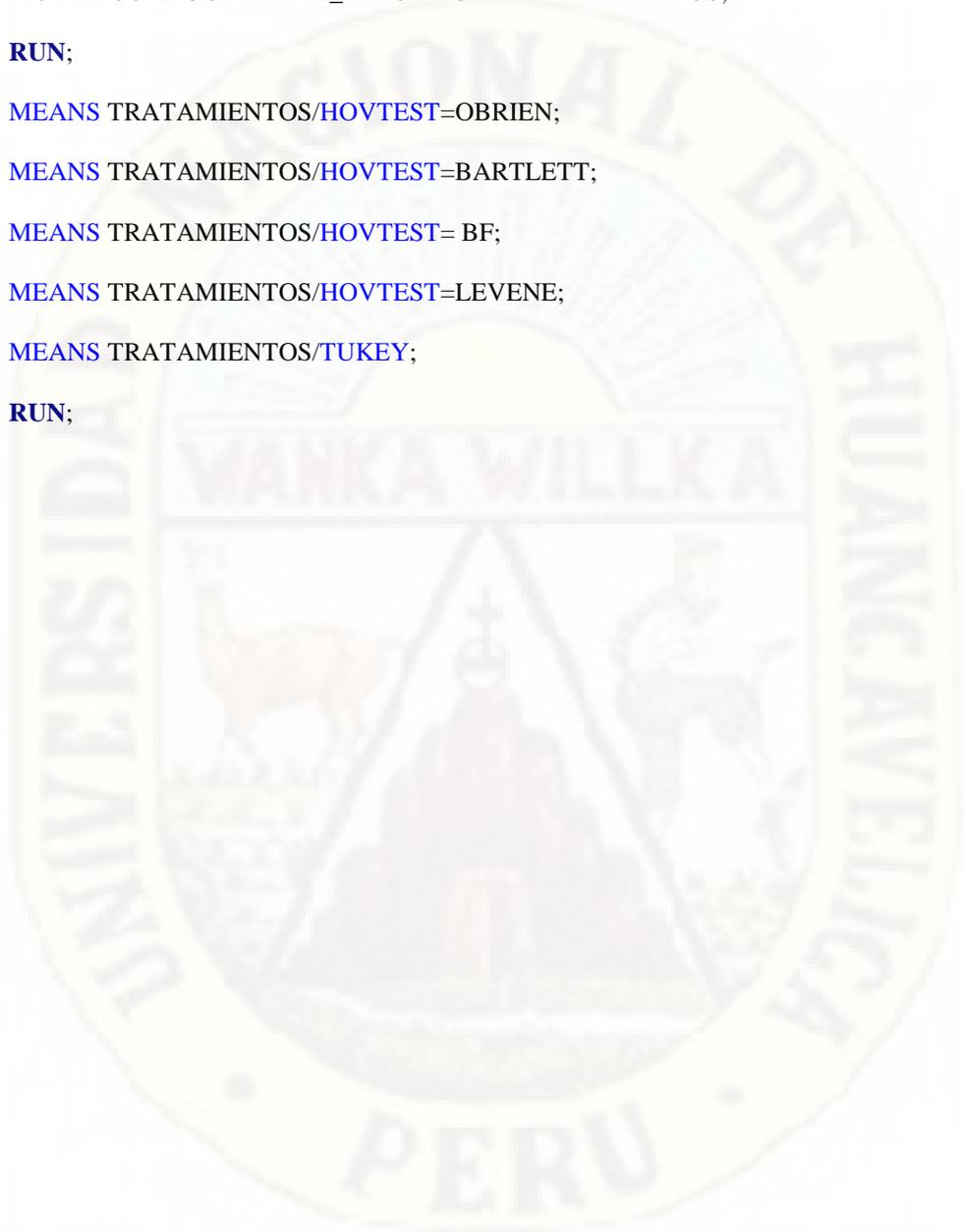
**CARDS;**

Celda_01 1	715.14	Celda_02 1	744.65	Celda_03 1	751.18
Celda_01 2	751.88	Celda_02 2	751.48	Celda_03 2	751.48
Celda_01 3	764.48	Celda_02 3	756.48	Celda_03 3	715.18
Celda_01 4	764.00	Celda_02 4	774.00	Celda_03 4	763.00
Celda_01 5	761.00	Celda_02 5	772.00	Celda_03 5	789.00
Celda_01 6	758.00	Celda_02 6	759.00	Celda_03 6	789.00
Celda_01 7	742.00	Celda_02 7	754.00	Celda_03 7	775.00
Celda_01 8	764.00	Celda_02 8	751.00	Celda_03 8	784.00
Celda_01 9	745.00	Celda_02 9	744.00	Celda_03 9	778.00
Celda_01 10	741.00	Celda_02 10	732.00	Celda_03 10	760.00
Celda_01 11	741.00	Celda_02 11	701.00	Celda_03 11	786.00
Celda_01 12	726.00	Celda_02 12	722.00	Celda_03 12	777.00
Celda_01 13	727.00	Celda_02 13	747.00	Celda_03 13	775.00
Celda_01 14	723.00	Celda_02 14	634.00	Celda_03 14	766.00
Celda_01 15	615.00	Celda_02 15	615.00	Celda_03 15	714.00
Celda_01 16	709.00	Celda_02 16	666.00	Celda_03 16	746.00
Celda_01 17	703.00	Celda_02 17	668.00	Celda_03 17	752.00
Celda_01 18	643.00	Celda_02 18	668.00	Celda_03 18	742.00
Celda_01 19	701.00	Celda_02 19	669.00	Celda_03 19	753.00
Celda_01 20	698.00	Celda_02 20	630.00	Celda_03 20	720.00
Celda_01 21	677.00	Celda_02 21	665.00	Celda_03 21	743.00
Celda_01 22	672.00	Celda_02 22	662.00	Celda_03 22	746.00
Celda_01 23	657.00	Celda_02 23	653.00	Celda_03 23	728.00
Celda_01 24	649.00	Celda_02 24	656.00	Celda_03 24	723.00
Celda_01 25	639.00	Celda_02 25	653.00	Celda_03 25	719.00
Celda_01 26	638.00	Celda_02 26	649.00	Celda_03 26	729.00

Celda_01 27	626.00	Celda_02 27	650.00	Celda_03 27	723.30
Celda_01 28	626.00	Celda_02 28	642.00	Celda_03 28	720.00
Celda_01 29	620.00	Celda_02 29	630.00	Celda_03 29	720.00
Celda_01 30	621.00	Celda_02 30	665.00	Celda_03 30	743.00
Celda_01 31	622.00	Celda_02 31	662.00	Celda_03 31	746.00
Celda_01 32	619.00	Celda_02 32	653.00	Celda_03 32	728.00
Celda_01 33	619.00	Celda_02 33	656.00	Celda_03 33	723.00
Celda_01 34	615.00	Celda_02 34	653.00	Celda_03 34	719.00
Celda_01 35	615.00	Celda_02 35	649.00	Celda_03 35	729.00
Celda_01 36	613.00	Celda_02 36	650.00	Celda_03 36	723.30
Celda_01 37	613.00	Celda_02 37	642.00	Celda_03 37	720.00
Celda_01 38	698.00	Celda_02 38	630.00	Celda_03 38	720.00
Celda_01 39	677.00	Celda_02 39	665.00	Celda_03 39	743.00
Celda_01 40	672.00	Celda_02 40	662.00	Celda_03 40	746.00
Celda_01 41	657.00	Celda_02 41	653.00	Celda_03 41	728.00
Celda_01 42	649.00	Celda_02 42	656.00	Celda_03 42	723.00
Celda_01 43	639.00	Celda_02 43	653.00	Celda_03 43	719.00
Celda_01 44	638.00	Celda_02 44	649.00	Celda_03 44	729.00
Celda_01 45	626.00	Celda_02 45	650.00	Celda_03 45	723.30
Celda_01 46	626.00	Celda_02 46	642.00	Celda_03 46	720.00
Celda_01 47	698.00	Celda_02 47	630.00	Celda_03 47	720.00
Celda_01 48	677.00	Celda_02 48	665.00	Celda_03 48	743.00
Celda_01 49	672.00	Celda_02 49	662.00	Celda_03 49	746.00
Celda_01 50	657.00	Celda_02 50	653.00	Celda_03 50	728.00
Celda_01 51	649.00	Celda_02 51	656.00	Celda_03 51	723.00
Celda_01 52	639.00	Celda_02 52	653.00	Celda_03 52	719.00
Celda_01 53	638.00	Celda_02 53	649.00	Celda_03 53	729.00
Celda_01 54	626.00	Celda_02 54	650.00	Celda_03 54	723.30
Celda_01 55	626.00	Celda_02 55	642.00	Celda_03 55	720.00

Celda_01 56	625.00	Celda_02 56	630.00	Celda_03 56	720.00
Celda_01 57	624.00	Celda_02 57	665.00	Celda_03 57	743.00
Celda_01 58	623.00	Celda_02 58	662.00	Celda_03 58	746.00
Celda_01 59	622.00	Celda_02 59	653.00	Celda_03 59	728.00
Celda_01 60	623.00	Celda_02 60	656.00	Celda_03 60	723.00
Celda_01 61	622.00	Celda_02 61	653.00	Celda_03 61	719.00
Celda_01 62	621.00	Celda_02 62	649.00	Celda_03 62	729.00
Celda_01 63	620.00	Celda_02 63	650.00	Celda_03 63	723.30
Celda_01 64	620.00	Celda_02 64	642.00	Celda_03 64	720.00
Celda_01 65	618.00	Celda_02 65	630.00	Celda_03 65	720.00
Celda_01 66	612.00	Celda_02 66	665.00	Celda_03 66	743.00
Celda_01 67	606.00	Celda_02 67	662.00	Celda_03 67	746.00
Celda_01 68	600.00	Celda_02 68	653.00	Celda_03 68	728.00
Celda_01 69	594.00	Celda_02 69	656.00	Celda_03 69	723.00
Celda_01 70	588.00	Celda_02 70	653.00	Celda_03 70	719.00
Celda_01 71	582.00	Celda_02 71	649.00	Celda_03 71	729.00
Celda_01 72	576.00	Celda_02 72	650.00	Celda_03 72	723.30
Celda_01 73	570.00	Celda_02 73	642.00	Celda_03 73	720.00
Celda_01 74	564.00	Celda_02 74	630.00	Celda_03 74	720.00
Celda_01 75	558.00	Celda_02 75	665.00	Celda_03 75	743.00
Celda_01 76	552.00	Celda_02 76	630.00	Celda_03 76	720.00
Celda_01 77	546.00	Celda_02 77	665.00	Celda_03 77	743.00
Celda_01 78	540.00	Celda_02 78	662.00	Celda_03 78	746.00
Celda_01 79	534.00	Celda_02 79	653.00	Celda_03 79	728.00
Celda_01 80	528.00	Celda_02 80	656.00	Celda_03 80	723.00
Celda_01 81	522.00	Celda_02 81	653.00	Celda_03 81	719.00
Celda_01 82	516.00	Celda_02 82	649.00	Celda_03 82	729.00
Celda_01 83	510.00	Celda_02 83	650.00	Celda_03 83	723.30
Celda_01 84	504.00	Celda_02 84	642.00	Celda_03 84	720.00

```
PROC ANOVA DATA = ZUNIGAMATAMOROS;  
CLASS TRATAMIENTOS;  
MODEL CONDUCTIVIDAD_ELECTRICA = TRATAMIENTOS;  
RUN;  
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=OBRIEN;  
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=BARTLETT;  
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST= BF;  
MEANS TRATAMIENTOS/HOVTEST=LEVENE;  
MEANS TRATAMIENTOS/TUKEY;  
RUN;
```



Sistema SAS

Procedimiento ANOVA

**Información de nivel de clase**

Clase	Niveles	Valores
TRATAMIENTOS	3	Celda_01 Celda_02 Celda_03

**Número de observaciones leídas** 252

**Número de observaciones usadas** 252

Sistema SAS

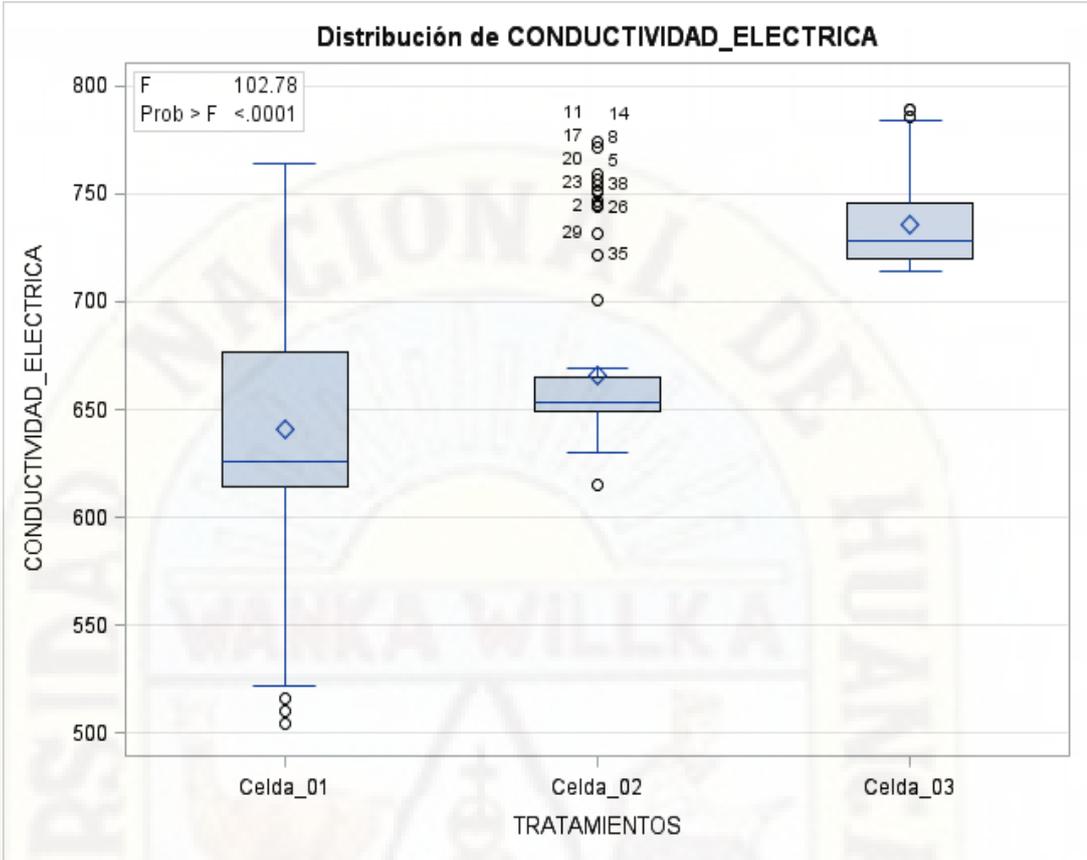
Procedimiento ANOVA

Variable dependiente: CONDUCTIVIDAD\_ELECTRICA

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
<b>Modelo</b>	2	405682.8659	202841.4330	102.78	<.0001
<b>Error</b>	249	491409.2776	1973.5312		
<b>Total corregido</b>	251	897092.1435			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	CONDUCTIVIDAD_ELECTRICA	Media
0.452220	6.525769	44.42444		680.7542

Fuente	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
<b>TRATAMIENTOS</b>	2	405682.8659	202841.4330	102.78	<.0001



Sistema SAS

Procedimiento ANOVA

**Test de O'Brien para homogeneidad de la varianza**

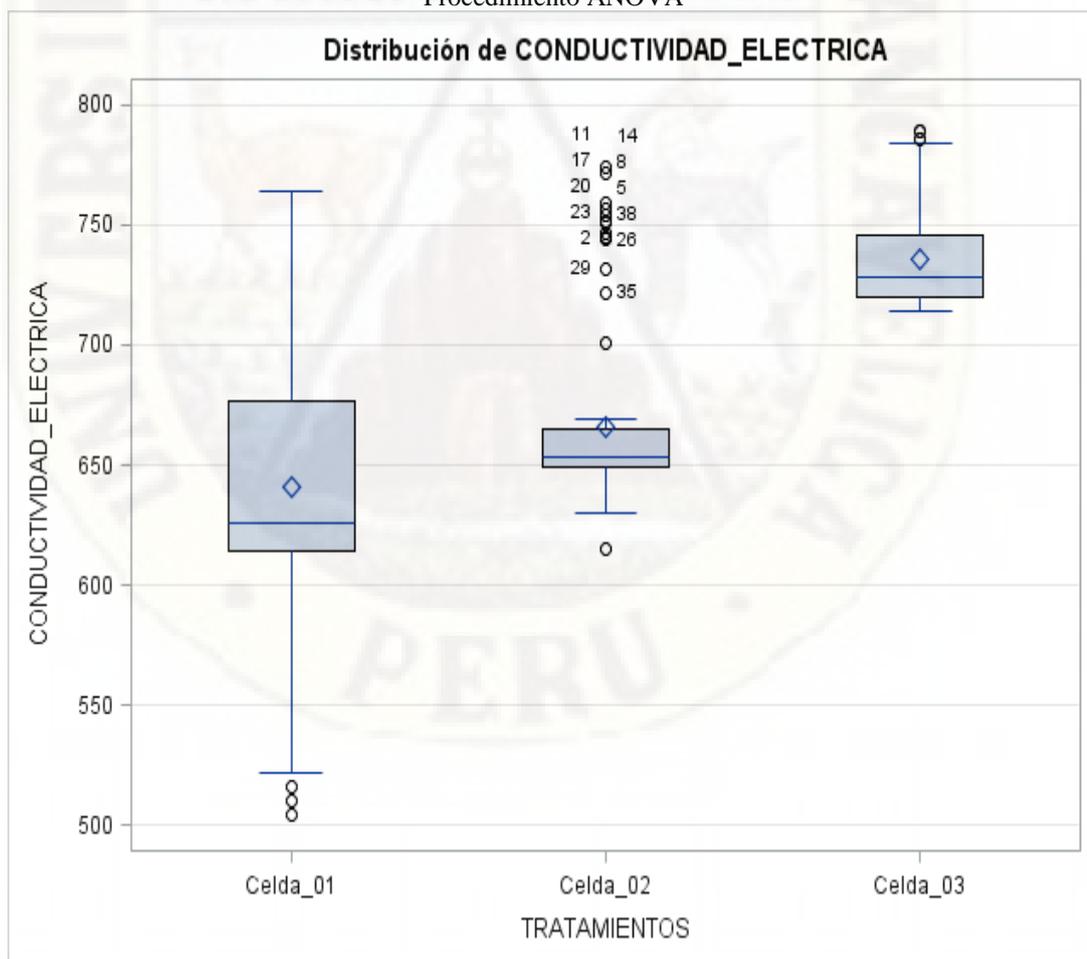
**CONDUCTIVIDAD\_ELECTRICA**

ANOVA de variable de extensión de O'Brien,  $W = 0.5$

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
TRATAMIENTOS	2	6.4674E8	3.2337E8	26.57	<.0001
Error	249	3.031E9	12172536		

Sistema SAS

Procedimiento ANOVA



Nivel de TRATAMIENTOS	N	Media	Dev std
Celda_01	84	640.684524	64.5261752
Celda_02	84	665.995357	37.1584496
Celda_03	84	735.582619	19.3962895

Sistema SAS

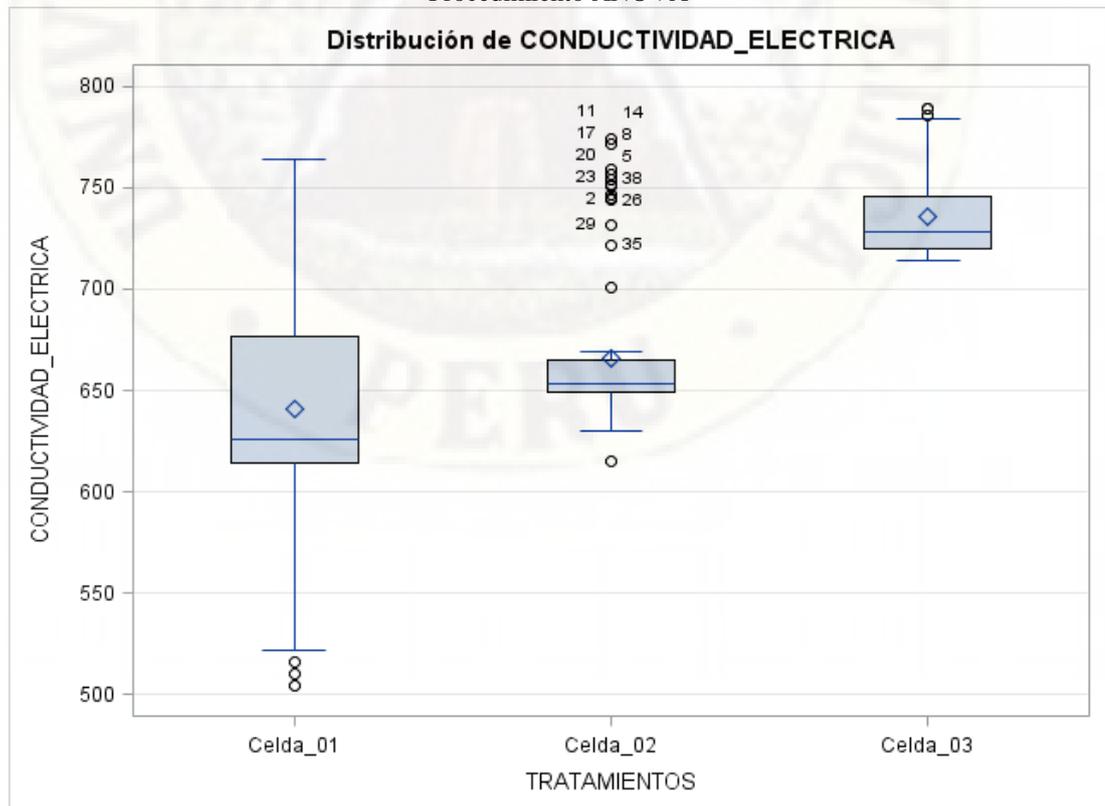
Procedimiento ANOVA

**Test de Bartlett para la homogeneidad de la varianza CONDUCTIVIDAD\_ELECTRICA**

Fuente	DF	Chi-cuadrado	Pr > ChiSq
TRATAMIENTOS	2	104.7	<.0001

Sistema SAS

Procedimiento ANOVA



<b>Nivel de TRATAMIENTOS</b>	<b>N</b>	<b>CONDUCTIVIDAD_ELECTRICA</b>	
		<b>Media</b>	<b>Dev std</b>
<b>Celda_01</b>	<b>84</b>	640.684524	4.5261752
<b>Celda_02</b>	<b>84</b>	665.995357	7.1584496
<b>Celda_03</b>	<b>84</b>	735.582619	9.3962895

Sistema SAS

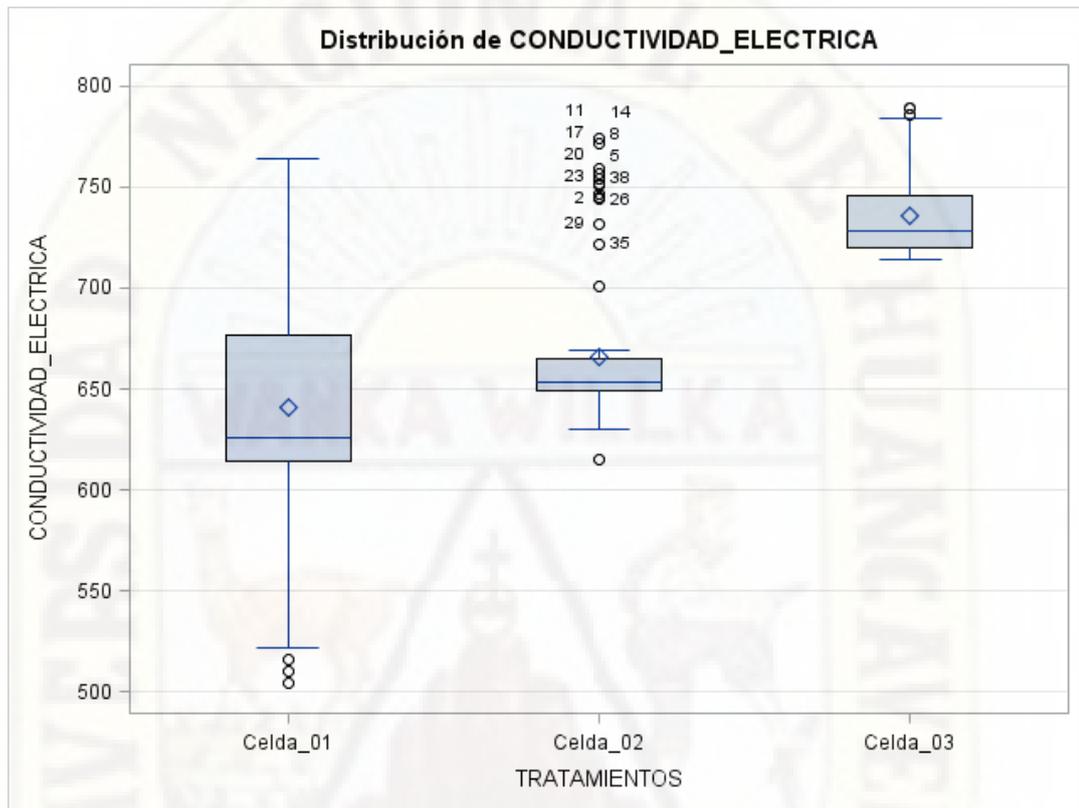
Procedimiento ANOVA

**Test Brown y Forsythe para la homogeneidad de la varianza  
CONDUCTIVIDAD\_ELECTRICA**

**ANOVA de desviaciones absolutas de las medianas de grupo**

<b>Fuente</b>	<b>DF</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado de la media</b>	<b>F-Valor</b>	<b>Pr &gt; F</b>
<b>TRATAMIENTOS</b>	2	54745.7	27372.8	24.87	<.0001
<b>Error</b>	249	274007	1100.4		

Procedimiento ANOVA



Nivel de TRATAMIENTOS	N	CONDUCTIVIDAD_ELECTRICA	
		Media	Dev std
Celda_01	84	640.684524	4.5261752
Celda_02	84	665.995357	7.1584496
Celda_03	84	735.582619	9.3962895

Sistema SAS

Procedimiento ANOVA

**Test de Levene para homogeneidad de la varianza**

**CONDUCTIVIDAD\_ELECTRICA**

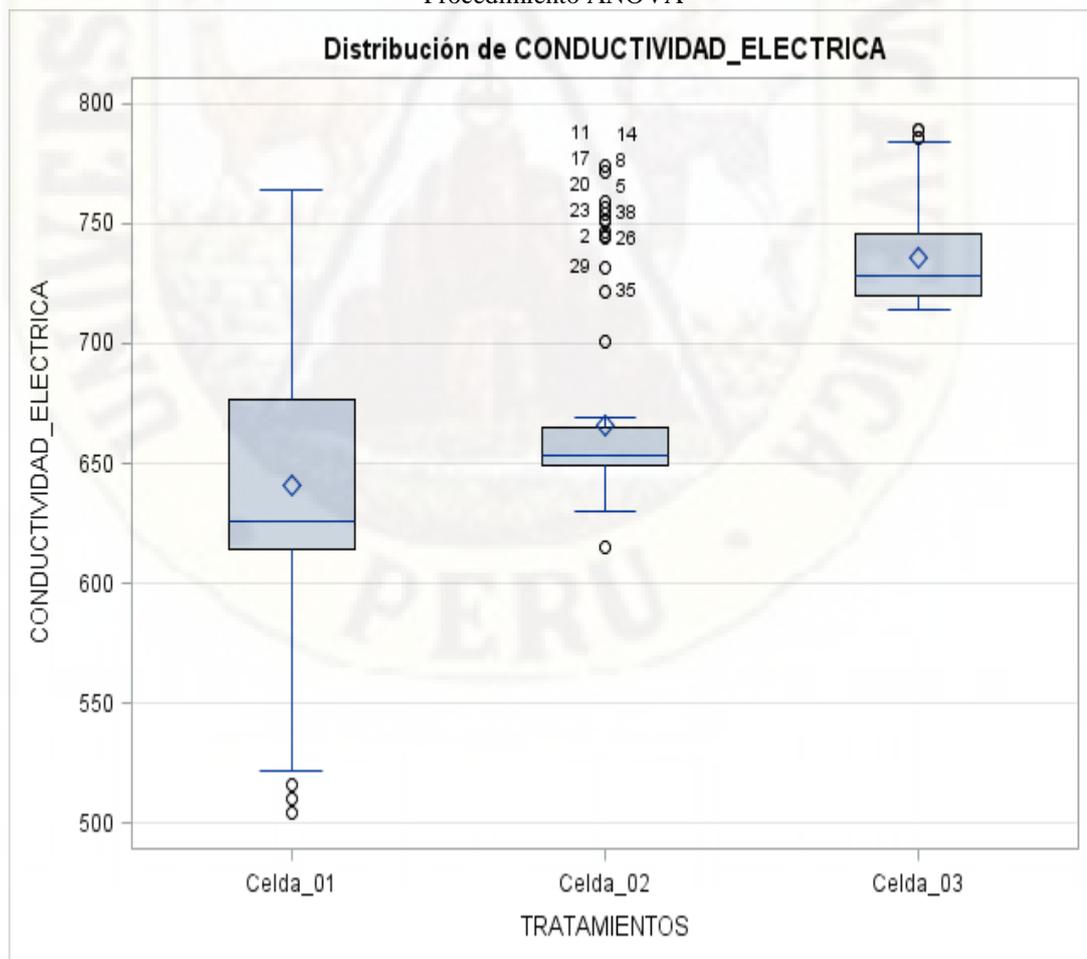
**ANOVA de las desviaciones cuadradas de las medias de grupo**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
TRATAMIENTOS	2	6.3144E8	3.1572E8	26.89	<.0001
Error	249	2.9235E9	11740822		

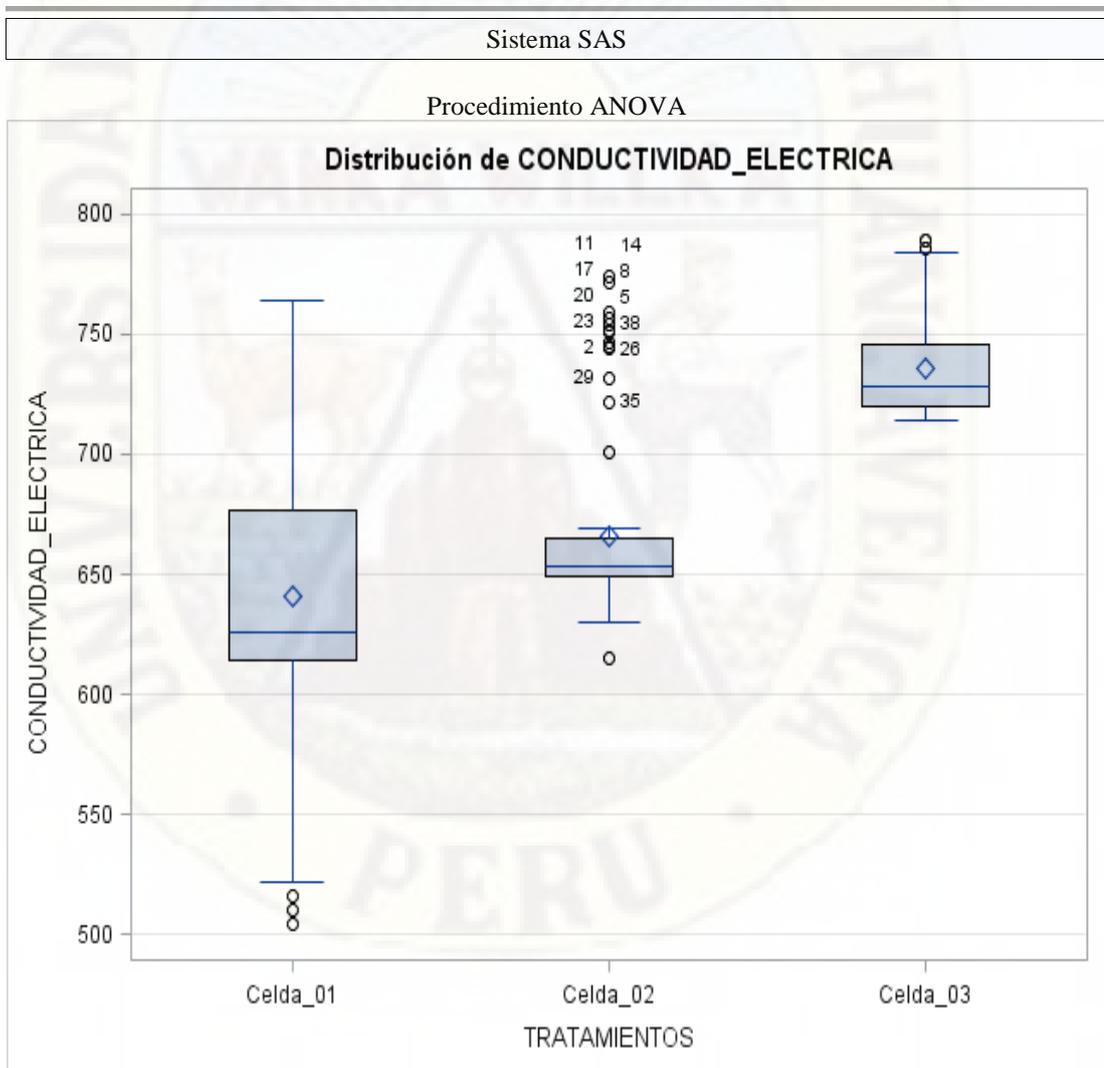
Sistema SAS

Procedimiento ANOVA

**Distribución de CONDUCTIVIDAD\_ELECTRICA**



Nivel de TRATAMIENTOS	N	Media	Dev std
Celda_01	84	640.684524	4.5261752
Celda_02	84	665.995357	7.1584496
Celda_03	84	735.582619	9.3962895



Sistema SAS

Procedimiento ANOVA

Prueba del rango estudentizado de Tukey (HSD) para CONDUCTIVIDAD\_ELECTRICA

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

<b>Alpha</b>	0.05
<b>Grados de error de libertad</b>	249
<b>Error de cuadrado medio</b>	1973.531
<b>Valor crítico del rango estudentizado</b>	3.33446
<b>Diferencia significativa mínima</b>	16.162

**Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.**

<b>Tukey Agrupamiento</b>	<b>Media</b>	<b>N</b>	<b>TRATAMIENTOS</b>
A	735.583	84	Celda_03
B	665.995	84	Celda_02
C	640.685	84	Celda_01

## Apéndice 4

### Panel fotográfico

**Figura 18**

*Lavado de los materiales de las celdas MFC*



**Figura 19**

*Lavado con detergente de las celdas de MFC*



**Figura 20**

*Lavado de tapas y chupones de celdas MFC*



**Figura 21**

*Lavado del puente de intercambio de las celdas de MFC*



**Figura 22**  
*Segunda lavada de las celdas de MFC*



**Figura 23**  
*Enjuagado de las celdas de MFC*



**Figura 24**  
*Oreado de los materiales*



**Figura 25**  
*Secado de las celdas de MFC*



**Figura 26**  
*Lavado de roscas*



**Figura 27**  
*Lavado del puente de cambio catiónico*



**Figura 2**  
*Oreado de tapas*



**Figura 29**  
*Oreado de materiales*



**Figura 30**  
*Construcción de las celdas de MFC*



**Figura 31**  
*Esterilización de las celdas*



**Figura 32**  
*Esterilización de tapas*



**Figura 33**  
*Esterilización de chupones*



**Figura 34**

*Secado en estufa a 65 ° por 2 horas*



**Figura 35**

*Proceso de secado de tapas y chupones*



**Figura 36**  
*Proceso de secado*



**Figura 37**  
*Proceso de monitoreo de las dos celdas anódica y catódica*



**Figura 38**  
*Monitoreo de las lecturas de amperaje*



**Figura 39**  
*lectura de las muestras de conductividad eléctrica*



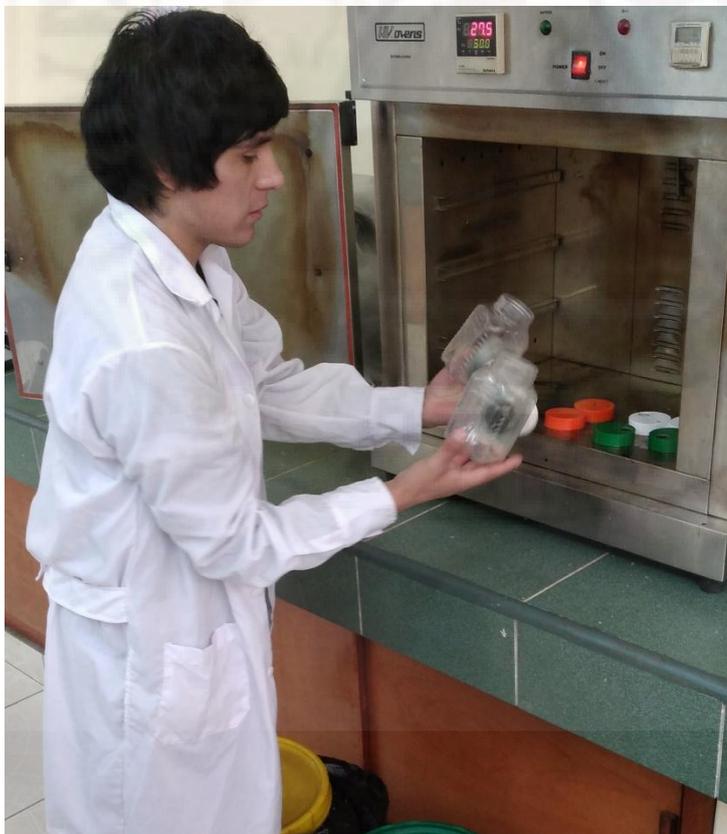
**Figura 40**

*Equipo para producir oxígeno en cámara anódica*



**Figura 41**

*proceso de pre prueba*



**Figura 42**  
*proceso de monitoreo de las muestras*



**Figura 43**  
*lavado y enjuague para la adaptación*



**Figura 44**  
*oxigenación de las cámaras*



**Figura 45**  
*proceso de instalado de las celdas de MFC*



**Figura 46**

*Proceso de monitoreo de las celdas de MFC*



**Figura 47**

*Proceso final para la colección de los datos de amperaje y conductividad eléctrica*

