

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS - INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS

**EVALUACIÓN DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD Y REMOCIÓN DE
MATERIA ORGÁNICA EN CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANA
EN AGUAS RESIDUALES DE CAMAL**

PRESENTADA POR:

MARLENI YOVANNA VALENCIA PACHO

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAGISTER SCIENTIAE EN: INGENIERÍA QUÍMICA

PUNO, PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS - INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS

**EVALUACIÓN DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD Y REMOCIÓN DE
MATERIA ORGÁNICA EN CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANA
EN AGUAS RESIDUALES DE CAMAL**

PRESENTADA POR:

MARLENI YOVANNA VALENCIA PACHO

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

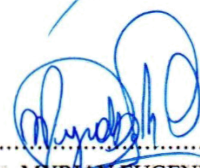
MAGISTER SCIENTIAE EN INGENIERÍA QUÍMICA

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE


.....
Dr. WALTER ALEJANDRO ZAMALLOA CUBA

PRIMER MIEMBRO


.....
Dra. MYRIAN EUGENIA PACHECO TANAKA

SEGUNDO MIEMBRO


.....
Dr. TEÓFILO DONAIRES FLORES

ASESOR DE TESIS


.....
M.Sc. JAMETTE ROSARIO RAMOS PINEDA

AREA: Investigación

Puno, 17 de agosto de 2018

TEMA: Ingeniería Química

LINEA: Ingeniería Química

DEDICATORIA

A Dios por haberme acompañado, durante todas las etapas de mi vida. Por permitirme contar con una familia maravillosa como son mi esposo e hijas, padres, hermanos y amigos, todos ellos muy extraordinarios.

A mi esposo Silverio Flores por su apoyo incondicional y permanente y a mis hermosas hijas Johanna Jazmín y Ammy Anahí por ser consideradas y pacientes.

A mis padres Julián y Juana por haberme dado una formación llena de amor.

A mis hermanos Judith, Luz, Edward, Tania y Helson, por el apoyo y estímulo permanentemente a seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional del Altiplano por la formación académica.
- A la maestría de Ingeniería Química por haberme formado en la especialidad de Ingeniería Química.
- A mi Asesora M Sc. Janette R. Ramos Pineda por el apoyo continuo que fue brindándome durante este proceso de elaboración y ejecución.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco Teórico.....	3
1.1.1 Tecnología de celdas de combustible microbiana	3
1.1.2 Sustratos en las celdas de combustible	4
1.1.3 Agua residual de camal	5
1.1.4 Bacterias generadoras de energía eléctrica.....	5
1.1.5 Fundamentos en la generación de voltaje en celdas de combustible microbiana (CCM)	6
1.1.5.1 Termodinámica y fuerza electromotriz.....	6
1.1.5.2 Voltaje de circuito abierto (VCA)	7
1.1.5.3 Factores que afectan en las pérdidas de voltaje	7
1.1.6 Influencia de las condiciones de operación de la celda de combustible microbiana.....	8
1.1.6.1 Temperatura.....	8
1.1.7 Rendimiento de la celda de combustible microbiana.....	8
1.1.7.1 Corriente	8
1.1.7.2 Potencia.....	9
1.1.7.3 Densidad de potencia (DP)	9
1.1.7.4 La eficiencia coulombica (ϵ_c)	9
1.1.7.5 Eficacia de remoción de DQO (ϵ_r)	10
1.2 Antecedentes	10

CAPÍTULO II**PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

2.1	Identificación del problema	13
2.2	Enunciados del problema.....	14
2.3	Justificación	14
2.4	Objetivos.....	15
2.4.1	Objetivo general.....	15
2.4.2	Objetivos específicos	15
2.5	Hipótesis	16
2.5.1	Hipótesis general.....	16
2.5.2	Hipótesis específicas	16

CAPÍTULO III**MATERIALES Y MÉTODOS**

3.1	Lugar de estudio.....	17
3.2	Población	17
3.3	Muestra	17
3.4	Métodos	18
3.5	Descripción detallada de método por objetivos específicos	18
3.5.1	Descripción de variables analizadas en los objetivos específicos	18
3.5.2	Descripción detallada del uso de materiales, equipos, instrumentos e insumos	19
3.5.2.1	Objetivo específico 1	19
3.5.2.1.1	Acondicionamiento de las celdas de combustible microbiana	21
3.5.2.1.2	Inoculación y operación de las celdas de combustible microbiana	22
3.5.2.1.3	Análisis del funcionamiento de las celdas de combustible microbiana en la variación de concentración	22
3.5.2.2	Objetivo específico 2.....	23
3.5.2.2.1	Acondicionamiento de las CCM para las diferentes temperaturas.....	25
3.5.2.2.2	Inoculación y operación de la celda de combustible microbiana	26

3.5.3 Aplicación de Prueba estadística Inferencial.....	28
---	----

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Influencia de la concentración de sustratos (DQO) en la generación de electricidad.	33
4.1.1 Análisis de los resultados para la variación de concentración	35
4.1.2 Análisis estadístico inferencial para la eficiencia coulombica a diferentes concentraciones	36
4.1.3 Prueba de Hipótesis para Eficiencia coulombica.....	38
4.2 Influencia de la temperatura en la generación de energía eléctrica y remoción de la materia orgánica	40
4.2.1 Análisis estadístico inferencial – Eficiencia coulombica y eficiencia de remoción a diferentes temperaturas.....	49
4.2.2 Prueba de Hipótesis para eficiencia coulombica	52
4.2.3 Prueba de Hipótesis para DQO (Eficiencia de remoción).....	57
4.3 Discusión	62
CONCLUSIONES	63
RECOMENDACIONES	65
BIBLIOGRAFÍA	66
ANEXOS	70

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Límites máximos permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de planta de camales y plantas de beneficio.	5
2. Descripción de variables analizadas.....	18
3. Diseño experimental cuadrados latino eficiencia coulombica en función a concentración.	28
4. Análisis de varianza con aplicación de la prueba F.....	29
5. Diseño de experimentos cuadrados latinos para diferentes temperaturas	30
6. Croquis de campo.....	30
7. Adicional para los Tratamientos	31
8. Análisis de varianza.....	32
9. Eficacia coulombica en función de las concentraciones.....	33
10. Voltaje y corriente por área en función a la resistencia externa DQO (1980, 2400, 3200).....	34
11. Diseño experimental cuadrados latinos para análisis de ANOVA y contrastación de Hipótesis.	36
12. Análisis de varianza para eficiencia coulombica- suma de cuadrados tipo III	36
13. Pruebas de múltiples rangos para la eficiencia coulombica por concentración (DQO)	37
14. Contraste de significancia de las muestras (eficiencia coulombica)	37
15. Resumen estadístico para la eficiencia coulombica	38
16. Voltaje y corriente por área en función a la resistencia externa para DQO 1980 mg/L a T-8 °C; T-15 °C, T-25 °C	43
17. Voltaje y corriente por área en función de la resistencia externa para DQO 2400 mg/L a T-8 °C; T-15 °C y T-25 °C	43
18. Voltaje y corriente por área en función de la resistencia externa para DQO 3200 mg/L a T-8 °C; T-15 °C y T-25 °C.	44
19. Eficiencia de remoción y Eficiencia coulombica.....	49
20. Diseño experimental cuadrados latinos para la eficacia coulombica y eficacia de remoción.	49
21. Análisis de Varianza para efecto de la temperatura y concentración en la eficiencia coulombica- suma de cuadrados de tipo III.....	50

22. Resumen estadístico eficiencia coulombica en función de la temperatura.....	52
23. Análisis de Varianza DQO (eficiencia de remoción) – Suma de cuadrados Tipo III54	
24. Pruebas de Múltiple Rangos para DQO (eficiencia de remoción) por Temperatura (Método: 95.0 porcentaje LSD)	55
25. Contraste de significancia de las muestras (remoción de concentraciones)	55
26. Resumen estadístico para DQO (eficiencia de remoción)	56
27. Resumen Estadístico (Eficiencia coulombica y Eficiencia de Remoción)	60
28 Correlación de eficiencia Coulombica y eficiencia de remoción	61

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Crecimiento voltaje versus días de funcionamiento de las celdas de combustible microbiana.	34
2. Voltaje y corriente por área en función de una resistencia externa variable a concentración inicial de 1980, 2400, 3200 mg/L (DQO).	35
3. Dispersión de la eficacia coulombica	39
4. Caja y bigotes en la eficiencia coulombica.....	40
5. Crecimiento del voltaje a temperaturas de 8 °C, 15 °C y 25 °C para una concentración inicial de 1980 mg/L de DQO.....	41
6. Crecimiento del voltaje a temperaturas de 8 °C, 15 °C y 25 °C para concentración inicial de 2400 mg/L de DQO.....	41
7. Crecimiento de voltaje a temperaturas 8 °C, 15 °C y 25 °C para concentración de 3200 mg/L de DQO.....	42
8. Voltaje y corriente por área en función de la resistencia externa a T-8 °C para la concentración inicial de 1980 mg/L de DQO	44
9. Voltaje y corriente por área en función de una resistencia externa variable a T-15 °C para la concentración inicial de 1980 mg de DQO	45
10. Voltaje y corriente por área en función de una resistencia externa variable a T-25 °C para la concentración inicial de 1980 mg/L de DQO.....	45
11. Voltaje y corriente por área en función de una resistencia externa variable a T-8 °C para la concentración inicial de 2400 mg/L de DQO.....	46
12. Voltaje y corriente por área en función de una resistencia externa variable a T-15 °C para la concentración inicial de 2400 mg/L de DQO.....	46
13. Voltaje y corriente por área en función de una resistencia externa variable a T-25 °C para la concentración inicial de 2400 mg/L de DQO.....	47
14. Voltaje y corriente por área en función de una resistencia externa variable a T-8 °C para la concentración inicial de 3200 mg/L de DQO.....	47
15. Voltaje y corriente por área en función de una resistencia externa variable a T-15 °C para la concentración inicial de 3200 mg/L de DQO.....	48
16. Voltaje y corriente por área en función de una resistencia externa variable a T-25 °C para la concentración inicial de 3200 mg/L de DQO.....	48
17. Dispersión por código de nivel eficiencia coulombica y temperatura.....	51

18. Anova eficiencia coulombica.....	51
19. Dispersión eficiencia Coulombica – Temperatura	53
20. Caja y bigotes Eficiencia coulombica – Temperatura	54
21. ANOVA para DQO eficiencia de remoción.	56
22. Dispersión por código de nivel eficiencia de remoción y temperatura	56
23. Dispersión (eficiencia de remoción).....	59
24. Caja y bigotes (eficiencia de remoción)	59
25. Caja y bigotes eficiencia coulombica versus eficiencia de remoción	61
26. Matraces Erlenmeyers acondicionados como CCM.....	71
27 Electrodo de grafito preparados para su uso.....	71
28. Punto donde se tomarón las muestra de agua residual del camal de Azogue	72
29. Preparación del puente salino y acondicionamiento al tubo en U.....	72
30. Preparación de las muestras de agua residual e inoculación en el ánodo de la CCM	73
31. Funcionamiento de las CCM en el proceso de experimentación	74

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1. Evidencias fotografias	71

RESUMEN

El presente trabajo de investigación evaluó la generación de energía eléctrica y remoción de materia orgánica en las celdas de combustible microbiana (CCM), por intervención de la actividad catalítica como potencial de oxidación de materia orgánica e inorgánica, a partir de las aguas residuales de camal Azoguine, con la evaluación de la influencia de la concentración de sustratos del agua residual y la determinación de la temperatura óptima en generación de energía eléctrica y remoción de materia orgánica, utilizando un prototipo de CCM, conformado por dos celdas ánodo y cátodo, acondicionando un puente salino, volumen de sustrato 250 mL, en el ánodo y cátodo, electrodos de grafito con un área de $6,66 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. Con muestras iniciales que variaron de 1980 – 3200 mg/L en demanda química de oxígeno (DQO), alcanzando eficiencia coulombica de 18 a 21% y de las temperaturas de 8, 15 y 25 °C se obtuvo eficiencias coulombicas de 18% -70% con corriente por área, máxima alcanzada de 11,2 – 21,44 mA/m²; siendo la temperatura de 25 °C que obtuvo mejores resultados y eficiencia en remoción de DQO de 79,8 - 93%. La generación de energía eléctrica, se vio afectada por la concentración de la demanda química de oxígeno (DQO), del agua residual de camal, a estas condiciones ambientales. Sin embargo, en temperaturas bajas generan bajas corrientes, y las de temperaturas altas como la de 25 °C, generan corrientes altas y por ende altas eficiencias coulombicas alcanzando el 70% y 93% de remoción de materia orgánica.

Palabras clave: Celdas combustibles microbiana, degradación, DQO, electricidad, mataderos

ABSTRACT

The present research work evaluated the generation of electrical energy and the removal of organic matter in microbial fuel cells (MFC), by intervention of the catalytic activity as a potential for oxidation of organic and inorganic matter, from the “camal de Azoguine” wastewater, with the evaluation of the influence of the concentration of residual water substrates and the determination of the optimum temperature in electric power generation and removal of organic matter, using a prototype of MFC, conformed by two cells anode and cathode, conditioning a salt bridge, 250 mL substrate volume, in the anode and cathode, graphite electrodes with an area of $6,66 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. With initial samples that varied from 1980 - 3200 mg /L in chemical oxygen demand (COD), reaching coulombic efficiency of 18 to 21% and temperatures of 8, 15 and 25 °C coulombic efficiencies of 18% -70% were obtained current per area, maximum reached of 11,2 – 21,44 mA / m²; being the temperature of 25 °C that one obtained wich better results and efficiency in COD removal of 79.8 - 93%. The generation of electrical energy was affected by the concentration of chemical oxygen demand (COD), from 79,8 - 93%. The generation of electrical energy was affected by the concentration of the chemical oxygen demand (COD) of the “camal de Azoguine” wastewater, to these environmental conditions. However, in low temperatures they generate low currents, and high temperatures such as 25 °C, generate high currents and therefore high coulombic efficiencies reaching 70% and 93% a removal of organic matter.

Keywords: COD, electricity, degradation, Microbial fuel cells, slaughterhouses.

INTRODUCCIÓN

Los problemas ambientales relacionados con la disposición de aguas residuales se incrementan sustancialmente, actualmente el tratamiento de aguas residuales no es sostenible para satisfacer las crecientes necesidades de saneamiento básico, A nivel nacional, se vierten aproximadamente 2 217 946 m³ por día de aguas residuales (OEFA, 2017), por la rápida industrialización y crecimiento de la población, las fuentes de agua de desecho son los principales contaminantes en masas de aguas superficiales y subterráneas; tal es el caso de las aguas residuales sin tratamiento en la ciudad de Puno que se vierten es alrededor de 6,356,177 000 m³ por año (SINIA 2017). El camal de Azoguine de la ciudad de Puno, es uno de los aportantes en aguas residuales con alto contenido de sustratos orgánicos, utilizando 340 m³ por mes de agua para el proceso productivo de carne, requiriéndose métodos complejos y costosos para su tratamiento eficiente de estos efluentes. Actualmente no existen tecnologías de tratamientos autónomos, conservadores de energía en el país y la región, tal es, como, el de las celdas de combustible microbiano que generan electricidad a partir de aguas residuales y simultáneamente remueven materia orgánica, lo cual constituye aportar en la línea de investigación de procesos de energías renovables y medio ambiente, cuyo propósito es implementar esta tecnología de celdas de combustible microbiana, en el tratamiento de aguas residuales de los camales, en el que estos constituyan la reducción en costos de operación y mantenimiento para un eficaz tratamiento.

La evaluación de la generación de energía eléctrica fue determinada mediante la eficiencia coulombica en las celdas de combustible microbiana, a partir de diferentes concentraciones de demanda química de oxígeno presentes en las aguas residuales de camal, siendo estas un potencial en cantidad de sustratos y microorganismos que se encargaran de convertir la energía química en energía eléctrica, y a la vez durante este proceso se realiza la remoción de demanda química de oxígeno. Utilizándose un prototipo de celda de combustible microbiana con puente salino, en el ánodo el agua residual de camal para su oxidación y en el cátodo agua para su reducción, interconectándose a electrodos de grafito para la transmisión de voltaje y posteriormente la generación de corriente, del que se determina la eficiencia coulombica y eficacia de remoción de demanda química de oxígeno en las celdas de combustible microbiana.

Este trabajo está estructurado por los conceptos básicos para determinar la corriente eléctrica que generan las CCM y el desempeño de esta, mediante la eficacia coulombica, la metodología usada, los resultados obtenidos y las conclusiones a las que se alcanzaron.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco Teórico

1.1.1 Tecnología de celdas de combustible microbiana

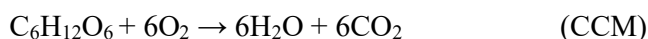
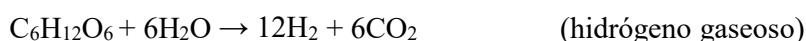
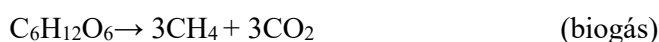
La celda de combustible microbiana (CCM) abarca, conocimientos de diferentes campos científicos y de ingeniería, desde microbiología y electroquímica hasta materiales e ingeniería ambiental (Logan et al., 2006), empleando microorganismos para recuperar la energía eléctrica a partir de la materia orgánica (Zhi, Ge, He, & Zhang, 2014), de diferentes compuestos, incluyendo acetato, lactato y glucosa y aguas residuales, etc., al mismo tiempo que realiza un tratamiento biológico de aguas residuales (Liu, Ramnarayanan, y Logan 2004; Rabaey et al. 2003); se da bajo condiciones adecuadas, en determinadas bacterias electroactivas que pasan los electrones producidos en su actividad metabólica a un electrodo en lugar de un aceptor de electrones (como oxígeno o nitrato tal y como ocurre en los procesos de depuración naturales) (Fernández, Lizcano, & Bravo, 2012), reducen compuestos biodegradables, funcionan con diferentes composiciones de hidratos de carbono, así como en sustratos complejos presentes en las aguas residuales (Rabaey y Verstraete 2005).

Los electrones liberados por los Microorganismos durante el consumo de sustrato orgánico (donadores de electrones) son transferidos desde el ánodo al Cátodo unido por un circuito externo para producir electricidad bajo condiciones anaeróbicas (Mokhtarian et al. 2012). La energía “verde” producida en las CCM es mediante, la explotación de la biomasa contenida en las aguas residuales domésticas,

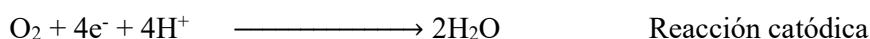
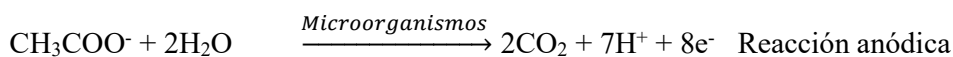
consiguiéndose al mismo tiempo la depuración de las aguas contaminadas (Salar, Ortiz, 2014).

1.1.2 Sustratos en las celdas de combustible

Recurso biológico abundante y fuente potencial de energía limpia, donde las bacterias oxidan sustratos para producir electrones libres, o electricidad (Chang, 2008), A partir de la biomasa orgánica presentes en residuos sólidos y líquidos, se obtienen una variedad de biocombustibles (Logan, 2004; Alzate et al., 2007; He y Angenent., 2006) y subproductos, siendo la glucosa la principal fuente de carbono. Entre las reacciones estequiométricas principales del metabolismo fermentativo microbiológico están:



La producción de corriente en este tipo de sistemas está directamente relacionada con la capacidad de las bacterias para oxidar el sustrato y transferir los electrones generados en el proceso al ánodo. (Salar, Ortiz, Hernandez, Sánchez, & Lozano, 2014). Hay una gran variedad de ellos, desde compuestos puros a mezclas complejas de materia orgánica presente en el agua residual. Entre los más comunes se encuentran la glucosa (Rabaey et al. 2003), y diferentes tipos de agua residual, entre otros. A continuación, se muestra un ejemplo de las reacciones anódicas y catódicas que tienen lugar cuando el sustrato seleccionado es acetato



Sustratos complejos permiten el desarrollo de una comunidad bacteriana muy diversa y electroquímicamente activa, sin embargo, los simples son más fáciles de degradar, aumentando así la producción de electricidad. (Salar et al. 2014).

1.1.3 Agua residual de camal

Los efluentes de los mataderos, contienen: sangre, estiércol, pelo, grasas, huesos, proteínas y otros contaminantes solubles. La composición de los efluentes dependerá del proceso de producción y de los pre-tratamientos en las descargas de cada proceso. Las aguas residuales de matadero tienen un contenido en materia orgánica comprendido entre 1,5 y 2,2 g de DQO/L. En la composición predominan las proteínas y las grasas. La fracción insoluble de las aguas residuales (sólidas y coloides), forman el grueso de la DQO, siendo únicamente el 25% de la DQO materia soluble (Muñoz, 2000).

Tabla 1

Límites máximos permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de planta de camales y plantas de beneficio.

Parámetro	Unidad		Ensayo
pH	-	6-9	APHA 4500-H+ - B, págs. 4-90 a 4-94, 21 ^a edición 2005
Sólidos suspendidos totales	g/l	300	APHA 2540-D, págs. 2-58 a 2-59, 21 ^a edición 2005
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅ , 20°C)	mg/l	250	APHA-AWWA-WEF-5210 B, ED. 21 TH.2005
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	500	EPA 410.2.1999
Fosforo total	mg/l	40	Standard methods for the examination of water and wastewater, 21 ^o Edition SM 4500-P-E. 2005
Nitrógeno total	mg/l	50	Standard Methods for the examination of water and wastewater, Ed. 21 cap. 4500 B B. 2005

Fuente: (Ambiente, 2009)

1.1.4 Bacterias generadoras de energía eléctrica

La gran revolución en el campo de las CCM ha producido, el descubrimiento de microorganismos electrogénicos que son capaces de transferir los electrones al ánodo en ausencia de mediadores redox artificiales (Lovley, 2006). Como la de

Geobacter por la gran versatilidad, para transferir electrones fuera de la célula (flujo exocelular) (Nuñez, 2008), la *Escherichia coli*, siendo una de las bacterias que con determinadas condiciones de pH, temperatura, mediador y material del electrodo, proporcionan un proceso de depuración (biodegradación) y producción de energía eléctrica simultáneamente que busca la disminución en los costos de operación de cualquier planta de tratamiento de aguas residuales (Medina & Zapata, 2017).

1.1.5 Fundamentos en la generación de voltaje en celdas de combustible microbiana (CCM)

1.1.5.1 Termodinámica y fuerza electromotriz

La electricidad se genera en una CCM solo si la reacción global es termodinámicamente favorable. La reacción se puede evaluar en términos de la energía libre de Gibbs expresada en unidades de Joules (J), que es una medida del trabajo máximo que puede derivarse, de la reacción (Logan *et al.* 2006) mediante la siguiente ecuación (Bard & Faulkner, 1944)

$$\Delta G_r = \Delta G_r^0 + RT \ln(\pi) \quad (1)$$

Para los cálculos de CCM, se evalúa la reacción en términos de la fuerza electromotriz total de la celda (fem), E_{cmf} (V), definida como la diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo. Esto está relacionado con el trabajo, W (J), producido por la celda

$$W = E_{fem} Q = -\Delta G_r \quad (2)$$

Donde $Q = nF$ es la carga transferida en la reacción, expresada en Coulomb (C), que está determinada por el número de electrones intercambiados en la reacción, n es el número de electrones por mol de reacción, y F es la constante de Faraday ($9,64853 \times 10^4$ C/mol) (Logan *et al.* 2006).

$$E_{fem} = \frac{\Delta G_r}{nF} \quad (3)$$

La fuerza electromotriz (fem) de la celda se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E_{fem} = E_{cat} - E_{an} \quad (4)$$

1.1.5.2 Voltaje de circuito abierto (VCA)

La fem (V) de la celda es un valor termodinámico que no tiene en cuenta las resistencias internas. La tensión de circuito abierto (VCA) es la tensión de la celda que se puede medir después de un tiempo en ausencia de corriente. Teóricamente, el VCA debería aproximarse a la fem de la celda. En la práctica, sin embargo, el VCA es sustancialmente más bajo que la fem de la celda, debido a diversas pérdidas potenciales. Por lo que la aplicación principal de cálculos termodinámicos no identifica el tamaño y la naturaleza de las pérdidas de energía (Logan et al., 2006).

1.1.5.3 Factores que afectan en las pérdidas de voltaje

El voltaje de la celda medido y la fem de la celda se conoce como sobretensión y es la suma del potencial del ánodo, cátodo, y la pérdida óhmica del sistema.

$$E_{celda} = E_{fem} - (\sum \eta_a + |\sum \eta_c| + IR_{\Omega}) \quad (5)$$

donde $\sum \eta_a$ y $|\sum \eta_c|$ son los sobrepotenciales del ánodo y el cátodo respectivamente, IR_{Ω} es la suma de todas las pérdidas óhmicas que son proporcionales a la corriente generada (I) y la resistencia óhmica del sistema (R_{Ω}). Los sobrepotenciales de los electrodos generalmente dependen de la corriente y en una CCM, a menudo se clasifican como sigue: (i) pérdidas de activación, (ii) pérdidas bacterianas metabólicas y (iii) pérdidas de transporte masivo o de concentración). En las CCM, el voltaje de la celda medido suele ser una función lineal de la corriente (curva de polarización), y puede describirse (Logan *et al.* 2006; Molognoni y Technological 2015; Zhang, Hu, y Lee 2016) como:

$$E_{celda} = VCA - IR_{int} \quad (6)$$

Donde IR_{int} es la suma de pérdidas internas en CCM los cuales son proporcionales a la corriente generada (I) y a la resistencia interna del sistema (R_{int}).

1.1.6 Influencia de las condiciones de operación de la celda de combustible microbiana

1.1.6.1 Temperatura

La temperatura es un parámetro operativo que se utiliza para controlar el crecimiento y el metabolismo de las poblaciones microbianas en la celda de combustible microbiana (CCM). En general, la producción de metano es más sensible a temperaturas altas, que la generación de energía eléctrica. Un incremento de la temperatura del ánodo de 27 a 38 °C incrementa la producción de metano 3 veces; mientras que la calefacción catódica puede tener probablemente un impacto positivo en la producción de bioelectricidad. (Martin, Savadogo, Guiot, & Tartakovsky, 2010). El rendimiento de las celdas de combustible microbiano en el tratamiento de aguas residuales y generación de bioelectricidad varía de acuerdo a la temperatura en el que se encuentre en el proceso anaeróbico, los consorcios anódicos electroactivos son capaces de eliminar eficazmente el DQO (demanda Química de Oxígeno) generando energía a temperaturas tan bajas como 4 ° C (Larrosa-Guerrero et al., 2010)

1.1.7 Rendimiento de la celda de combustible microbiana

El rendimiento eléctrico de una CCM se estudia a partir de las mediciones de voltaje que se realizan en la resistencia externa conectada entre el ánodo y el cátodo y los respectivos cálculos que se derivan de ellas, como la corriente y potencia. Los parámetros que se analizan para evaluar el comportamiento eléctrico de este tipo de dispositivos son: la densidad de potencia (DP), la eficiencia coulombica (€c) (Rismani-Yazdi et al., 2011).

1.1.7.1 Corriente

La corriente originada por una CCM, llega a ser tan baja, que generalmente no se mide, sino que se calcula a partir de la caída de voltaje a través de un resistor, usando entonces la ecuación (Logan *et al.* 2006):

$$I = V/R_{ext} \quad (7)$$

1.1.7.2 Potencia

Para que las CCM sean una metodología de generación de potencia, es esencial el optimizar el sistema para la producción de la misma. La potencia se calcula a partir del voltaje y la corriente (Logan et al. 2006).

$$P = I * V = \frac{V^2}{R_{ext}} \quad (8)$$

Donde: I es la corriente; V es el voltaje y R_{ext} (Ω) es la resistencia externa.

1.1.7.3 Densidad de potencia (DP)

Expresada como la potencia por unidad de área del electrodo anódico, para comparación de producción de potencia de diferentes sistemas, ecuación (10) (Wang, Chen, y Huang 2010), o la potencia por unidad de volumen del sustrato ecuación (11), (Luo et al., 2010), cuando se va a realizar cálculos de ingeniería y costos (Logan et al. 2006), se calculan de las siguientes maneras:

$$P = \frac{IV}{A} = \frac{V^2}{A_{an} R_{ext}} \quad (9)$$

$$P = \frac{IV}{V} \quad (10)$$

Dónde: I es la corriente en amperios, V es el potencial en voltios, A_{an} es el área de la superficie del electrodo anódico en m^2 y V es el volumen del sustrato de la cámara anódica.

1.1.7.4 La eficiencia coulombica (ϵ_c)

Se define como la relación total de coulombs transferidos al ánodo desde el sustrato, al máximo posible de coulombs si toda la eliminación del sustrato produce corriente. Es decir, es un parámetro que permite obtener la fracción de energía eléctrica que se puede generar en la CCM a partir del sustrato. Su medición es importante porque posibilita comparar el desempeño de las CCM. El coulomb total obtenido se determina integrando la corriente a lo largo del tiempo, de modo que la eficiencia de coulomb para

una CCM en modo batch se da: (Logan *et al.* 2006), mediante la siguiente expresión matemática:

$$\epsilon_C = \frac{M \int_0^{t_b} I dt}{F b V_{an} \Delta DQO} \quad (11)$$

Dónde: M= 32, el peso molecular del oxígeno, F es la constante de Faraday (96485 C/mol; b=4 es el número de electrones intercambiados por mol de oxígeno, V_{an} es el volumen de líquido en el compartimento del ánodo y ΔDQO es el cambio DQO sobre el tiempo t_b.

1.1.7.5 Eficacia de remoción de DQO (ε_r)

La eficacia de la remoción se da por la diferencia de la concentración de demanda química de oxígeno al inicio con la demanda química de oxígeno al final sobre la demanda química inicial (Lee, Chen, & Cai, 2010).

$$\% \epsilon_r = \frac{d(DQO_i - DQO_f)}{DQO_i} * 100 \quad (12)$$

1.2 Antecedentes

Gude (2016), Menciona la tecnología microbiana de celdas de combustible puede presentar un medio ambiente sostenible, una ruta para encontrar necesidades de saneamiento del agua. La celda de combustible microbiana se basa en sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante la actividad catalítica de microbios para producir electricidad a partir de la oxidación de compuestos orgánicos, y en algunos casos inorgánico, presentes en aguas residuales urbanas, como: en la lechería agrícola, la comida y las aguas residuales industriales, mediante el potencial para la generación de energía y el tratamiento integral de aguas residuales en celdas microbianas de combustible para proveer tratamiento sostenible y positivo, obteniendo una densidad de potencia de 42 mA/m².

Logroño et al. (2015), Monitorearon la generación de electricidad de bacterias electrogénicas en celdas de combustibles microbianas de cámara simple (CCM), usando electrodos de fibra de carbono, con dos inóculos. De sólidos orgánicos de la región amazónica de Ecuador y el segundo con suelo no intervenido y residuos sólidos orgánicos de la región alto andina de Ecuador.

Mejía, Vásquez, y González (2012), Exponen una familia de bacterias denominadas *Geobacter* que tienen la capacidad de producir energía eléctrica como fuente renovable en una celda de combustible microbiana. Estas bacterias pueden oxidar totalmente compuestos orgánicos empleando diferentes elementos o sustancias como aceptores de electrones. Da a conocer un análisis comparativo de fuentes de energía convencionales y no convencionales con respecto a la familia de bacterias *Geobacter*.

Zhang *et al.* (2015), Dan a conocer que los microorganismos Exoelectrogenicos en celdas de combustible microbianas (CCM) compiten con otros microorganismos por el substrato. Para entender cómo afecta esta remoción; evaluando la generación actual, y las eficiencias coulombicas, las tasas de remoción de substratos de aguas residuales domésticas con compuesto biodegradable (el acetato).

Revelo, Hurtado, y Ruiz (2013), Presentaron y discutieron los aspectos más importantes que inciden en el desempeño de una celda de combustible microbiana, tales como su arquitectura, la función microbiana y el tipo de sustratos.

Ge *et al.* (2015), Desarrollaron la tecnología de las celdas de combustible microbiana (CCM) en la extracción de energía con aguas residuales municipales reales. (Dong et al., 2015) desarrollando, un piloto apilable en estantes diseñados y demostrando la eficiencia en generación eléctrica en el tratamiento de aguas residuales de una cervecería, obteniendo el 80% de eficiencia coulombica.

Min, Cheng, y Logan (2005), Realizó estudios en la comparación de factores que pueden aumentar la potencia de salida como el tipo de régimen cambiario del protón que puede afectar, el sistema en la resistencia interna, con una membrana de cambio del protón comparada con un puente de sal; conteniendo en el puente de sal, un cultivo puro (*Geobacter metallireducens*), para la membrana con *G. metallireducens*, la potencia de salida con cualquier inóculo fue de 4071 mW/m² y con el puente de sal (*inoculada con G. metallireducens*) fue 2.2 mW/m². La potencia de salida baja estaba adscrita a la resistencia interna superior del sistema del puente de salida. Obteniendo la eficiencia Coulombica (47 % a 55 %) Demostrando así que las densidades crecientes de poder en CCM requerirán reducir la resistencia interna del sistema.

Se conoce, también que existen estudios de tratamientos de efluentes de aguas residuales en el camal de la municipalidad de la ciudad de Ilave, mediante un sistema de tratamiento

mixto Cal – Flocculación, llegando a remover DBO 75%, y DQO al 73%. Quille y Donaires (2013).

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Identificación del problema

Los problemas ambientales relacionados con la disposición de aguas residuales se han incrementado sustancialmente ya que las tecnologías actuales de tratamiento de aguas residuales no son sostenibles para satisfacer las crecientes necesidades de saneamiento básico, debido a la rápida industrialización y crecimiento de la población, A nivel nacional, se vierte aproximadamente 2 217 946 m³ por día de aguas residuales (OEFA, 2017), la rápida industrialización y crecimiento de la población, las fuentes de agua de desecho son principales contaminantes en masas de aguas superficiales y subterráneas; tal es el caso de las aguas residuales sin tratamiento en la ciudad de Puno que se vierten 6,356,177 000 m³ por año (SINIA, 2017). El camal de Azoguine de la ciudad de Puno, es uno de los aportantes en aguas residuales utilizando 340 m³ por mes de agua para el proceso productivo de carne, requiriéndose métodos complejos para el tratamiento de sus efluentes y costosos, simplemente porque son energéticas y costosas, constituyéndose uno de los problemas ambientales grandes de nuestra época, no solo en países desarrollados sino también en los países que están en vías de desarrollo.

Las fuentes de agua de desecho son las principales causas de la contaminación ambiental en las masas de aguas superficiales y subterráneas; tal es el caso de las aguas residuales del camal de Azoguine de la ciudad de Puno, que utilizan grandes cantidades de agua para el proceso productivo de carne, generando dos tipos de residuos, con alta concentración de carga orgánica, siendo estos los efluentes líquidos utilizados durante la producción y sólidos generados durante el proceso, requiriéndose métodos complejos y costosos para su tratamiento eficiente de estos efluentes.

Actualmente no existen tecnologías de tratamientos autónomos, conservadores de energía en el país y la región, tal es, como, el de las celdas de combustible microbiano que generan electricidad a partir de aguas residuales y simultáneamente remueven materia orgánica (DQO).

2.2 Enunciados del problema

Por la problemática mencionada anteriormente se crea la necesidad de plantear el problema de investigación a través de las siguientes interrogantes:

¿Las celdas de combustible microbiana (CCM) mediante la actividad catalítica para el potencial de oxidación de materia orgánica y/o inorgánica pueden generar energía eléctrica y remover materia orgánica eficientemente a partir de las aguas residuales de camal Azoguine a estas condiciones ambientales?

¿Cómo la concentración de sustratos del agua residual de camal Azoguine presentes en el ánodo a través de tiempo; influirá en la generación de energía eléctrica?

¿Qué efecto tendrá la temperatura en la generación de energía eléctrica y remoción de materia orgánica?

2.3 Justificación

Estos últimos años, se ha estado incrementando la contaminación de las aguas superficiales, en la Bahía interior de Puno, presentando alto grado de contaminación como la eutrofización por la descarga de altos contenidos de materia orgánica. Uno de los agentes que aportan son las aguas residuales de camal que presentan altos contenidos de materia orgánica, los cuales requieren tratamientos avanzados, como osmosis inversa y electrodiálisis, para la eliminación de amoníaco, la desnitrificación y la precipitación de fosfatos, por la complejidad y elevados costos, que representan estos tratamientos avanzados.

En la siguiente propuesta para el tratamiento de aguas residuales, con alto contenido de materia orgánica, busca implementar una tecnología nueva que está emergiendo en estos últimos años, como en los países desarrollados, en el que se están realizando diversos estudios en esta área, como es, de las celdas de combustible microbiana (CCM), que genera electricidad, mediante un sistema bioelectroquímico, encargándose de capturar directamente los electrones producidos por el metabolismo microbiano, generando

energía eléctrica y simultáneamente removiendo la materia orgánica existente, en aguas residuales con alto contenido de materia orgánica.

Los parámetros obtenidos de las condiciones óptimas de funcionamiento de una celda de combustible microbiana (CCM) difieren de acuerdo a las condiciones ambientales en el que se encuentren, la materia orgánica y la biodiversidad de microorganismos que estos contienen, por lo tanto, la eficacia variara de acuerdo a las condiciones ambientales en las que este estableciéndose.

Se investigará la eficacia de la generación de energía eléctrica y remoción de materia orgánica en función a la concentración de sustratos orgánicos presentes en aguas residuales de un camal, en una celda de combustible microbiana, para implementar esta tecnología, en el proceso de tratamiento de aguas residuales en camales, a estas condiciones ambientales. En el caso que esta tecnología de la CCM fuese altamente eficiente, se utilizaría como una alternativa, para contribuir con la preservación y conservación del medio ambiente.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo general

- Evaluar el rendimiento de generación de energía eléctrica y remoción de materia orgánica e inorgánica en celdas de combustible microbiana (CCM) mediante la actividad catalítica como potencial de oxidación de materia orgánica e inorgánica, a partir de las aguas residuales de camal Azoguine a estas condiciones ambientales.

2.4.2 Objetivos específicos

- Evaluar la influencia de la concentración de sustratos del agua residual de camal Azoguine, presentes en el ánodo para la generación de energía eléctrica en una CCM.
- Determinar la temperatura adecuada para la generación de energía eléctrica y remoción de la materia orgánica en la CCM del agua residual de camal Azoguine.

2.5 Hipótesis

2.5.1 Hipótesis general

- Las celdas de combustible microbiana (CCM) mediante la actividad catalítica como potencial de oxidación de materia orgánica e inorgánica, presentes en las aguas residuales de camal Azogue genera eficientemente energía eléctrica y remueve la materia orgánica e inorgánica a estas condiciones ambientales.

2.5.2 Hipótesis específicas

- La concentración de sustratos del agua residual influye en la generación de energía eléctrica en una CCM del camal de azogue
- La temperatura es un parámetro influyente para la generación de energía eléctrica y remoción de materia orgánica en la CCM en aguas residuales del camal de Azogue.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de estudio

Camal de Azoguine, emisión de efluentes líquidos (aguas residuales) con alto contenido de materia orgánica.

La experimentación se llevó a cabo en los Laboratorios de control de calidad, de la facultad de Ingeniería Química de la UNA-Puno, ubicado en la ciudad Universitaria, ciudad de Puno. Ubicado a una altura promedio de 3812 msnm y presentando una temperatura de 8 °C a 14 °C.

3.2 Población

Camal de Azoguine (centro de beneficio), donde se concentran los efluentes líquidos (aguas residuales) y sólidos residuales.

3.3 Muestra

Tipo de muestreo: Probabilístico aleatorio simple (Al azar).

Volumen: Se tomó muestras de 10 L de agua residual del matadero del punto de acopio de la mezcla (efluentes líquidos y residuos sólidos), las muestras fueron recogidas, en distintas fechas, almacenándose en una cámara de refrigeración a 4 °C.

El volumen de agua residual de camal que se colocó en las celdas de los ánodos fueron 250 mL en cada caso.

3.4 Métodos

Investigación experimental cuantitativa.

3.5 Descripción detallada de método por objetivos específicos

3.5.1 Descripción de variables analizadas en los objetivos específicos

Tabla 2

Descripción de variables analizadas

Objetivo específico	Variables			
	Independiente	Unidades	Dependiente	Unidades
Evaluar la influencia de la concentración de sustratos del agua residual, presentes en el ánodo en la generación de energía eléctrica del camal de Azogue	Concentración de sustratos (DQO)	mg/L	Eficiencia coulombica (Ec)	%
	Volumén del Área del electrodo	mL m ²		
Determinar la temperatura adecuada para la generación de energía eléctrica y remoción de materia orgánica en la CCM. de las aguas residuales del camal de Azogue.	Temperatura	°C	Eficiencia coulombica (Ec)	%
	Concentración de sustratos (DQO)	mg/L		
	Volumen	mL	Eficiencia de remoción DQO (Er)	%
	Área del electrodo	m ²		

3.5.2 Descripción detallada del uso de materiales, equipos, instrumentos e insumos

3.5.2.1 Objetivo específico 1

Materiales:

- Frasco muestreador: Recipiente para contener las muestras de los efluentes de agua residual del camal.
- Erlenmeyer 250 mL: Adecuación a celdas de combustible microbiana y uso para la titulación en el análisis de DQO.
- Pipetas: Toma de muestras de alícuotas de 2,5 mL del agua residual de camal para analizar el DQO al inicio y final.
- Probetas: Medición del volumen de agua residual.
- Tubo de vidrio: Medio de intercambio protónico (puente salino)
- Vaso precipitado de 250 mL: Preparación del puente salino.
- Alambre de cobre: Medio en el que se realiza la conductividad eléctrica.
- Tampones de hule: Aislamiento de la celda (ánodo) para que sea un medio anaeróbico
- Electrodo (grafito): Medio en el que las bacterias convierten la energía química en energía eléctrica (transferencia de electrones).

Equipos:

- Celda de combustible microbiana: instalación de los electrodos y el puente salino, y sustrato.

➤ **Construcción de la celda de combustible microbiana (Prototipo de la celda de combustible microbiana)**

- Tipo de la celda de combustible microbiana: estrategia de colonización del ánodo. Numero de celdas: Dos cámaras (cámara anódica y cámara catódica)
- Tipo de Flujo: discontinuo (volumen constante dentro de la celda).
- Características de las celdas (Ánodo):
 - Volumen de la celda: 250 mL.
 - Sustrato: Mezcla compleja (agua residual no tratada).
 - Electrodo: Ánodo (grafito) (se acondiciona un electrodo).
- Características de las celdas (cátodo):
 - Volumen de la celda: 250 mL.
 - Sustrato: agua.
 - Electrodo: cátodo (grafito) (se acondiciona un electrodo).
- Separadores: Puente salino (la concentración que se encuentra en el puente salino es de 0.45 g de agar y 4.5 g de KCl en 30 ml de agua destilada, (Briseño y Sánchez 2013) para el intercambio de protones y consiste un tubo de acrílico de 5 mm de diámetro, una distancia entre ánodo y cátodo de 12 cm y doblado 8 cm en cada extremo a fin de facilitar su introducción en el ánodo y el cátodo.
- Laptop: adquisición de los datos que se van a transmitir por la tarjeta de adquisición.
- Digestor (termo reactor): digestión del agua residual para el análisis de DQO, al inicio y final.

Instrumentos:

- Multímetro: Medición del voltaje periódicamente (mV).
- Tarjeta de adquisición de datos: Recopilación de los datos de voltaje del multímetro (PR 35V4).
- Balanza analítica: Pesada de los reactivos (insumos).
- Resistencias: para realizar la caracterización de la curva de polarización (10 Ω , 50 Ω , 100 Ω , 500 Ω , 1 K Ω , 5 K Ω , 10 K Ω , 50 K Ω , 100 K Ω)

Insumos:

- Aguas residuales domesticas de camal de Azoguine (celda ánodo).
- Agar agar (medio de intercambio protónico).
- KCl (medio de intercambio protónico).
- Agua destilada (análisis de DQO).
- Para el análisis de DQO:
 - Ácido sulfúrico (análisis de DQO).
 - Dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) (análisis de DQO).
 - Cloruro de Plata (análisis de DQO).
 - Biftalato de potasio (calibración de la curva).
 - Solución FAS (sulfato ferroso amoniacal).
 - Ferroina (indicador).

3.5.2.1.1 Acondicionamiento de las celdas de combustible microbiana

Se acondicionaron para las celdas de combustible microbiana matraces Erlenmeyer de doble cámara, anódica y catódica (cada una de 250 mL), empleando como separador un puente salino (KCl en agar) contenido en un tubo en U de 30 mL, todos los electrodos (ánodo y cátodo) fueron

barras de grafito con un área de $6,22 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ cada uno, estos fueron sumergidos sobre una solución de HCl al 1% para la eliminación de impurezas en la superficie. Los electrodos en ambas cámaras fueron unidos por medio de un alambre de cobre y todas las superficies expuestas de metal se sellaron con polisiloxano (silicona).

3.5.2.1.2 Inoculación y operación de las celdas de combustible microbiana

Las aguas residuales del centro de beneficio de Azoguine se recolectaron de la planta de tratamiento de la fuente primaria, donde se realizan la mezcla de las aguas con contenido de sangre y estiércol. Las muestras se tomaron en 3 diferentes fechas, cuya concentración en DQO varió de 1980, 2400 y 3200 mg/L; colectándose un volumen de 3 L, en cada caso, que posteriormente fueron inoculados 250 mL, en las celdas anódicas. La operación de las celdas anódicas, se realizó a condiciones anaeróbicas, por lo que se selló las celdas anódicas. En las celdas catódicas se emplearon agua 250 mL, las celdas catódicas fueron expuestas al medio ambiente, teniendo un proceso aeróbico.

3.5.2.1.3 Análisis del funcionamiento de las celdas de combustible microbiana en la variación de concentración

Las celdas de combustible microbianas trabajaron a temperatura ambiente a modo batch, interconectado a un multímetro (PR-35) conectado a una computadora personal. El sistema se realizó a circuito abierto y se programó para la adquisición y medida de voltaje por día, hasta que el voltaje se haga constante, el incremento de voltaje está relacionado directamente con la concentración inicial de la demanda química de oxígeno (DQO). Estando el voltaje constante, se acondicionaron diferentes resistencias externas a los sistemas de celdas de combustible microbiana, partiendo de $100 \text{ K}\Omega$ a 10Ω , para determinar el voltaje máximo alcanzado dentro del sistema, el sistema se dejó estabilizar durante 30 minutos antes de registrar los datos de voltaje, por cada resistencia externa aplicada, el voltaje obtenido permite determinar corriente. La corriente se determinó mediante la siguiente relación $I=V/R$, utilizándose como dato el voltaje que se

obtiene a partir de la intervención de las resistencias externas. La corriente máxima se determinó mediante la gráfica del voltaje, corriente por área en función de la resistencia externa. La eficiencia coulombica fue calculada por la ecuación (12), y la remoción de DQO por la ecuación (13) el análisis de DQO se realizó al inicio y final del proceso (cuando el voltaje es constante).

3.5.2.2 Objetivo específico 2

Materiales:

- Frasco muestreador: Recipiente para contener las muestras de los efluentes de agua residual del camal.
- Erlenmeyer 250 mL: Adecuación a celdas de combustible microbiana y uso para la titulación en el análisis de DQO.
- Pipetas: Toma de muestras de alícuotas de 2,5 mL del agua residual de camal para analizar el DQO al inicio y final.
- Probetas: Medición del volumen de agua residual.
- Tubo de vidrio: Medio de intercambio protónico (puente salino)
- Vaso precipitado de 250 mL: Preparación del puente salino.
- Alambre de cobre: Medio en el que se realiza la conductividad eléctrica.
- Termocupla: Medición de la temperatura dentro de la CCM.
- Tampones de hule: Aislamiento de la celda (ánodo) para que sea un medio anaeróbico
- Electrodo (grafito): Medio en el que las bacterias convierten la energía química en energía eléctrica (transferencia de electrones).

Equipos:

- Celda de combustible microbiana: instalación de los electrodos y el puente salino, y sustrato.
- **Construcción de la celda de combustible microbiana (Prototipo de la celda de combustible microbiana)**
 - Tipo de la celda de combustible microbiana: estrategia de colonización del ánodo. Numero de celdas: Dos cámaras (cámara anódica y cámara catódica)
 - Tipo de Flujo: discontinuo (volumen constante dentro de la celda).
 - Características de las celdas (Ánodo):
 - Volumen de la celda: 250 mL.
 - Sustrato: Mezcla compleja (agua residual no tratada).
 - Electrodo: Ánodo (grafito) (se acondiciona un electrodo).
 - Características de las celdas (cátodo):
 - Volumen de la celda: 250 mL.
 - Sustrato: agua.
 - Electrodo: cátodo (grafito) (se acondiciona un electrodo).
- Separadores: Puente salino (la concentración que se encuentra en el puente salino es de 0.45 g de agar y 4.5 g de KCl en 30 ml de agua destilada, (Briseño y Sánchez 2013) para el intercambio de protones y consiste un tubo de acrílico de 5 mm de diámetro, una distancia entre ánodo y cátodo de 12 cm y doblado 8 cm en cada extremo a fin de facilitar su introducción en el ánodo y el cátodo.
- Laptop: adquisición de los datos que se van a transmitir por la tarjeta de adquisición.

- Digestor (termo reactor): digestión del agua residual para el análisis de DQO, al inicio y final.

Instrumentos:

- Multímetro: Medición del voltaje periódicamente (mV).
- Tarjeta de adquisición de datos: Recopilación de los datos de voltaje del multímetro (PR 35V4).
- Balanza analítica: Pesada de los reactivos (insumos).
- Resistencias: para realizar la caracterización de la curva de polarización (10 Ω , 50 Ω , 100 Ω , 500 Ω , 1 K Ω , 5 K Ω , 10 K Ω , 50 K Ω , 100 K Ω)

Insumos:

- Aguas residuales domesticas de camal de Azoguine (celda ánodo).
- Agar agar (medio de intercambio protónico).
- KCl (medio de intercambio protónico).
- Agua destilada (análisis de DQO).
- Para el análisis de DQO:
 - Ácido sulfúrico (análisis de DQO).
 - Dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) (análisis de DQO).
 - Cloruro de Plata (análisis de DQO).
 - Biftalato de potasio (calibración de la curva).
 - Solución FAS (sulfato ferroso amoniacal).
 - Ferroina (indicador).

3.5.2.2.1 Acondicionamiento de las CCM para las diferentes temperaturas.

Se acondicionaron para las celdas de combustible microbiana 18 matraces Erlenmeyer de cámaras, anódica y catódica (cada una de 250

mL). Utilizando 3 sistemas (cámaras anódicas y cámaras catódicas) de celdas de combustibles microbianas para la temperatura de 8 °C, llevándose estas a una cámara de refrigeración a temperatura constante de 8 °C, para las concentraciones iniciales de 1980, 2400, 3200 mg/L de demanda química de oxígeno; los otros 3 sistemas de celdas de combustible microbiana se utilizaron para la temperatura de 15 °C, colocándose en un ambiente cerrado a temperatura constante de 15 °C, para las concentraciones iniciales de demanda química de oxígeno de 1980, 2400, y 3200 mg/L; y finalmente los 3 últimos sistemas de celdas de combustible microbiana se aplicaron para la temperatura de 25 °C, llevándose, estas celdas de combustible microbiana a una incubadora en donde se mantuvo la temperatura, de 25 °C, para las concentraciones iniciales de demanda química de oxígeno de 1980, 2400, 3200 mg/L. Los sistemas de celdas de combustible microbiana estuvieron separados mediante un puente salino de KCl al 10% en agar, contenido dentro de un tubo en U de 30 mL. Todos los electrodos (ánodo y cátodo) fueron barras de grafito con un área de $6,22 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ para cada cámara, estos fueron sumergidos sobre una solución de HCl al 1% para la eliminación de impurezas en la superficie. Los electrodos en ambas cámaras fueron unidos por medio de un alambre de cobre y todas las superficies expuestas de metal se sellaron con poli siloxano (silicona).

3.5.2.2.2 Inoculación y operación de la celda de combustible microbiana

Las aguas residuales del centro de beneficio de Azogue se recolectaron de la planta de tratamiento de la fuente primaria, donde se realizan la mezcla de las aguas con contenido de sangre y estiércol. Las muestras que se recogieron fueron 5 L, en diferentes fechas; las aguas residuales colectadas tuvieron concentraciones iniciales de demanda química de oxígeno de 1980, 2400, y 3200 mg/L. La operación de las celdas de combustible microbianas fue un proceso batch, para las diferentes concentraciones de demanda química de oxígeno iniciales y para las temperaturas de 8, 15 y 25 °C con cámaras anódicas, a condiciones anaeróbicas, conteniendo 250 mL de agua residual en cada

cámara anódica, sellándose, con tampones de hule, en cada caso. En las cámaras catódicas se emplearon agua 250 mL, cada cámara fue expuesto al medio ambiente, teniendo un proceso aeróbico. Midiéndose en cada caso, la temperatura con una termocupla acondicionada a cada cámara anódica, para su control.

3.5.2.2.3 Análisis del funcionamiento y resultados de las celdas de combustible microbiana en variación de temperatura y concentración

Las cámaras de las celdas de combustible microbianas trabajaron a temperaturas de 8, 15, y 25 °C, para las concentraciones iniciales de demanda química de oxígeno de 1980, 2400, 3200 mg/L, los electrodos cátodo y ánodo estuvieron unidos al alambre de cobre y estos fueron interconectados al multímetro (PR-35) conectado a una computadora personal. El sistema se realizó a circuito abierto, programándose para la adquisición de datos y medida del voltaje por día, hasta que el voltaje se haga constante, el incremento de voltaje se encuentra relacionado directamente con la concentración inicial de demanda química de oxígeno (DQO) y temperatura.

Teniendo el voltaje constante en cada una de las celdas de combustible microbiana se acondicionaron diferentes resistencias externas a los sistemas de celda de combustible microbianas, iniciando con 100 K Ω hasta 10 Ω , para determinar los voltajes máximos alcanzados. El sistema se dejó estabilizar durante 30 minutos, antes de registrar los datos de voltaje para cada resistencia externa, los valores obtenidos permiten determinar la corriente, generación de potencia máxima en función de la carga, y la eficiencia coulombica de la celda de combustible microbiana.

La corriente se determinó mediante la siguiente relación $I=V/R$, donde V es el voltaje que se obtiene a partir de las resistencias externas. La corriente máxima se determinó mediante la gráfica del voltaje, corriente por área en función de la resistencia externa. para las diferentes temperaturas y concentraciones. La eficiencia coulombica fue calculada

por la ecuación (11), y la eficacia de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) por la ecuación (12), este procedimiento se realizó para todos los casos de temperatura y concentración (cuando el voltaje es constante).

3.5.3 Aplicación de Prueba estadística Inferencial

3.5.3.1 Objetivo Especifico 1

Diseño experimental cuadrados latinos de $P=3$; donde P es factores; $P^2=9$ experiencias.

Tabla 3

Diseño experimental cuadrados latino eficiencia coulombica en función a concentración.

Bloque	Concentración DQO (mg/L)	Muestras	Lugar	Eficiencia coulombica
1	2	3	3	Y_{233}
1	1	1	1	Y_{111}
1	2	1	2	Y_{212}
1	3	3	1	Y_{331}
1	3	1	3	Y_{313}
1	1	2	3	Y_{123}
1	3	2	2	Y_{322}
1	2	2	1	Y_{221}
1	1	3	2	Y_{132}

3.5.3.2 Hipótesis específica 1

$H_0: \tau = \tau_i$ Todos los tratamientos producen el mismo efecto

$H_a: \tau \neq \tau_i$ para al menos un $i=1,2,3$ (al menos uno de los tratamientos produce efectos distintos)

Modelo estadístico:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde: Y_{ij} : variable de respuesta de la ij -ésima unidad experimental; μ : media general de la variable de respuesta; τ_i : efecto del i -ésimo tratamiento

(nivel del factor) en la variable dependiente; ϵ_{ij} : error experimental asociado a la ij -ésima unidad experimental.

Análisis de varianza con aplicación de la prueba F

Tabla 4

Análisis de varianza con aplicación de la prueba F

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrados medios (CM)	Valor de F
Tratamientos	t-1	$\sum_{i=1}^t \frac{Y_i^2}{r} = \frac{Y^2}{t_r}$	SC_{trat}/gl_{trt}	CM_{trat}/CM_{ec}
Error	t(r-1)	$SC_{total}-SC_{trat}$	SC_{ec}/gl_{ec}	
Total	T_{r-1}	$\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r Y_{ij}^2 - \frac{Y^2}{t_r}$		

Fuente:(Montgomery, 2009)

Toma de decisión:

Prueba de F: $F_o \geq F(\alpha; t-1; t(r-1))$, H_0 es rechazada;

sí $F_o < F(\alpha; t-1; t(r-1))$, H_0 No es rechazada

$F_{critica}$ = Valor crítico de F encontrado en la tabla F de Fisher & Snedecor, considerando los grados de libertad de tratamientos (v_1), los grados de libertad del error (v_2) y un determinado nivel de significancia (α)

3.5.3.3 Objetivo Especifico 2

Diseño experimental cuadrados latinos de $P=3$; donde P es factores; $P^2=9$ experiencias.

Intervalo temperatura es el mínimo valor promedio a las condiciones ambientales de las aguas residuales del matadero como mínimo 8 °C, promedio intermedio 15 °C y el máximo de 25 °C, en el que se evaluó la generación eléctrica y remoción de la materia orgánica.

Tabla 5

Diseño de experimentos cuadrados latinos para diferentes temperaturas

Bloque	Temperatura	Concentración	Lugar	Eficiencia coulombica	DQO (eficacia de remoción)
1	T1	C3	2	Y ₁₃₂	Y ₁₃₂
1	T1	C2	3	Y ₁₂₃	Y ₁₂₃
1	T2	C3	3	Y ₂₃₃	Y ₂₃₃
1	T2	C1	2	Y ₂₁₂	Y ₂₁₂
1	T2	C2	1	Y ₂₂₁	Y ₂₂₁
1	T3	C3	1	Y ₃₃₁	Y ₃₃₁
1	T3	C2	2	Y ₃₂₂	Y ₃₂₂
1	T1	C1	1	Y ₁₁₁	Y ₁₁₁
1	T3	C1	3	Y ₃₁₃	Y ₃₁₃

Donde: T1 es la temperatura de 8 °C; T2 es la temperatura 15 °C; T3 es la temperatura de 25 °C; C1 es concentración (DQO-1980 mg/L); C2 es concentración (DQO-2400 mg/L); C3 es concentración (DQO-3200 mg/L)

Prueba estadística:

Tabla 6

Croquis de campo

Filas	Columna			Total, filas Y _i
	1	2	3	
1	Y _{11k}	Y _{12k}	Y _{13k}	Y _{1.}
2	Y _{21k}	Y _{22k}	Y _{23k}	Y _{2.}
3	Y _{31k}	Y _{32k}	Y _{33k}	Y _{3.}
Total, columna Y _{.j.} (siendo k= 1,2,3)	Y _{.1.}	Y _{.2.}	Y _{.3.}	Y _{...}

Tabla 7
Adicional para los Tratamientos

	Tratamientos		
	1	2	3
	Y_{ij1}	Y_{ij2}	Y_{ij3}
	Y_{ij1}	Y_{ij2}	Y_{ij3}
	Y_{ij1}	Y_{ij2}	Y_{ij3}
Total, tratamientos	$Y_{.1}$	$Y_{.2}$	$Y_{.3}$
Media tratamientos	$\bar{Y}_{..1}$	$\bar{Y}_{..2}$	$\bar{Y}_{..3}$

Fuente: (Montgomery, 2009)

$$\text{Media general} = \bar{Y}_{..} = \frac{Y_{...}}{t^2}$$

Modelo estadístico Matemático

$$Y_{ijk} = \mu + F_i + C_j + \tau_k + \varepsilon_{ijk}$$

Donde: Y_{ijk} = Valor observado correspondiente al k – ésimo tratamiento en la i –ésima fila con la j –ésima columna, μ = Media general de la variable de respuesta, F_i = Efecto de la i - ésima fila en la variable dependiente y mide la separación de la media $\mu_{i.}$ en relación a la media μ , esto es: $F_i = \mu_{i.} - \mu$; $\mu_{i.}$ = media poblacional de la i –ésima línea, C_j = Efecto de la j - ésima columna en la variable dependiente y mide la separación de la media $\mu_{.j}$ en relación a la media μ , esto es: $C_j = \mu_{.j} - \mu$; $\mu_{.j}$ = media poblacional de la j –ésima columna. τ_k = Efecto del k - ésimo tratamiento en la variable dependiente y mide la separación de la media $\mu_{..k}$ en relación a la media μ , esto es: $\tau_k = \mu_{..k} - \mu$; $\mu_{..k}$ = media poblacional del k –ésimo tratamiento, ε_{ijk} = Error experimental asociado al valor observado Y_{ijk} .

3.5.3.4 Hipótesis Específica 2

$H_0: \tau = \tau_i$ (Todos los tratamientos producen la misma eficiencia en generación de energía y remoción de materia orgánica)

$H_a: \tau \neq \tau_i$ Para al menos un i ; $i = 1, 2, \dots t$. (Al menos uno de los tratamientos produce diferentes resultados en la eficiencia)

Nivel de significancia. $\alpha=0,05$

Tabla 8

Análisis de varianza

FV	GL	SC	CM	Valor de F
Tratamientos	$t - 1$	$\frac{\sum_{k=1}^t Y_{..k}^2}{t} - \frac{Y_{..}^2}{t^2}$	SC_{trat}/GL_{trat}	CM_{trat}/CM_{ec}
Filas	$t - 1$	$\frac{\sum_{i=1}^t Y_{i..}^2}{t} - \frac{Y_{..}^2}{t^2}$		
Columnas	$t - 1$	$\frac{\sum_{j=1}^t Y_{.j.}^2}{t} - \frac{Y_{..}^2}{t^2}$		
Error exp	$(t-1)$ $(t-2)$	$SC_{total} - (SC_{trat} + SCH + SCC)$	SC_{ec}/GL_{ec}	
Total	$(t^2 - 1)$	$\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^t \sum_{k=1}^t Y_{ijk}^2 - \frac{Y_{..}^2}{t}$		

Fuente: (Montgomery, 2009)

Regla de Decisión

Rechazar Ho. sí Valor de F \geq Valor crítico de F (gl trat; gl error; α)

No Rechazar Ho. sí Valor de F $<$ Valor crítico de F (gl trat; gl error; α)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Influencia de la concentración de sustratos (DQO) en la generación de electricidad

Las muestras de agua residual recolectadas en el mes de diciembre, marzo, abril de concentraciones iniciales en demanda química de oxígeno: 1980 mg/L(C1), 2400 mg/L (C2) y 3200 mg/L (C3). Las celdas de combustible microbianas iniciaron con un voltaje de 8,5 mV; 11,45 mV; 14,40 mV; los cuáles fueron incrementado sustancialmente, en la figura N °1 se muestra el crecimiento del voltaje desde el momento de la operación de las celdas de combustible microbianas a diferentes concentraciones a temperatura ambiente, observándose que las muestras C1, C2, y C3, requirieron 17 días, 18 días, y 20 días, para alcanzar el voltaje constante, los voltajes finales que se obtuvieron en las muestras C1, C2, C3, fueron 499,5 mV; 507,5 mV y 530 mV, respectivamente. Aplicando la resistencia externa variable desde (100 K Ω a 10 Ω), los valores de voltaje oscilaron de 128,7 mV a 0 mV respectivamente, por lo que, la eficiencia coulombica obtenida por cada concentración se muestra en la tabla N ° 9.

Tabla 9

Eficacia coulombica en función de las concentraciones

Eficacia Coulombica DQO (mg/L)	Muestras		
	M1	M2	M3
1980	18,999	17,458	16,951
2400	21,053	21,422	20,329
3200	22,066	21,794	21,206

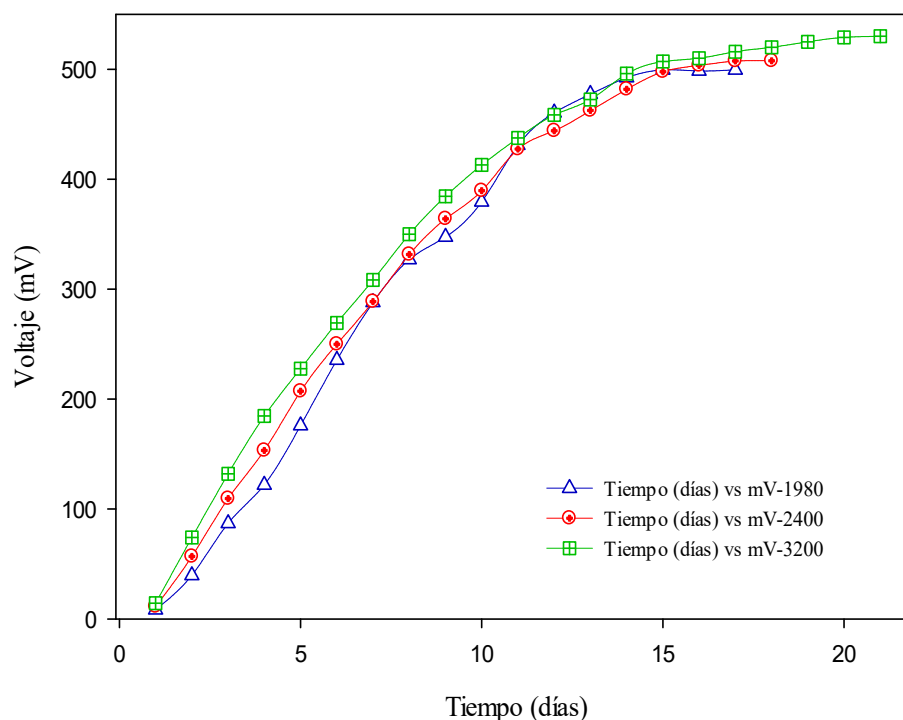


Figura 1. Crecimiento voltaje versus días de funcionamiento de las celdas de combustible microbiana.

Tabla 10

Voltaje y corriente por área en función a la resistencia externa DQO (1980, 2400, 3200)

R_{ext}	1980		2400		3200	
	mV	mA/m^2	mV	mA/m^2	mV	mA/m^2
10	0	0	0	0	0	0
50	0,075	2,411	0,057	1,848	0,075	2,411
100	0,150	2,411	0,162	2,614	0,150	2,411
500	0,975	3,134	0,950	3,054	0,625	2,009
1000	2,050	3,295	2,437	3,186	1,200	1,920
5000	14,650	4,710	10,825	3,480	11,400	3,665
10000	27,125	4,360	28,600	4,597	24,400	3,922
50000	76,575	2462	95,712	3,077	68,900	2,215
100000	128,700	2,069	142,137	2,285	128,700	2.069

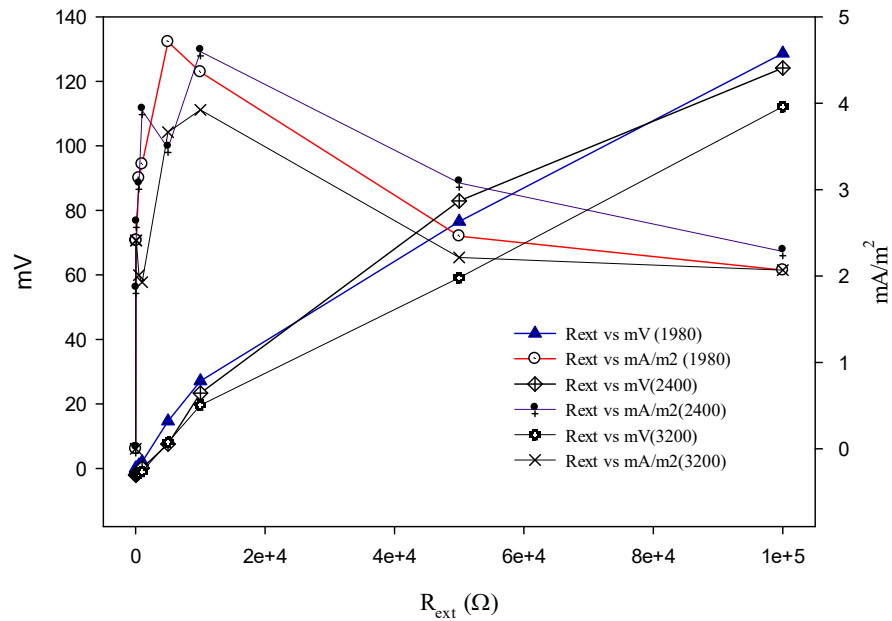


Figura 2. Voltaje y corriente por área en función de una resistencia externa variable a concentración inicial de 1980, 2400, 3200 mg/L (DQO).

4.1.1 Análisis de los resultados para la variación de concentración

Se aplico el diseño experimental cuadrados latinos para el análisis ANOVA y la contrastación de hipótesis, con el programa statgraphics, mostrándose el diseño en la tabla N °9 con los resultados, para el análisis correspondiente.

Tabla 11

Diseño experimental cuadrados latinos para análisis de ANOVA y contrastación de Hipótesis.

Bloque	Concentración DQO (mg/L)	Muestras	Lugar	Eficiencia coulombica
1	2	3	3	20,329
1	1	1	1	18,999
1	2	1	2	21,053
1	3	3	1	21,206
1	3	1	3	16,951
1	1	2	3	17,458
1	3	2	2	21,794
1	2	2	1	21,422
1	1	3	2	16,951

4.1.2 Análisis estadístico inferencial para la eficiencia coulombica a diferentes concentraciones

ANOVA – Eficiencia coulombica

Variable dependiente: Eficiencia coulombica

Factores:

Concentración DQO (mg/L)

Muestras

Lugar

Tabla 12

Análisis de varianza para eficiencia coulombica- suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Concentración(DQO)	15,470	2	7,735	2,540	0,282
B:Muestras	2,273	2	1,136	0,370	0,728
C:Lugar	8,489	2	4,244	1,390	0,418
RESIDUOS	6,098	2	3,049		
TOTAL (CORREGIDO)	32,332	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de Eficiencia coulombica en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que ningún valor-P es menor que 0.05, ninguno de los factores tiene un efecto estadísticamente significativo sobre Eficiencia coulombica con un 95.0% de nivel de confianza.

Tabla 13

Pruebas de múltiples rangos para la eficiencia coulombica por concentración (DQO)

Concentración(DQO)	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1	3	17,802	1,008	X
3	3	19,983	1,008	X
2	3	20,934	1,008	X

Tabla 14

Contraste de significancia de las muestras (eficiencia coulombica)

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1 – 2		-3,132	6,134
1 – 3		-2,181	6,134
2 – 3		0,951	6,134

* indica una diferencia significativa de las muestras (1 y 3) y (1-2)

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las X's en columna. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher.

Análisis de Una Variable - Eficiencia coulombica

Variable: Eficiencia coulombica

9 valores con rango desde 10,544 a 13,726

Tabla 15

Resumen estadístico para la eficiencia coulombica

Recuento	9
Promedio	19,573
Desviación Estándar	2,010
Coficiente de Variación	10,270%
Mínimo	16,951
Máximo	21,794
Rango	4,843
Sesgo Estandarizado	-0,495
Curtosis Estandarizada	-1,163

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para Eficiencia coulombica. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

4.1.3 Prueba de Hipótesis para Eficiencia coulombica

Media Muestral = 19,573

Mediana Muestral = 20,329

Desviación Estándar de la Muestra = 2,010

Prueba t

Hipótesis Nula: media = 0

Alternativa: no igual

Estadístico t = 29,209

Valor-P = $2,044 \times 10^{-9}$

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05

La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media de Eficiencia coulombica es igual a 0,0 versus la hipótesis alterna de que la media de Eficiencia coulombica es no igual a 0,0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza. La prueba de los signos evalúa la hipótesis de que la mediana de Eficiencia coulombica es igual a 0,0 versus la hipótesis alterna de que la mediana Eficiencia coulombica es no igual a 0,0. Se basa en contar el número de valores arriba y abajo de la mediana hipotética. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza.

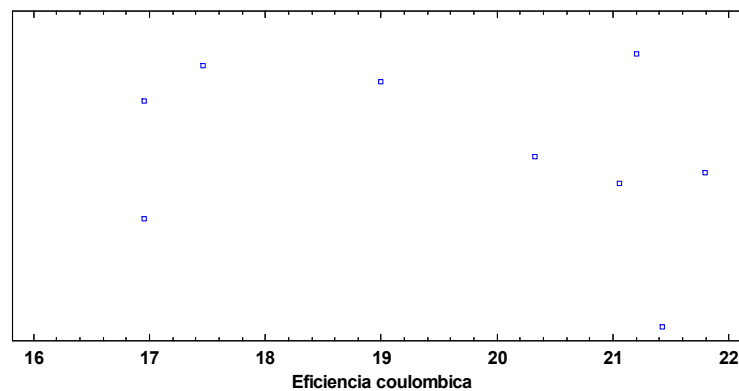


Figura 3. Dispersión de la eficacia coulombica

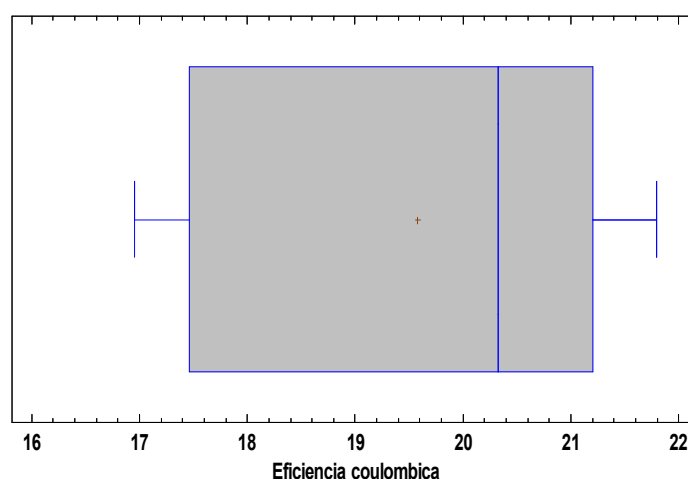


Figura 4. Caja y bigotes en la eficiencia coulombica

4.2 Influencia de la temperatura en la generación de energía eléctrica y remoción de la materia orgánica

Las muestras de aguas residuales recolectadas de concentraciones iniciales en demanda química de oxígeno 1980 mg/L (C1), para las temperaturas de 8 °C, 15 °C, y 25 °C; se iniciaron con voltajes de 8,00 mV; 9,10 mV; y 10,50 mV , alcanzándose voltajes finales de 494,00 mV; 540,50 mV y 611,00 mV, requiriéndose 19; 17 y 15 días respectivamente para alcanzar los voltajes constantes, el crecimiento de los voltajes por día se observa en la figura N °4. Para la concentración inicial de 2400 mg/L (C2) iniciaron con voltajes de 10,00 mV; 12,90 mV; y 13,70 mV respectivamente, alcanzándose voltajes finales de 473,00 mV; 540,20 mV y 610,00 mV y requiriéndose 17; 19 y 20 días respectivamente para alcanzar los voltajes constantes, el crecimiento de voltajes por día se observa en la figura N °5. Para la concentración inicial de 3200 mg/L (C3) iniciaron con voltajes de 12,00 mV; 16,80 mV; y 16,90 mV, los voltajes finales que alcanzaron fueron 457,00 mV; 576,20 mV y 612,00 mV, requiriéndose 19; 18 y 20 días respectivamente para alcanzar los voltajes constantes, el crecimiento de voltajes por día se observa en la figura N °6

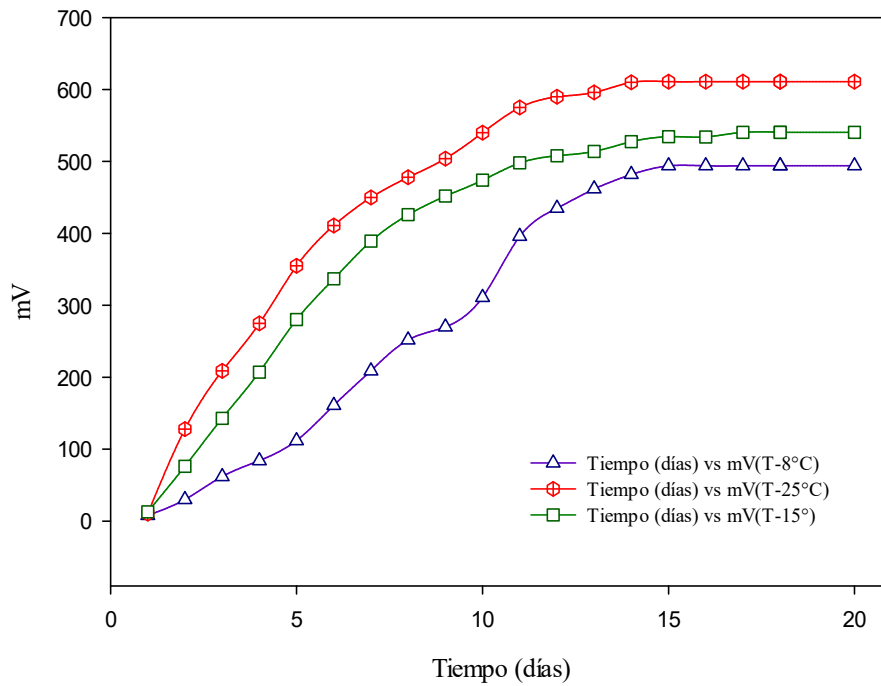


Figura 5. Crecimiento del voltaje a temperaturas de 8 °C, 15 °C y 25 °C para una concentración inicial de 1980 mg/L de DQO.

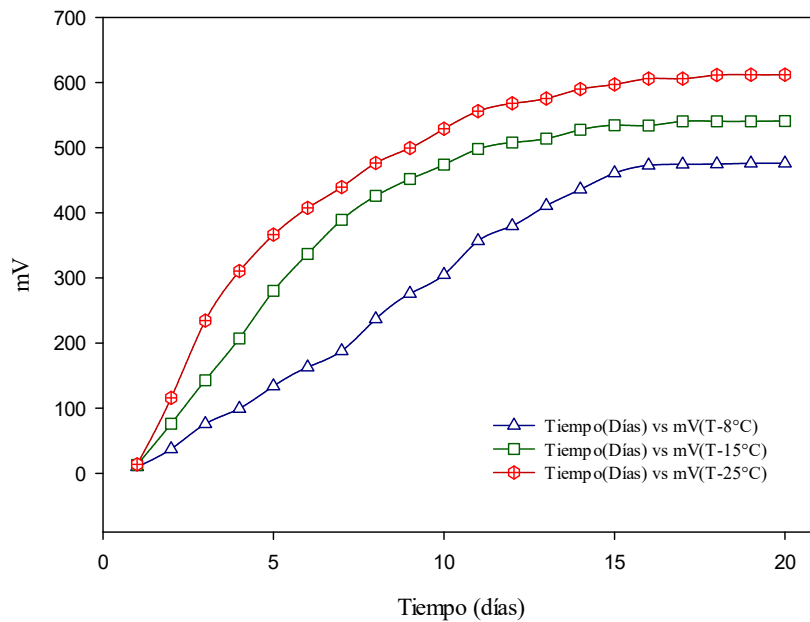


Figura 6. Crecimiento del voltaje a temperaturas de 8 °C, 15 °C y 25 °C para concentración inicial de 2400 mg/L de DQO.

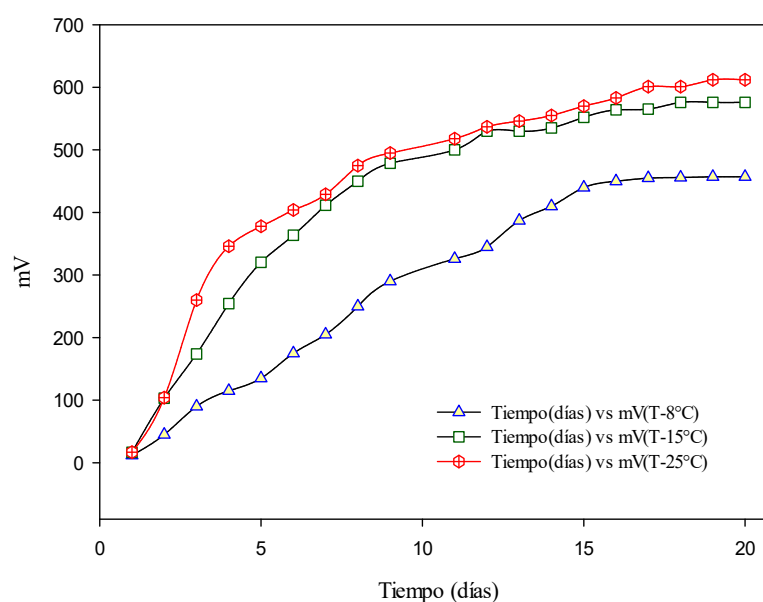


Figura 7. Crecimiento de voltaje a temperaturas 8 °C, 15 °C y 25 °C para concentración de 3200 mg/L de DQO.

Los voltajes constantes en las celdas de combustible microbiana, se obtuvieron en el intervalo de 15 a 20 días de operación. Las medidas del voltaje y corriente por área, como función de cada resistencia externa, para las diferentes temperaturas y concentraciones (C1, C2; y C3) se muestran en la tabla N ° 14, 15 y 16 respectivamente: Las Figuras N ° 7, 8, 9 muestran el comportamiento del voltaje y corriente por área en función de las resistencias externas para las temperaturas de 8 °C, 15 °C y 25 °C, para la concentración inicial DQO 1980 mg/L, en el que se observa que las resistencias externas de 1 K Ω , 10 K Ω , y 1 K Ω respectivamente, nos proporciona, los voltajes de máximos de 7,00 mV, 39,50 mV, y 7,80 mV respectivamente, obteniéndose las corrientes máximas alcanzadas por área de electrodo: 11,25 mA/m²; 6,35 mA/m²; y 12,53 mA/m² respectivamente. Las figuras N ° 10, 11 y 12 muestra el comportamiento del voltaje y corriente por área en función de las resistencias externas para las temperaturas de 8 °C, 15 °C y 25 °C para la concentración inicial DQO 2400 mg/L, se observa que las resistencias externas de 1 K Ω , 10 K Ω , 100 Ω , alcanzaron los voltajes máximos de 4,5 mV; 30,6 mV y 1,1 mV, alcanzando las corrientes máximas de 7,23 mA/m²; 4,92 mA/m² y 17,68 mA/m² respectivamente. Las figuras N ° 13, 14, 15 muestra el comportamiento del voltaje y corriente por área en función de las resistencias externas para las temperaturas de 8 °C, 15 °C y 25 °C, para la concentración inicial DQO 3200 mg/L, se observa que las

resistencias externas de 5 K Ω , 10 K Ω , 1 K Ω alcanzaron los voltajes de, 16,3 mV; 27,25 mV; y 13,30 mV, alcanzando las corrientes máximas de 5,24 mA/m²; 4,38 mA/m²; 21,44 mA/m² respectivamente.

Tabla 16

Voltaje y corriente por área en función a la resistencia externa para DQO 1980 mg/L a T-8 °C; T-15 °C, T-25 °C

R _{ext} (Ω)	DQO – 1980 mg/L					
	T-8 °C		T-15 °C		T-25 °C	
	mV	mA/m ²	mV	mA/m ²	mV	mA/m ²
10	0	0	0	0	0	0
50	0,150	4,709	0,050	1,569	0,200	6,279
100	0,300	4,837	0,200	3,224	0,600	9,674
500	1,600	5,144	1,100	3,536	3,300	10,610
1000	7,000	11,253	2,400	3,858	7,800	12,539
5000	15,700	5,047	12,700	4,083	30,100	9,677
10000	25,900	4,163	39,500	6,350	50,900	8,182
50000	115,700	3,700	129,800	4,173	119,900	3,855
100000	126,300	2,030	165,200	2,655	193,900	3,117

Tabla 17

Voltaje y corriente por área en función de la resistencia externa para DQO 2400 mg/L a T-8 °C; T-15 °C y T-25 °C

R _{ext} (Ω)	DQO – 2400 mg/L					
	T-8 °C		T-15 °C		T-25 °C	
	mV	mA/m ²	mV	mA/m ²	mV	mA/m ²
10	0	0	0	0	0	0
50	0,080	2,572	0,050	1,607	0,400	12,861
100	0,200	3,215	0,150	2,414	1,100	17,683
500	1,250	4,019	0,850	2,733	4,500	14,468
1000	4,500	7,234	1,750	2,813	8,900	14,307
5000	16,000	5,144	9,100	2,925	39,200	12,603
10000	26,450	4,252	30,650	4,927	69,750	11,213
50000	101,050	3,249	95,600	3,073	159,550	5,129
100000	127,400	2,048	147,050	2,364	266,950	4,291

Tabla 18

Voltaje y corriente por área en función de la resistencia externa para DQO 3200 mg/L a T-8 °C; T-15 °C y T-25 °C.

R _{ext} (Ω)	DQO – 3200 mg/L					
	T-8 °C		T-15 °C		T-25 °C	
	mV	mA/m ²	mV	mA/m ²	mV	mA/m ²
10	0	0	0	0	0	0
50	0,050	1,569	0,100	3,139	0,600	18,839
100	0,100	1,612	0,200	3,224	1,300	20,962
500	0,900	2,859	1,050	3,336	5,600	17,791
1000	2,000	3,224	2,100	3,386	13,300	21,445
5000	16,300	5,244	13,000	4,182	48,300	15,539
10000	27,000	4,340	27,250	4,380	88,600	14,243
50000	76,400	2,456	76,750	2,467	199,200	6,404
100000	128,500	2,065	128,900	2,072	340,000	5,465

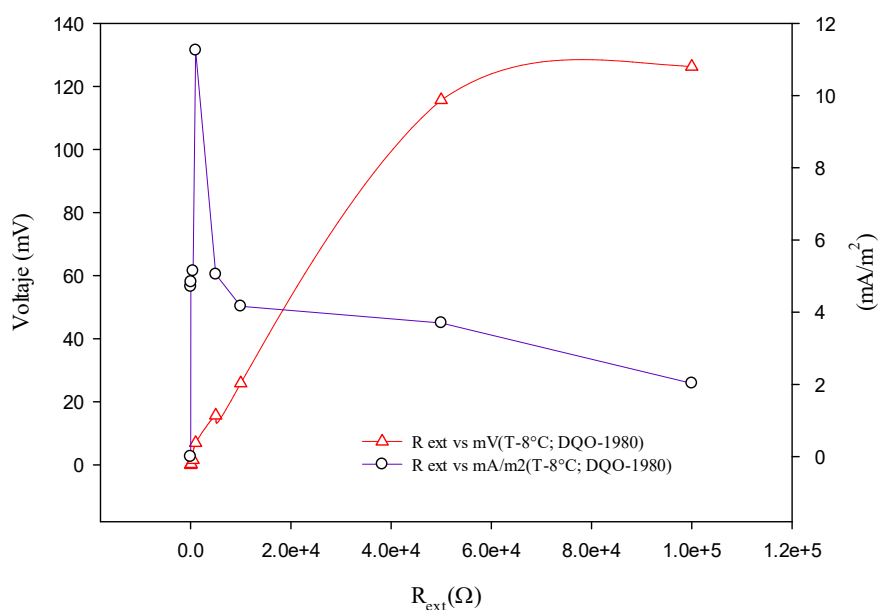


Figura 8. Voltaje y corriente por área en función de la resistencia externa a T-8 °C para la concentración inicial de 1980 mg/L de DQO

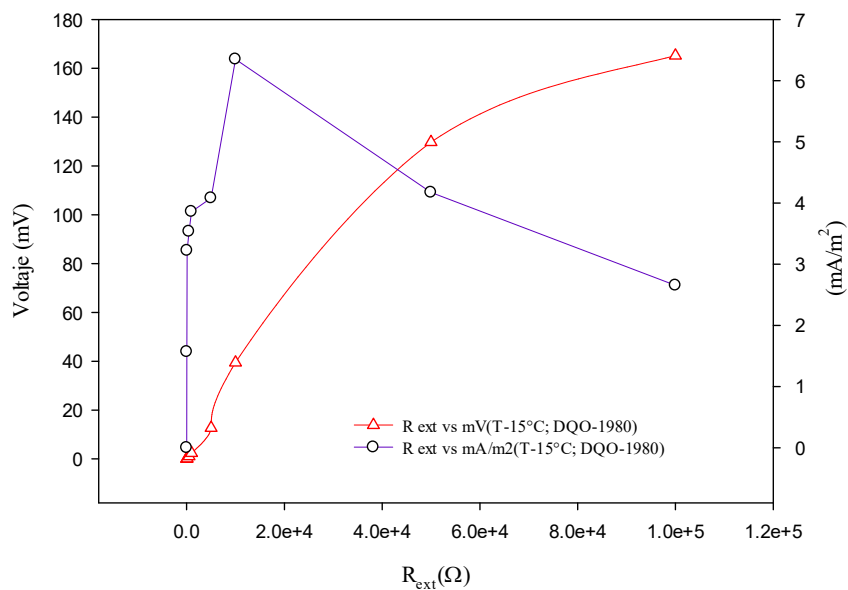


Figura 9. Voltaje y corriente por área en función de una resistencia externa variable a T-15 °C para la concentración inicial de 1980 mg de DQO

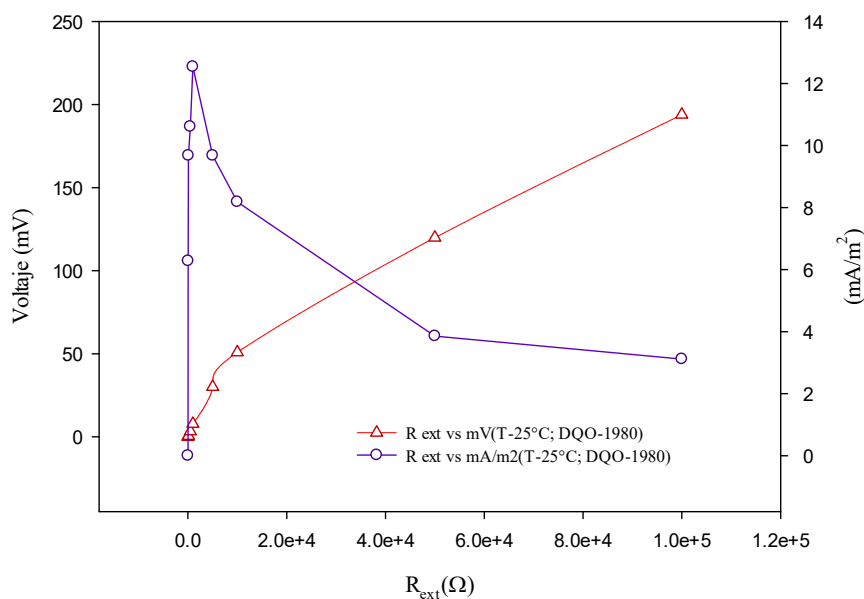


Figura 10. Voltaje y corriente por área en función de una resistencia externa variable a T-25 °C para la concentración inicial de 1980 mg/L de DQO

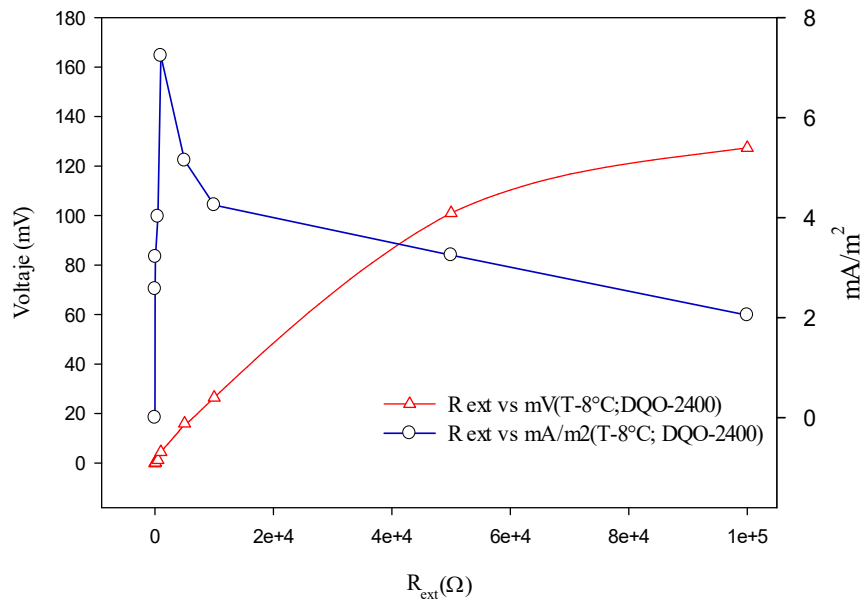


Figura 11. Voltaje y corriente por área en función de una resistencia externa variable a T-8 °C para la concentración inicial de 2400 mg/L de DQO

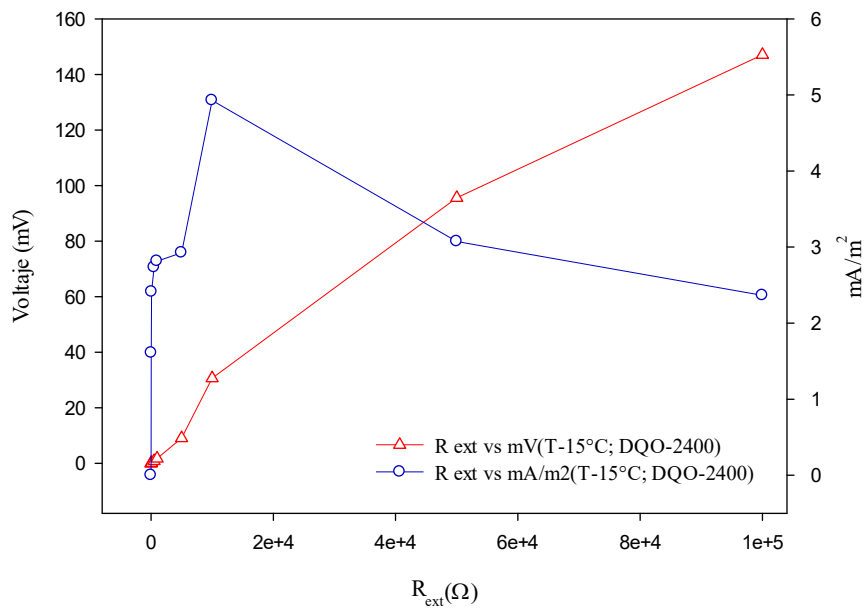


Figura 12. Voltaje y corriente por área en función de una resistencia externa variable a T-15 °C para la concentración inicial de 2400 mg/L de DQO

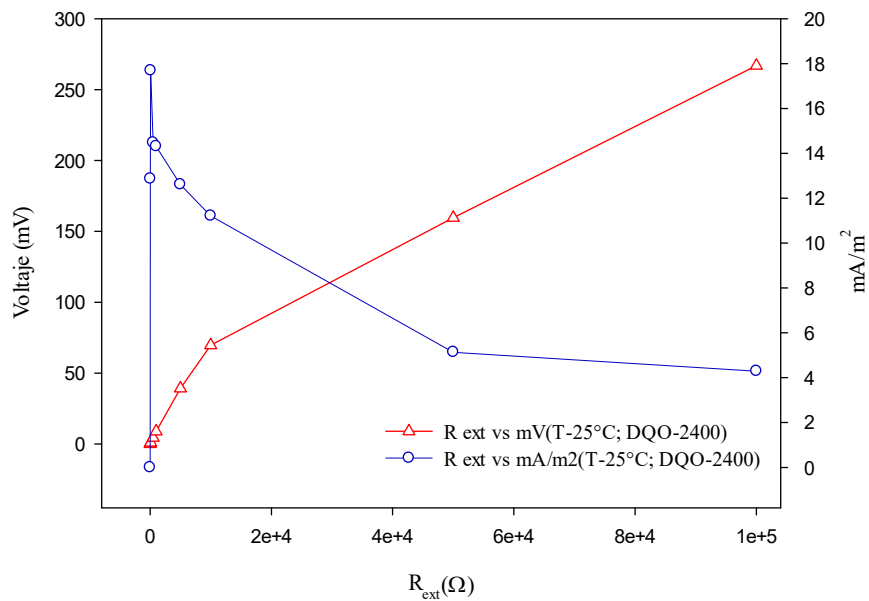


Figura 13. Voltaje y corriente por área en función de una resistencia externa variable a T-25 °C para la concentración inicial de 2400 mg/L de DQO

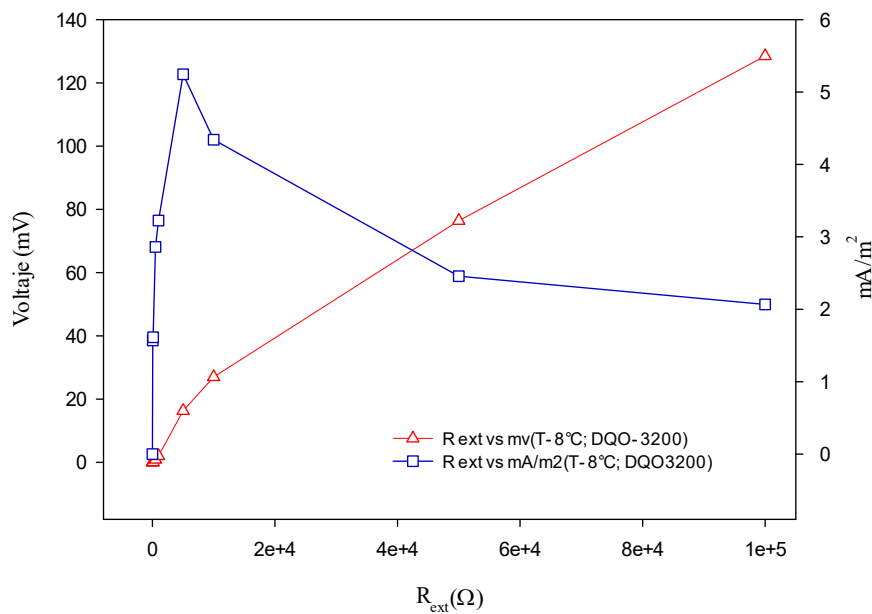


Figura 14. Voltaje y corriente por área en función de una resistencia externa variable a T-8 °C para la concentración inicial de 3200 mg/L de DQO

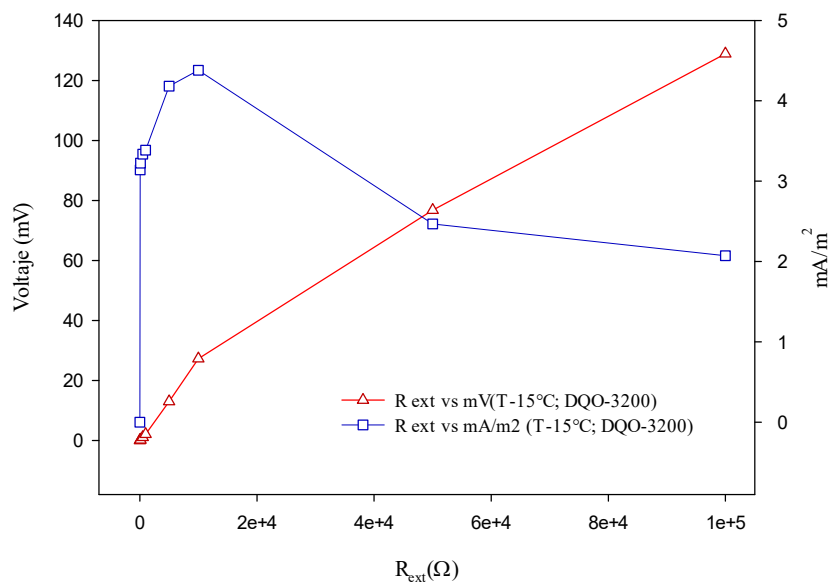


Figura 15. Voltaje y corriente por área en función de una resistencia externa variable a T-15 °C para la concentración inicial de 3200 mg/L de DQO.

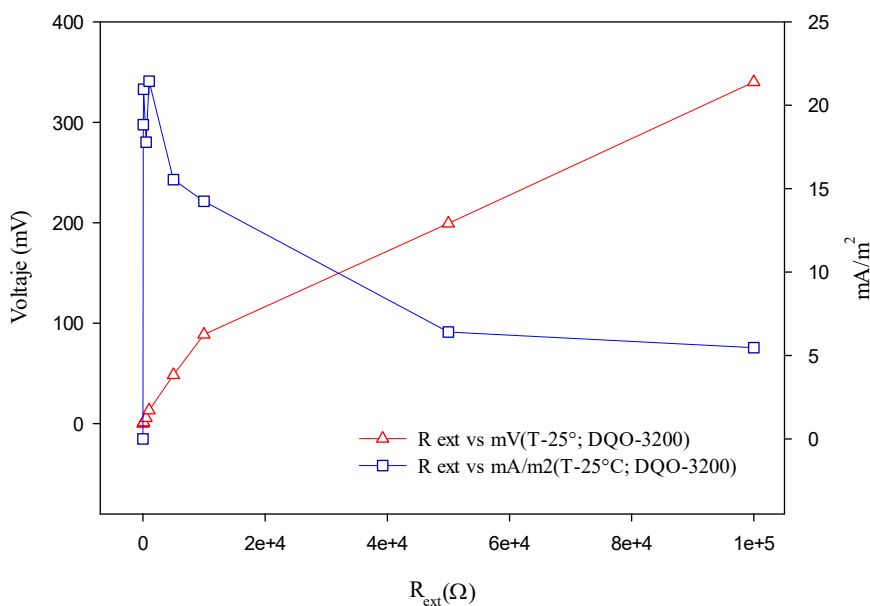


Figura 16. Voltaje y corriente por área en función de una resistencia externa variable a T-25 °C para la concentración inicial de 3200 mg/L de DQO.

La eficiencia de remoción de materia orgánica y eficiencia coulombica se muestra en la tabla 17 para las concentraciones iniciales en DQO 1980 mg/L, 2400 mg/L, 3200

mg/L en los tres casos a 25 °C se remueve la mayor cantidad de DQO representando el 93,94%; 86,89%, y 86,26% respectivamente, obteniéndose una eficiencia coulombica de 28,4%; 35,33% y 70,60% sucesivamente.

Tabla 19

Eficiencia de remoción y Eficiencia coulombica

Temperatura (°C)	DQO inicio (mg/L)	DQO Final (mg/L)	Eficiencia remoción (€ _R)	Eficiencia coulombica (€ _C)
8	1980	400	79,800%	15,110%
15	1980	160	91,920%	16,200%
25	1980	120	93,940%	28,400%
8	2400	500	79,170%	17,330%
15	2400	440	81,670%	24,670%
25	2400	320	86,890%	35,330%
8	3200	540	83,130%	17,940%
15	3200	520	83,750%	32,750%
25	3200	440	86,250%	70,690%

4.2.1 Análisis estadístico inferencial – Eficiencia coulombica y eficiencia de remoción a diferentes temperaturas

Para el análisis estadístico inferencial: se realizó mediante la tabla 19 utilizando el programa statgraphics.

Tabla 20

Diseño experimental cuadrados latinos para la eficacia coulombica y eficacia de remoción

Bloque	Temperatura	Concentración	Lugar	Eficiencia coulombica (€ _C)	Eficacia Remoción (€ _R)
1	1	3	2	17,935	83,125
1	1	2	3	17,334	79,166
1	2	3	3	32,745	83,750
1	2	1	2	16,195	91,919
1	2	2	1	24,671	81,666
1	3	3	1	70,692	86,250
1	3	2	2	35,329	86,885
1	1	1	1	15,113	79,797
1	3	1	3	28,404	93,939

ANOVA – Eficiencia coulombica (función a la temperatura)

Variable dependiente: EFICIENCIA COULOMBICA (%)

Factores:

Temperatura (°C)

Concentración (mg/L)

Lugar

Número de casos completos: 9

Tabla 21

Análisis de Varianza para efecto de la temperatura y concentración en la eficiencia coulombica- suma de cuadrados de tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos Principales					
A: Temperatura	1255,690	2	627,844	6,670	0,130
B: Concentración	672,431	2	336,216	3,570	0,218
C: lugar	309,711	2	154,856	1,650	0,378
Residuos	188,189	2	94,094		
Total (Corregido)	2426,020	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de eficiencia coulombica en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores -P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que ningún valor-P es menor que 0,05, ninguno de los factores tiene un efecto estadísticamente significativo sobre eficiencia coulombica con un 95,0% de nivel de confianza.

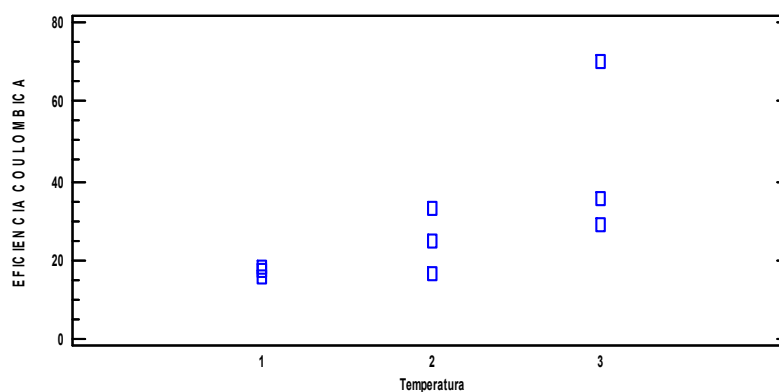


Figura 17. Dispersión por código de nivel eficiencia coulombica y temperatura.

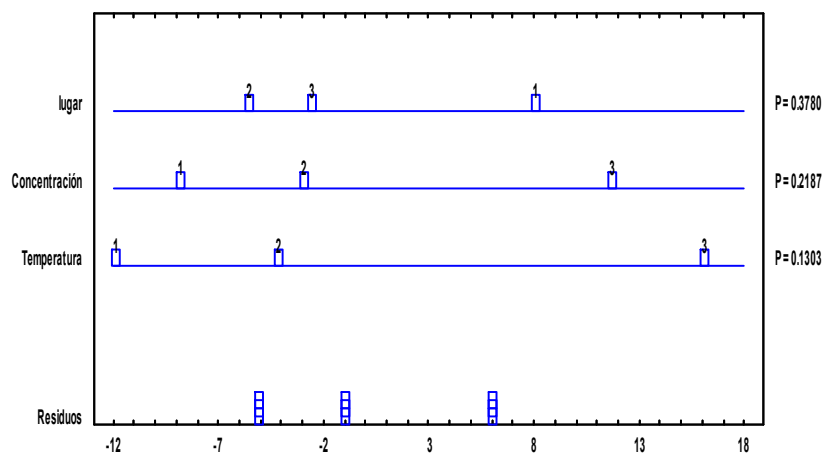


Figura 18. Anova eficiencia coulombica.

Análisis de Una Variable - eficiencia coulombica

Datos/Variable: eficiencia coulombica (%)

9 valores con rango desde 15,1135 a 70,693

Tabla 22

Resumen estadístico eficiencia coulombica en función de la temperatura

Recuento	9
Promedio	28,713
Desviación Estándar	17,414
Coefficiente de Variación	60,647%
Mínimo	15,113
Máximo	70,693
Rango	55,579
Sesgo Estandarizado	2,499
Curtosis Estandarizada	2,902

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para eficiencia coulombica. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor de sesgo estandarizado no se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada no se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

4.2.2 Prueba de Hipótesis para eficiencia coulombica

Media Muestral = 28,713

Mediana Muestral = 24,671

Desviación Estándar de la Muestra = 17,414

Prueba t

Hipótesis Nula: media = 0

Alternativa: no igual

Estadístico t = 4,946

Valor-P = **0,00112**

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

Prueba chi-cuadrada

Hipótesis Nula: $\sigma = 1,0$

Alternativa: no igual

Chi-cuadrado calculado = 2426,020

Valor-**P** = 0

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media de eficiencia coulombica es igual a 0,01 versus la hipótesis alterna de que la media de eficiencia coulombica es no igual a 0,05. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05; se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza.

La prueba de chi-cuadrada evalúa la hipótesis nula de que la desviación estándar de eficiencia coulombica es igual a 1,0 versus la hipótesis alterna de que la desviación estándar de eficiencia coulombica es no igual a 1,0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05; se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza.

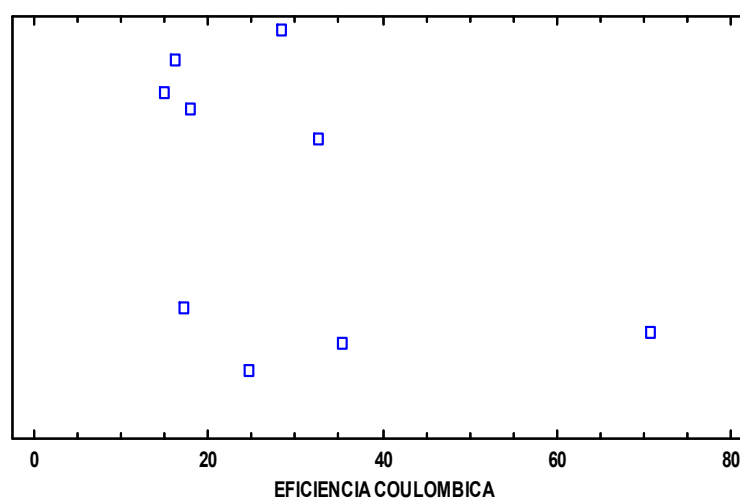


Figura 19. Dispersión eficiencia Coulombica – Temperatura

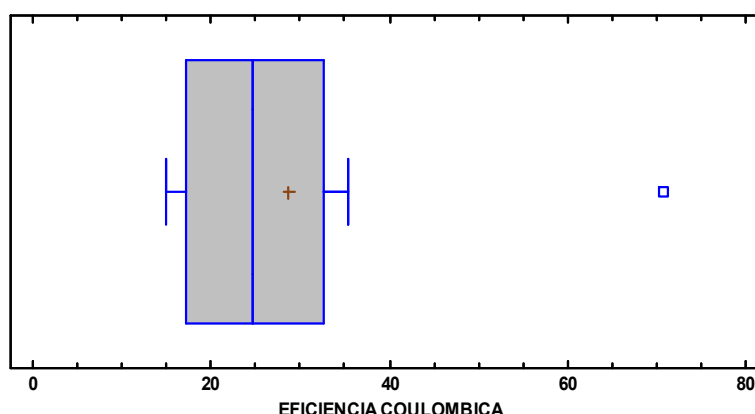


Figura 20. Caja y bigotes Eficiencia coulombica – Temperatura

ANOVA - DQO (EFICIENCIA DE REMOCIÓN)

Variable dependiente: DQO (eficiencia de remoción) (%)

Factores:

Temperatura (°C)

Concentración (mg/L)

lugar

Número de casos completos: 9

Tabla 23

Análisis de Varianza DQO (eficiencia de remoción) – Suma de cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos Principales					
A: Temperatura	105,727	2	52,863	8,030	0,110
B: Concentración	56,449	2	28,224	4,290	0,189
C: Lugar	34,596	2	17,298	2,630	0,275
Residuos	13,160	2	6,580		
Total (Corregido)	209,933	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que ningún valor-P es menor que 0,05; ninguno de los factores tiene un

efecto estadísticamente significativo sobre DQO (eficiencia de remoción) con un 95,0% de nivel de confianza.

Tabla 24

Pruebas de Múltiple Rangos para DQO (eficiencia de remoción) por Temperatura (Método: 95,0 porcentaje LSD)

Temperatura	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1	3	80,696	1,481	X
2	3	85,778	1,481	X
3	3	89,024	1,481	X

Tabla 25

Contraste de significancia de las muestras (remoción de concentraciones)

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1 – 2		-5,082	9,011
1 – 3		-8,328	9,011
2 – 3		-3,246	9,011

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las X's en columna. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

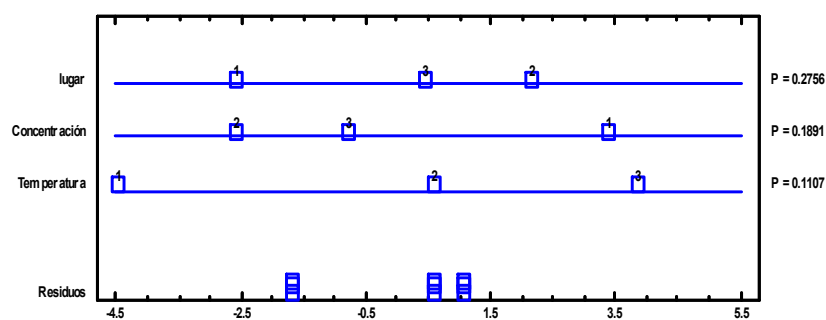


Figura 21. ANOVA para DQO eficiencia de remoción.

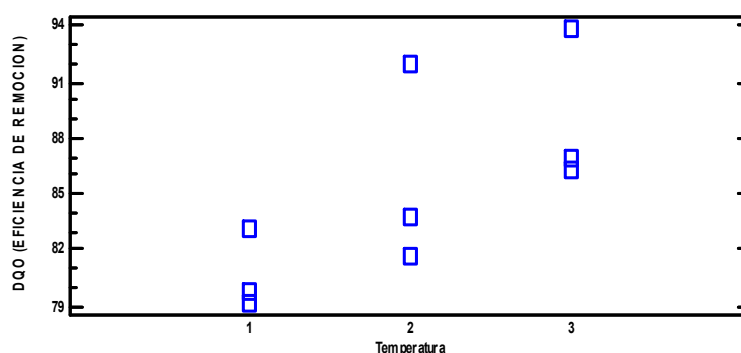


Figura 22. Dispersión por código de nivel eficiencia de remoción y temperatura

Análisis de Una Variable - DQO (EFICIENCIA DE REMOCIÓN)

Datos/Variable: DQO (EFICIENCIA DE REMOCIÓN) (%)

9 valores con rango desde 79,166 a 93,939

Tabla 26

Resumen estadístico para DQO (eficiencia de remoción)

Recuento	9
Promedio	85,166
Desviación Estándar	5,122
Coficiente de Variación	6,014%
Mínimo	79,166
Máximo	93,939
Rango	14,772
Sesgo Estandarizado	0,826
Curtosis Estandarizada	-0,343

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para DQO (EFICIENCIA DE REMOCIÓN). Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

4.2.3 Prueba de Hipótesis para DQO (Eficiencia de remoción)

Media Muestral = 85,166

Mediana Muestral = 83,750

Desviación Estándar de la Muestra = 5,122

Prueba t

Hipótesis Nula: media = 0

Alternativa: no igual

Estadístico t = 49,876

Valor-P = **2,890 x 10⁻¹¹**

Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05.

Prueba chi-cuadrada

Hipótesis Nula: sigma = 1,0

Alternativa: no igual

Chi-cuadrado calculado = 209,933

Valor-P = **0**

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0,05$.

Estos resultados de las pruebas relativas a la población de la cual procede la muestra de DQO (eficiencia de remoción). La prueba-t evalúa la hipótesis de que la media de DQO (eficiencia de remoción) es igual a 0,0 versus la hipótesis alterna de que la media de DQO (eficiencia de remoción) es no igual a 0,0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza. La prueba de los signos evalúa la hipótesis de que la mediana de DQO (eficiencia de remoción) es igual a 0,0 versus la hipótesis alterna de que la mediana DQO (eficiencia de remoción) es no igual a 0,0. Se basa en contar el número de valores arriba y abajo de la mediana hipotética. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza. La prueba de rangos con signo evalúa la hipótesis nula de que la mediana de DQO (eficiencia de remoción) es igual a 0,0 versus la hipótesis alterna de que la mediana DQO (eficiencia de remoción) es no igual a 0,0. Se basa en comparar los rankeos promedio de los valores arriba y abajo de la mediana hipotética. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05, se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza. La prueba del signo y la del signo con rango son menos sensibles a la presencia de valores aberrantes, pero son un tanto menos potentes que la prueba-t si todos los datos provienen de la misma distribución normal.

La prueba de chi-cuadrada evalúa la hipótesis nula de que la desviación estándar de DQO (eficiencia de remoción) es igual a 1,0 versus la hipótesis alterna de que la desviación estándar de DQO (eficiencia de remoción) es no igual a 1,0. Debido a que el valor-P para esta prueba es menor que 0,05; se puede rechazar la hipótesis nula con un 95,0% de confianza.

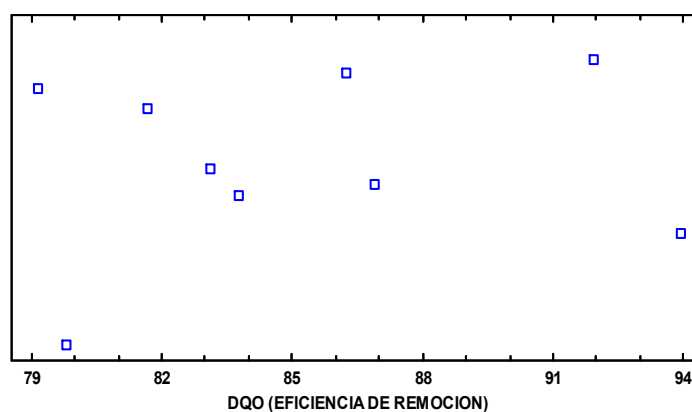


Figura 23. Dispersión (eficiencia de remoción)

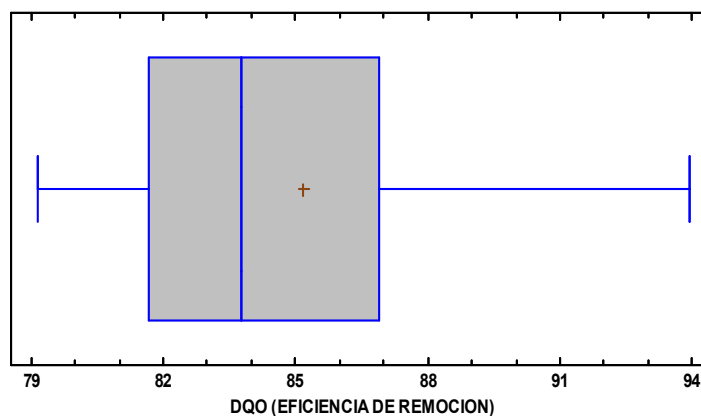


Figura 24. Caja y bigotes (eficiencia de remoción)

Análisis Multivariado

Tabla 27

Resumen Estadístico (Eficiencia coulombica y Eficiencia de Remoción)

	Eficiencia coulombica	Eficiencia remoción)
Recuento	9	9
Promedio	28,713	85,166
Desviación Estándar	17,414	5,122
Coefficiente de Variación	60,647%	6,014%
Mínimo	15,113	79,166
Máximo	70,693	93,939
Rango	55,579	14,772
Sesgo Estandarizado	2,499	0,826
Curtosis Estandarizada	2,902	-0,343

Esta tabla muestra el resumen estadístico para cada una de las variables seleccionadas. Incluye medidas de tendencia central, de variabilidad, y de forma. De particular interés aquí es el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden usarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, las cuales tenderían a invalidar muchos de los procedimientos estadísticos que se aplican habitualmente a estos datos. en este caso, las siguientes variables muestran valores de sesgo estandarizado y de curtosis estandarizada fuera del rango esperado:

Eficiencia coulombica

Las siguientes variables muestran curtosis estandarizada fuera del rango esperado:

Correlaciones

Tabla 28

Correlación de eficiencia Coulombica y eficiencia de remoción

	DQO (Eficiencia Remoción)	Eficiencia coulombica
Eficiencia Coulombica	0,1981 (9) 0,6095	
DQO (Eficiencia de Remoción)		0,1981 (9) 0,6095

Esta tabla muestra las correlaciones momento producto de Pearson, entre cada par de variables. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables. También se muestra, entre paréntesis, el número de pares de datos utilizados para calcular cada coeficiente. El tercer número en cada bloque de la tabla es un valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P abajo de 0,05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0%. Los siguientes pares de variables tienen valores-P por debajo de 0,05:

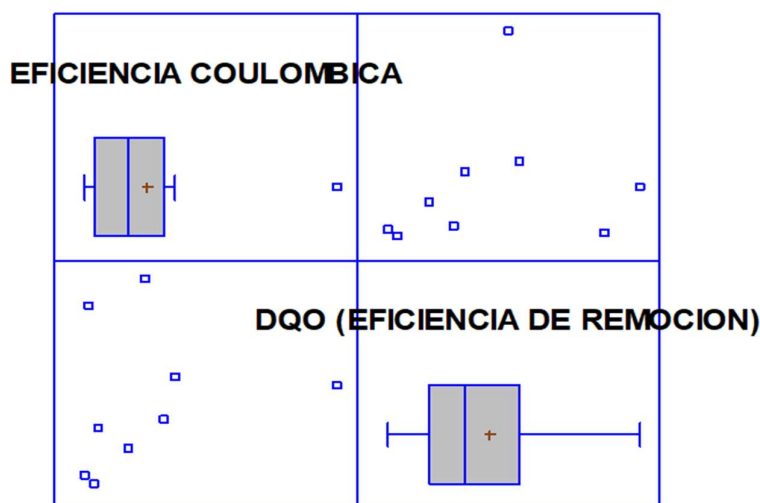


Figura 25. Caja y bigotes eficiencia coulombica versus eficiencia de remoción

4.3 Discusión

- La remoción de demanda química de oxígeno de 93% en aguas residuales de camal a una concentración inicial de 1980 mg/L, represento la más alta remoción y eficiencias coulombica de 18%, frente a lo obtenido a Lee, Chen, y Cai 2010, siendo valores próximos obtenidos frente a la remoción y de generación electricidad de aguas residuales de mercado de peces tratado por celdas de combustible microbiana, realizadas a flujo continuo con un tiempo de retención hidráulica acerca de 12 h, con variación de cargas orgánicas, de 110 mg/L a 478 mg/L cuyos resultados alcanzaron, eficiencias Coulombica de 1,5 y 3,4% y las eficiencias de remoción de materia orgánica oscilaron 40-74 %..
- La eficiencias de remoción de materia orgánica y eficiencias coulombica en las concentraciones iniciales en DQO 1980 mg/L, 2400 mg/L, 3200 mg/L en los tres casos a 25 °C se remueve la mayor cantidad de DQO representando el 93,94 %, 86,89 %, y 86.26% , alcanzando una eficiencia coulombica de 28,4 %; 35,3 3% y 70,60 % , frente a lo que utilizo Liu et al. 2004; de 50 - 220 mg/L en DQO, removiendo el 80 % de DQO, en flujo continuo de 4,5 – 5,5 L/mín. y la eficiencia coulombica fue de 12%, siendo estos valores próximos a los obtenidos.
- El uso de temperaturas de 8, 15, 25 °C en las celdas presenta eficiencias coulombica máximas alcanzadas de 70 % para la concentración de 3200 mg/L y eficacia de remoción en DQO de 93 % para la concentración de 1980 mg/L a 25 °C, frente a lo obtenido por Larrosa-Guerrero et al. 2010 que realizo estudios en aguas residuales en una cervecería, diluido en aguas residuales domésticas con demandas químicas solubles iniciales de oxígeno de 1200 y 492 mg/L, a temperaturas bajas de 4, 8 y 15 °C, en el que las diferencias de eficiencias coulombica se volvieron insignificantes frente a temperaturas superiores a 20, 25, 30 y 35 °C. obteniendo eficiencia coulombica de 58 % y 94% de remoción con cámara contenidas de tela de carbón en los cátodos, por lo que estos resultados son aproximados a los que se obtuvo por variación de temperatura concentración.

CONCLUSIONES

- La influencia de la concentración de sustratos en aguas residuales del camal Azoguine, en la eficiencia generación de energía eléctrica en una CCM, es que a mayores concentraciones de sustratos, requiere mayor tiempo para que el voltaje se haga constante (17, 18 y 20 días), y por lo tanto esto influye en la generación de corriente y por ende en el rendimiento de la generación de energía eléctrica, obteniéndose como máximo la eficiencia coulombica para la concentraciones en demanda química de oxígeno de: 1980 mg/L, el 18,990%, en 2400 mg/L el 21,053% y 3200 mg/L el 22,066% de eficiencia coulombica . La tasa de remoción de DQO no implica la totalidad de la generación de energía eléctrica aportada por lo que se concluye que solo en promedio del 20% de eficiencia coulombica se usa para la generación de energía eléctrica a estas condiciones ambientales. Por lo mencionado se acepta la hipótesis alterna en donde el valor de Pearson obtenido ($P = 2,044 \times 10^{-9}$) es muy cercano al 0, por lo que se acepta la hipótesis alterna, ya que al menos, uno de los tratamientos produce efectos diferentes, por lo que se concluye que la concentración de sustratos del agua residual si influye en la generación de energía eléctrica en una CCM.
- En la determinación de la temperatura adecuada para la generación de energía eléctrica y remoción de la materia orgánica en las aguas residuales del camal Azoguine de las temperaturas de 8, 15 y 25 °C ; la de 25 °C alcanzo eficiencias coulombica altas de 28,4%; 35,33% y 70,69% para las demandas químicas de 1980 mg/L, 2400 mg/L y 3200 mg/L respectivamente, manifestándose que el proceso de oxidación del sustrato en el ánodo, está relacionado directamente por la influencia de la temperatura, en la generación de energía eléctrica. En la remoción de materia orgánica e inorgánica (DQO), se alcanzó a la temperatura de

25 °C, las eficiencias de remoción más altas de 93,94%; 86,89%; y 86,25% para las concentraciones de 1980 mg/L, 2400 mg/L y 3200 mg/L respectivamente. Por lo que la temperatura de 25 °C es la óptima, en eficiencia coulombica y eficiencias de remoción. Por lo mencionado se acepta la hipótesis alterna cuyo valor de Pearson ($P=2,890 \times 10^{-11}$) es aproximadamente igual 0, por lo que la variable temperatura es un parámetro influyente en la generación de energía eléctrica y remoción de materia orgánica de la CCM en aguas residuales del camal.

RECOMENDACIONES

- Realizar estudios para determinar la relación de concentración de aguas residuales puras con sangre sin contenido de estiércol, con mezclas de estiércol, ya que estas influyen en la polarización de las celdas de combustible microbiana.
- Aplicar otros prototipos de celdas de combustible microbiana con diferentes puentes de intercambio de protones en el que se pueda optimizar la eficiencia coulombica y la remoción de materia orgánica. Como también determinar el intervalo de temperatura y concentración en el cual se tiene el mayor porcentaje el proceso de metanogénesis, ya que este proceso no permitirá que exista generación de energía eléctrica eficiente.
- Desarrollar e implementar las celdas de combustible microbiana a nivel planta piloto en el tratamiento de aguas residuales de camal como un proceso autónomo que genere energía eléctrica y al mismo tiempo realice la remoción de materia orgánica.

BIBLIOGRAFÍA

- Ambiente, L. G. del. (2009). Límites Máximos Permisibles (LMP) Para efluentes Beneficio, Actividades Agroindustriales tales como Planta de Camales, 8. <https://doi.org/28817>
- Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (1944). *Electrochemical Methods Fundamentals and Applications. Electrochemistry. I. Faulkner, Larry R.* <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381373-2.00056-9>
- Briseño, R. A., & Sánchez, G. G. (2013). Generación de electricidad en una celda de combustible microbiano. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/228414212%0AProduction>
- Dong, Y., Qu, Y., He, W., Du, Y., Liu, J., Han, X., & Feng, Y. (2015). A 90-liter stackable baffled microbial fuel cell for brewery wastewater treatment based on energy self-sufficient mode. *Bioresource Technology*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.026>
- Fernández, M., Lizcano, W., & Bravo, E. (2012). Actividad Electrogénica de lodos del Lago de la Universidad del Valle, 161–167. Retrieved from http://revistaciencias.univalle.edu.co/volumenes/vol_16/WLizcano.pdf
- Ge, Z., Wu, L., Zhang, F., & He, Z. (2015). Energy extraction from a large-scale microbial fuel cell system treating municipal wastewater. *Journal of Power Sources*, 297. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.07.105>
- Gude, V. G. (2016). Wastewater treatment in microbial fuel cells - An overview. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.022>

- Larrosa-Guerrero, A., Scott, K., Head, I., Mateo, F., Ginesta, A., & Godinez, C. (2010). Effect of temperature on the performance of microbial fuel cells. *Fuel*, 3985–3994. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.06.025>
- Lee, C., Chen, J., & Cai, Y. (2010). Bioelectricity generation and organic removal in microbial fuel cells used for treatment of wastewater from Fish-Market, 20(3), 173–180.
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., ... Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: Methodology and technology. *Environmental Science and Technology*, 40(17), 5181–5192. <https://doi.org/10.1021/es0605016>
- Logroño, W., Echeverría, M., Recalde, C., & Graziani, P. (2015). Bioconversion of organic solid wastes with soils from the Amazonian and high Andean regions of Ecuador in single chamber microbial fuel cells. *Informacion Tecnologica*. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000200008>
- Martin, E., Savadogo, O., Guiot, S. R., & Tartakovsky, B. (2010). The influence of operational conditions on the performance of a microbial fuel cell seeded with mesophilic anaerobic sludge. *Biochemical Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2010.06.006>
- Medina, S., & Zapata, M. (2017). *Evaluación de la producción de energía eléctrica y disminución de DQO en agua residual sintética mediante celdas de combustible microbianas a escala laboratorio*. Arizona. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/23301179%0AElectricity>
- Mejía, A., Vásquez, J., & González, A. (2012). Bacterias, fuente de energía para el futuro. *Tecnura*, (32), 118–143. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v16n32/v16n32a11.pdf>
- Min, B., Cheng, S., & Logan, B. E. (2005). Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. *Water Research*, 39(9), 1675–1686. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.02.002>
- Molognoni, D., & Technological, L. (2015). *Microbial Fuel Cells Application to Wastewater Treatment : laboratory experience and controlling strategies*.

- University of Pavia. Retrieved from
<https://www.researchgate.net/publication/279446741%0AMicrobial>
- Montgomery, D. (2009). *Diseño y análisis de experimentos*. (S. A. LIMUSA, Ed.), *Limusa wiley* (segunda, Vol. 65). México. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00005-2)
- Muñoz, D. (2000). Sistema De Tratamiento De Aguas Residuales De Matadero : Para Una Población Menor 2000 Habitantes. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 3(1), 87–98. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6117975>
- Núñez, A. (2008). Bacterias productoras de electricidad. *Actualidad SEM*, 1–6. Retrieved from <http://www.semicrobiologia.org/pdf/actualidad/45/Geobacter.pdf>
- OEFA, F. A. (2017). *Fiscalización ambiental en Aguas Residuales*. San Isidro - Lima - Perú. Retrieved from www.oefa.gob.pe
- Quille, G., & Donaires, T. (2013). Tratamientos de efluentes líquidos y sólidos de Camal Municipal ILAVE. *Revista Investigaciones Altoandinas*, 15, 65–72. <https://doi.org/10.18271/ria.2013.17>
- Rabaey, K., Lissens, G., Siciliano, S. D., & Verstraete, W. (2003). A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. *Biotechnology Letters*. <https://doi.org/10.1023/A:1025484009367>
- 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), 7–8. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>
- Rismani-Yazdi, H., Christy, A. D., Carver, S. M., Yu, Z., Dehority, B. A., & Tuovinen, O. H. (2011). Effect of external resistance on bacterial diversity and metabolism in cellulose-fed microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 102(1), 278–283. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.012>
- Salar, M., Ortiz, V., Hernandez, F., Sánchez, S., & Lozano, L. (2014). Pilas de combustible microbianas : Factores clave para su diseño, (Figura 1), 1–11. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.6036/ES7081>

- SINIA, S. N. de I. A. (2017). datos estadisticos aguas residuales
<https://datos%20estadisticos%20aguas%20residuales.htm>.
- Zhang, Q., Hu, J., & Lee, D. J. (2016). Microbial fuel cells as pollutant treatment units: Research updates. *Bioresource Technology*.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.006>
- Zhang, X., He, W., Ren, L., Stager, J., Evans, P. J., & Logan, B. E. (2015). COD removal characteristics in air-cathode microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.001>
- Zhi, W., Ge, Z., He, Z., & Zhang, H. (2014). Methods for understanding microbial community structures and functions in microbial fuel cells: A review. *Bioresource Technology*, 171. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.096>



ANEXOS

Anexo 1 Evidencias Fotograficas



Figura 26. Matracas Erlenmeyers acondicionados como CCM



Figura 27. Electrodo de grafito preparados para su uso



Figura 28. Punto donde se tomarón las muestra de agua residual del camal de Azoguine



Figura 29. Preparación del puente salino y acondicionamiento al tubo en U



Figura 30. Preparación de las muestras de agua residual e inoculación en el ánodo de la CCM



Figura 31. Funcionamiento de las CCM durante el proceso de experimentación.