

**Efecto de la resistencia externa y área superficial del electrodo de grafito en la biodegradación de la materia orgánica y generación de bioelectricidad en celdas de combustible microbiano**

**Effect of the external resistance and surface area of graphite electrode on biodegradation of organic matter and generation of bioelectricity in microbial fuel cells**

Gustavo Torres-Zamata<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0844-4752>

Aracel Erica Condori-Pacheco<sup>2</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3105-6686>

Joel Hugo Fernández-Rojas<sup>3</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1761-2818>

Noé Benjamín Pampa-Quispe<sup>4</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8072-249X>

<sup>1</sup>Universidad Peruana Unión, Escuela de Ingeniería Ambiental, Chosica, Perú, [gustavotorres@upeu.edu.pe](mailto:gustavotorres@upeu.edu.pe)

<sup>2</sup>Universidad Peruana Unión, Escuela de Ingeniería Ambiental, Chosica, Perú, [aracelcondori@upeu.edu.pe](mailto:aracelcondori@upeu.edu.pe)

<sup>3</sup>Universidad Peruana Unión, Escuela de Ingeniería Ambiental, Chosica, Perú, hugof@upeu.edu.pe

<sup>4</sup>Universidad Peruana Unión, Chosica, Perú; y Universidad Nacional de Barranca, Departamento de Ingeniería, Barranca, Perú, npampa@unab.edu.pe

Autor para correspondencia: Noé Benjamín Pampa-Quispe, npampa@unab.edu.pe

## Resumen

Las celdas de combustible microbiano (CCM) es una tecnología emergente para la generación de energía eléctrica a partir de materia biodegradable, teniendo como catalizador a los microorganismos. El objetivo fue evaluar la generación de bioelectricidad y remoción de la materia orgánica en las celdas de combustible microbiano (CCM) a partir del agua residual doméstica (ARD). Se operaron cinco CCM de doble cámara (anaerobia y aerobia) de tipo "H" a escala laboratorio de flujo batch, con volumen de 1 700 ml; las cámaras se conectaron a través de un puente salino (NCL y Agar Agar); se utilizaron electrodos de grafito (ánodo y cátodo) conectados por un cable de cobre como conductor eléctrico a una resistencia externa fija. Para evaluar la remoción de la materia orgánica, se trabajó con ARD de diferentes concentraciones de DQO y para el desempeño eléctrico se trabajó con tres áreas superficiales de electrodo y resistencias externas. Mediante ANOVA factorial y diseño factorial 2<sup>2</sup> al 95% nivel de confianza, la interacción de resistencia externa y área superficial del electrodo fueron significativas.

La CCM2 destacó frente a las demás CCM al trabajar con resistencia de  $50 \Omega$  y área superficial de electrodo ( $A_{ST}$ -grafito) de  $151 \text{ cm}^2$ , generando un voltaje promedio de 380 mV y 82.3% de eficiencia de remoción (DQO). Al trabajar con resistencias menores y mayor área superficial de electrodo en la CCM, se obtuvo una mayor generación de bioelectricidad y remoción de la materia orgánica a partir del agua residual doméstica (ARD), demostrando la viabilidad y sostenibilidad.

**Palabras clave:** agua residual doméstica, bioelectricidad, celdas de combustible microbiana.

### Abstract

The microbial fuel cells (CCM) is an emerging technology for generation of electrical energy from biodegradable matter, having as catalyst the microorganisms. The objective was to evaluate the generation of bioelectricity and the removal of organic matter in the Microbial Fuel Cells (CCM) from domestic wastewater (ARD). To do this, 5 CCM of double chamber (anaerobic and aerobic) of type "H" were operated at laboratory scale of batch flow, with volume of 1 700 ml, the chambers were connected through a salt bridge (NCL and Agar Agar), electrodes were used of graphite (anode and cathode) connected by a copper cable as an electrical conductor to a fixed external resistance. To evaluate the removal of organic matter, we worked with ARD of different concentrations of COD and for electrical performance, we worked with 3 surface areas of the electrode and external residences. Using Factor ANOVA and Factorial Design  $2^2$  at 95% confidence level, the interaction of external resistance and surface area of the electrode were significant.

The CCM2 stood out against the other CCMs when working with resistance of  $50 \Omega$  and surface area of electrode ( $A_{ST}$ -Grafito) of  $151 \text{ cm}^2$ , generating an average voltage of 380 mV and 82.3% removal efficiencies (COD). To the by working at lower resistances and greater surface area of the electrode in the CCM, a greater generation of bioelectricity and removal of organic matter from domestic wastewater (ARD) will be obtained, demonstrating the viability and sustainability.

**Keywords:** Domestic wastewater, bioelectricity, microbial fuel cells.

Recibido: 21/03/2019

Aceptado: 26/02/2020

## Introducción

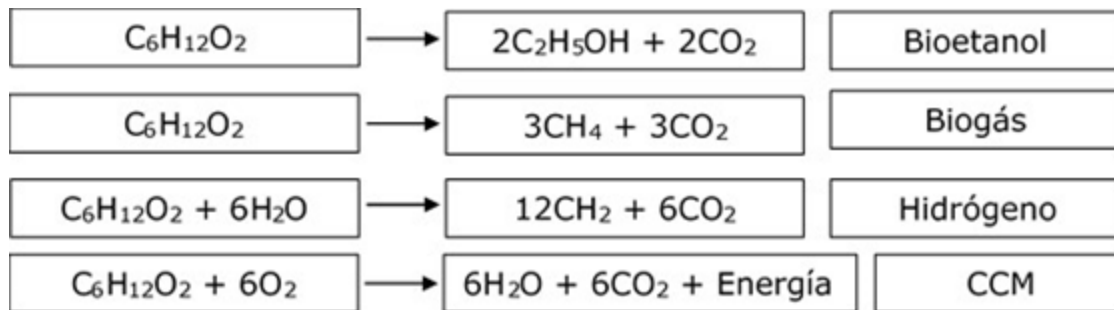
El crecimiento poblacional y el desarrollo urbano han dado origen a problemas ambientales, especialmente al incremento de caudales de aguas residuales, las cuales son vertidas a los cuerpos receptores (lagos, ríos, mares, lagunas) a veces sin ningún tratamiento lo que genera impactos negativos sobre la salud pública y el medio ambiente (Bernal, Cardona, Galvis, & Peña, 2003; Naranjo, 2011). En el Perú, el Instituto Nacional de Estadística e informática (INEI), en 2016 informó

que 308 207 653 m<sup>3</sup> de aguas residuales domésticas se descargaron sin tratamiento al medio ambiente (INEI, 2018) y 2 217 946 m<sup>3</sup> por día de aguas residuales se descargaron a la red de alcantarillado de la Entidad Prestadora de Servicios de Saneamiento (EPS Saneamiento); sólo 32% recibe tratamiento de aguas residuales (OEFA, 2014). Al realizar el tratamiento del agua residual con el uso de tecnologías convencionales, éstas operan y utilizan el proceso aerobio, presentando altos gastos de capital, operacionales y de energía (You, Zhao, Jiang, Zhang, & Zhao, 2006). Dicho proceso es un alto consumidor de energía, la cual es esencial para la aireación del sistema. En general, se necesita 1 kWh de energía para la oxidación de la materia orgánica que contiene un kilogramo de carbono presente en el agua, esto es, alrededor de 0.5 kWh por m<sup>3</sup> de agua residual a tratar (Buitrón & Pérez, 2011). La materia orgánica es uno de los contaminantes más comunes en las aguas residuales, sin embargo su aprovechamiento energético es nulo en la actualidad. Por este motivo, entre otros, la tecnología de las celdas de combustible microbiano (MFC por sus siglas en inglés, *Microbial Fuel Cell*), se muestra a futuro como una fuente alternativa de energía, con el beneficio de poder eliminar compuestos tóxicos del ambiente o disminuir los niveles de materia orgánica que son vertidos a las fuentes de agua (Zhou, Wang, Hassett, & Gu, 2013). El propósito de este sistema no sería competir con las tecnologías existentes para generar electricidad a gran escala, sino tratar el agua residual y obtener durante tal proceso un producto de valor agregado. Es decir, ver el tratamiento del agua no sólo como algo necesario para la sustentabilidad, sino también como un proceso que valoriza la materia orgánica presente.

Las celdas de combustible microbiano es un dispositivo electroquímico que se encarga de convertir energía bioquímica a energía eléctrica mediante microorganismos que actúan como biocatalizadores sobre la materia orgánica biodegradable (Logan & Regan, 2006; Fan, Hu, & Liu, 2007; Logan, 2009). Las MFC se componen de una o dos cámaras que tienen electrodos ánodo y cátodo; en el ánodo se forma la biopelícula microbiana capaz de degradar sustratos energéticos; producto del metabolismo microbiano, se oxidan compuestos en la cámara del ánodo, produciendo  $\text{CO}_2$ , protones ( $\text{H}^+$ ) y electrones ( $\text{e}^-$ ); estos últimos son transportados desde el ánodo hasta el cátodo mediante un circuito externo. Los electrones, junto con los protones, son reducidos a agua en el cátodo, generando energía eléctrica mediante la formación de un gradiente electrónico (Logan & Rabaey, 2012).

A partir de la biomasa orgánica presente en residuos sólidos y líquidos se puede obtener una variedad de combustibles y subproductos, siendo la glucosa la principal fuente de carbono (Logan, 2004; He & Angenent, 2006; Alzate, Sebastian, & Pérez, 2007).

Entre las reacciones estequiometrias principales del metabolismo fermentativo microbiológico están las que se muestran en la Figura 1.



**Figura 1.** Metabolismo fermentativo microbológico.

La CCM presenta ventajas funcionales y operacionales sobre otras tecnologías: permite la conversión directa de un sustrato energético en electricidad, logrando la remoción de materia orgánica y de partículas contaminantes en fuentes de agua; puede operar de manera eficiente en condiciones ambientales, incluso a bajas temperaturas de hasta 5 °C; produce 10 veces menos lodos; no genera emisiones de gases contaminantes, pues la única emisión de gases es CO<sub>2</sub>, que retorna a la atmósfera; tiene el potencial de ser utilizado en lugares carentes de infraestructura eléctrica, y no presenta peligro para su operación (Rabaey & Verstraete, 2005; You *et al.*, 2006).

Entendiendo la importancia de la biodegradación de la materia orgánica presente en el agua residual doméstica y la valorización energética, en el presente trabajo se evaluó el efecto de la resistencia externa y el área superficial del electrodo de grafito en la biodegradación de la materia orgánica y generación de bioelectricidad en celdas de combustible microbiano, que utilizó agua residual doméstica como sustrato.

## **Materiales y métodos**

### **Lugar de ejecución**

Esta investigación se ejecutó en las instalaciones del laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana Unión, situada en el km 19.5 carretera central Ñaña, Lima, Perú, con coordenadas geográficas UTM 11° 59 ' 24" sur y 76° 50 ' 29" oeste.

### **Celdas de combustible microbiano (CCM)**

Se construyeron cinco CCM de vidrio a escala laboratorio, con una configuración de doble cámara (ánodo y cátodo) tipo "H" (Du, Li, & Gu, 2007) y volumen útil de 1 700 ml. Las cámaras estuvieron unidas por un puente salino (puente de intercambio de protones) de área transversal de 9.6 cm<sup>2</sup> y 5 cm de longitud (Buitrón & Pérez, 2011); la solución



salina de electrolito fue el NaCl al 10% y agar-agar al 5%, que previenen el intercambio físico de cualquier fluido presente en las cámaras anódica y catódica (Kumar & Babu, 2012).

Para los electrodos ánodo y cátodo se utilizaron barras de grafito conectadas a un cable cobre y a una resistencia externa. En la Tabla 1 se detalla las configuraciones de las cinco celdas de combustible microbiano.

**Tabla 1.** Configuración de las celdas de combustible microbiano.

<b>Celdas</b>	<b>Resistencia externa (<math>\Omega</math>)</b>	<b>A<sub>ST</sub>-grafito (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Longitud del electrodo grafito (cm)</b>
CCM1	150	151	18
CCM2	50	151	18
CCM3	50	73	8
CCM4	150	73	8
CCM5	100	112	13

## Inóculo de microorganismo

El inóculo de microorganismo se obtuvo de un reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos UASB (por sus siglas en inglés) del Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos (CITRAR), ubicado en la Universidad Nacional de Ingeniería

(UNI), Perú. Antes del uso de los electrodos de grafitos, se lavaron en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 1M y posteriormente en ácido clorhídrico (HCL) 1M; por último, se lavaron con agua destilada. Todo ello para eliminar todos los rastros de partícula de grafito, pues impiden la formación de la biopelícula de los microorganismos electrogénicos (Chaudhuri & Lovley, 2003). La aclimatación para la formación de la biopelícula de microorganismos electrogénicos se llevó a cabo según Alzate Fuentes, Alvarez y Sebastian (2008); los electrodos se colocaron en cuatro frascos de vidrio de capacidad de 1 700 ml; se les agregó 600 ml de lodo anaerobio como consorcio microbiano, y 1 000 ml de agua residual doméstica como sustrato; se colocaron en una incubadora a 35 °C por 15 días; se homogenizaba la muestra cada dos días. Esto permitió colonizar los electrodos ánodo con el consorcio microbiano, a fin de formar un biofilm, es decir, una comunidad compleja de microorganismos que se adhieren al electrodo y producen un polímero celular como recubrimiento, que les ayuda a retener el alimento y a protegerse de agentes tóxicos, para finalmente producir bioelectricidad (Alzate *et al.*, 2008).

## **Operación de las celdas de combustible microbiano**

Las cinco CCM tuvieron tres repeticiones. Las cámaras anódicas se alimentaron con agua residual doméstica con sustrato (materia orgánica

presente en el agua residual) proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Santa Clara, Lima; la cámara catódica contenía agua destilada expuesta al medio ambiente y fue aireada con un aireador de pecera.

Para el análisis del desempeño eléctrico de este sistema se registró el voltaje mediante un multímetro digital PRASEK PREMIUM PR-36, auto rango (valor real) de alta precisión, con interfaz de "USB" conectada a una computadora, cuyos datos se almacenaron en intervalos de un minuto por un periodo 216 horas/repetición.

## Diseño estadístico

Se empleó el diseño experimental factorial  $2^2$ , con punto central, que radica cuatro puntos factoriales y un punto central, totalizando 10 tratamientos. Se evaluaron las variables independientes: resistencia ( $\Omega$ ) y área superficial del electrodo de grafito ( $\text{cm}^2$ ). La variable de respuesta fue la generación de bioelectricidad (mV). Los rangos y niveles de las variables independientes usados en la forma codificada y no codificada en este estudio se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Diseño factorial variable codificada y no codificada para la obtención de resultados de bioelectricidad  $2^2$ .

Tratamiento	Variables independientes				Variable Dependiente
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Voltaje (mV)	A <sub>ST-grafito</sub> (cm <sup>2</sup> )	Voltaje (mV)
1	-1	-1	50	73	-
2	-1	1	50	151	-
3	1	-1	150	73	-
4	1	1	150	151	-
5	0	0	100	112	-

Los experimentos se realizaron en orden y los datos se estudiaron por análisis de varianza, normalidad, para comparar el efecto de los tratamientos. Los parámetros del modelo de primer orden de los efectos para el diseño factorial de dos factores será (Montgomery, 2004; Rodrigues & Iemma, 2015):

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

Donde (y) es la respuesta predicha medida;  $\beta_0$ , el intercepto;  $\beta_i$  y  $\beta_{ij}$ , los coeficientes del modelo lineal e interacción; y  $X_i$  y  $X_j$  son los valores codificados de las variables independientes.

## Análisis estadístico

La elaboración y el análisis de los diseños experimentales se llevaron a cabo con el *software Statistica* versión 13.1, licencia, edición de evaluación gratuita. Todos los análisis estadísticos se realizaron en un nivel de significancia de 95% ( $p \leq 0.05$ ). Los gráficos de contorno y superficie de respuesta se usaron para mostrar la relación entre la respuesta y los niveles de cada variable independiente, y deducir las condiciones óptimas.

## Prueba de normalidad de la DQO

Para facilitar información con altas bases de confiabilidad de la normalidad de datos se empleó la prueba de Shapiro-Wilk, pues se utiliza para comprobar si los datos se extrajeron de una muestra normal y de un muestreo aleatorio; en esta prueba, los parámetros a evaluar son la media y la desviación típica; dicha prueba es aplicable para muestras pequeñas, las cuales son menores de 30 muestreos ( $n < 30$ ) (Shapiro & Wilk, 1965).

Después se evaluó si existen diferencias significativas entre el antes y después del parámetro químico (DQO), aplicando la prueba de *T-student* para muestras relacionadas.

## Resultados

### Generación de bioelectricidad en la de operación de las CCM

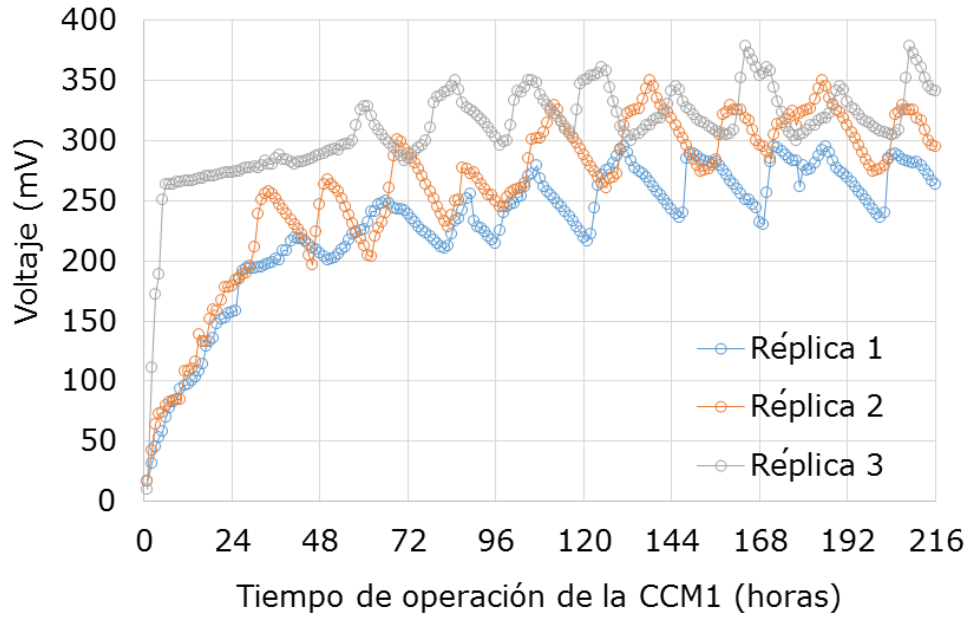
Se monitoreo la generación de electricidad durante un periodo de 27 días (nueve días por cada repetición). En la Tabla 3 se observa los voltajes máximos/minuto registrados para cada una de las celdas de combustible microbiano.

**Tabla 3.** Voltajes máximos registrados en las celdas de combustible microbiano para cada repetición.

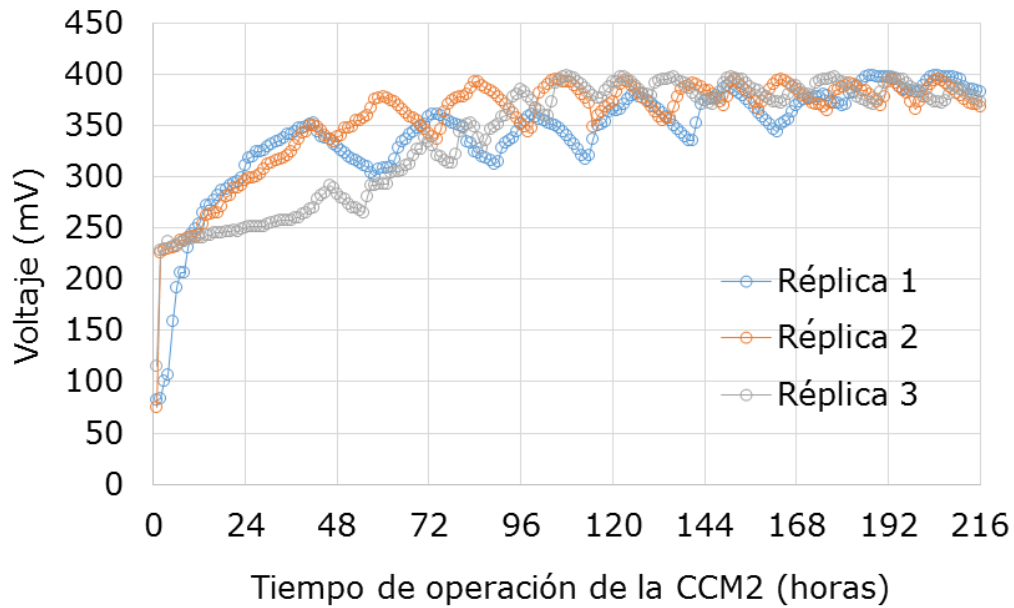
Celdas	Voltaje (mV/min)		
	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
CCM1	342.2	383.0	383.0

CCM2	399.5	399.8	400.0
CCM3	340.0	380.0	400.0
CCM4	320.0	400.0	400.0
CCM5	400.0	400.0	359.0

En la Figura 2, Figura 3, Figura 4, Figura 5 y Figura 6 se presenta el comportamiento cinético del voltaje registrado durante las 216 horas de operación de las CCM. Cuando se realizó la alimentación con ARD a las cámaras anódicas de las CCM, se observó que el voltaje tuvo dos comportamientos. Primero, el voltaje se incrementó de manera constante de 10.3 a 358 mV en 24 horas, después siguió un comportamiento oscilatorio en las tres réplicas y además todas mostraron un patrón de salida de voltaje similar. De ahí empezó a entrar a una etapa oscilatoria, comportamiento que se mantuvo durante los tres días finales. Así, el sustrato en la cámara anaerobia se reemplazó, iniciando una nueva réplica.

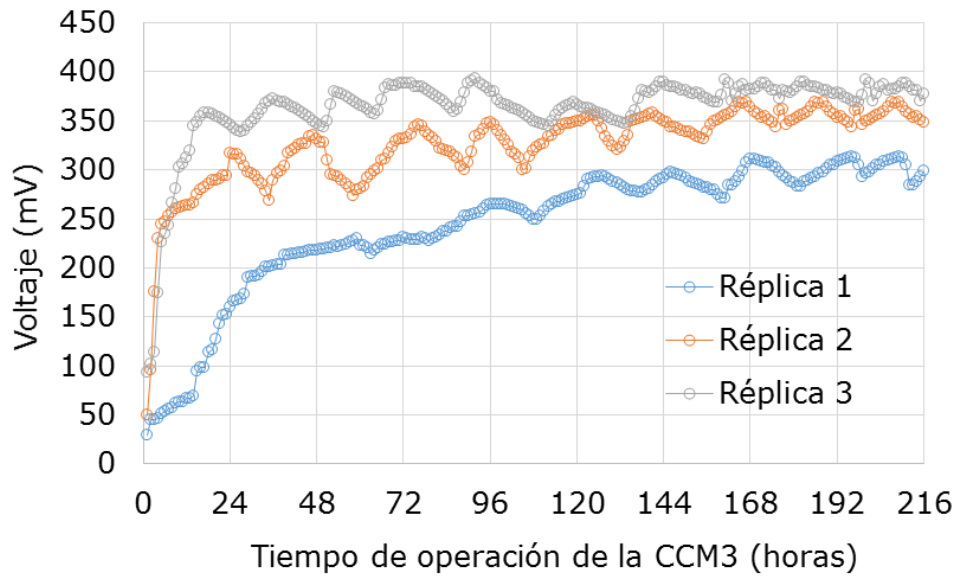


**Figura 2.** Comportamiento de voltaje registrado en la CCM1.

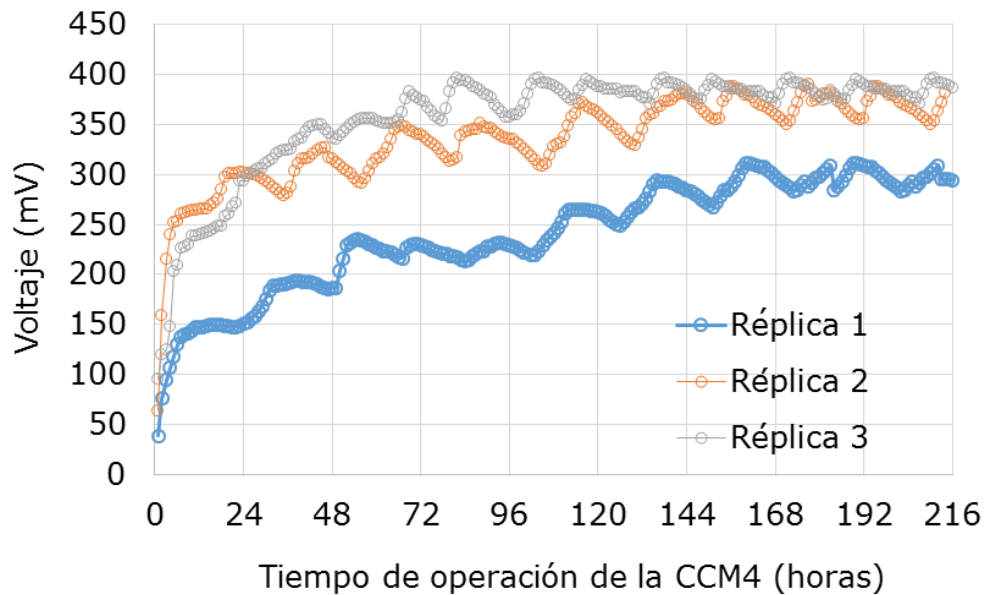


**Figura 3.** Comportamiento de voltaje registrado en la CCM2.

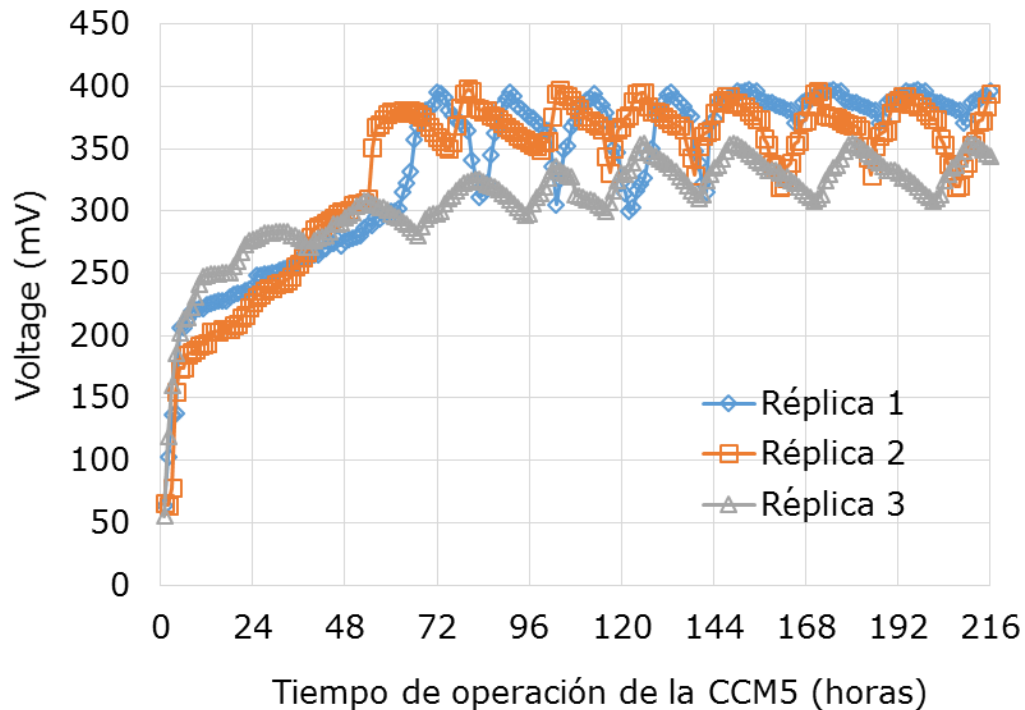




**Figura 4.** Comportamiento de voltaje registrado en la CCM3.



**Figura 5.** Comportamiento de voltaje registrado en la CCM4.



**Figura 6.** Comportamiento de voltaje registrado de la CCM5.

En la Tabla 4 se muestra que en las tres réplicas, la CCM2 sobresalió frente a las demás CCM. Fue operada con una resistencia externa de  $50 \Omega$ , área superficial de electrodo de  $151 \text{ cm}^2$  y longitud de 18 cm, generando un voltaje promedio de  $380.42 \pm 6 \text{ mV}$ . Sin embargo, el menor voltaje producido fue para la CCM1, con  $298.33 \pm 31 \text{ mV}$ , que operó a una resistencia externa de 150, área superficial del electrodo de grafito de  $151 \text{ cm}^2$  y longitud de 18 cm.

**Tabla 4.** Voltaje promedio de las celdas de combustible microbiano.

Celdas	Resistencia ( $\Omega$ )	$A_{ST-grafito}$ ( $cm^2$ )	$R_1$	$R_2$	$R_3$	Voltaje promedio (mV)
CCM1	150	151	264.58	304.78	325.63	298.33 $\pm$ 31
CCM2	50	151	374.68	379.4	387.19	380.42 $\pm$ 6.3
CCM3	50	73	293.93	345.85	370.18	336.65 $\pm$ 38.9
CCM4	150	73	285.40	366.77	384.44	345.54 $\pm$ 52.8
CCM5	100	112	363.41	372.62	330.89	355.64 $\pm$

## Análisis estadístico de la generación de bioelectricidad

Mediante el diseño estadístico ANOVA Factorial, se evaluó si las variables independientes resistencia externa ( $\Omega$ ) y área superficial total del electrodo de grafito ( $A_{ST-grafito}$   $cm^2$ ) presentan un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) en la generación de la bioelectricidad (Voltaje mV), con un nivel de confianza al 95%.

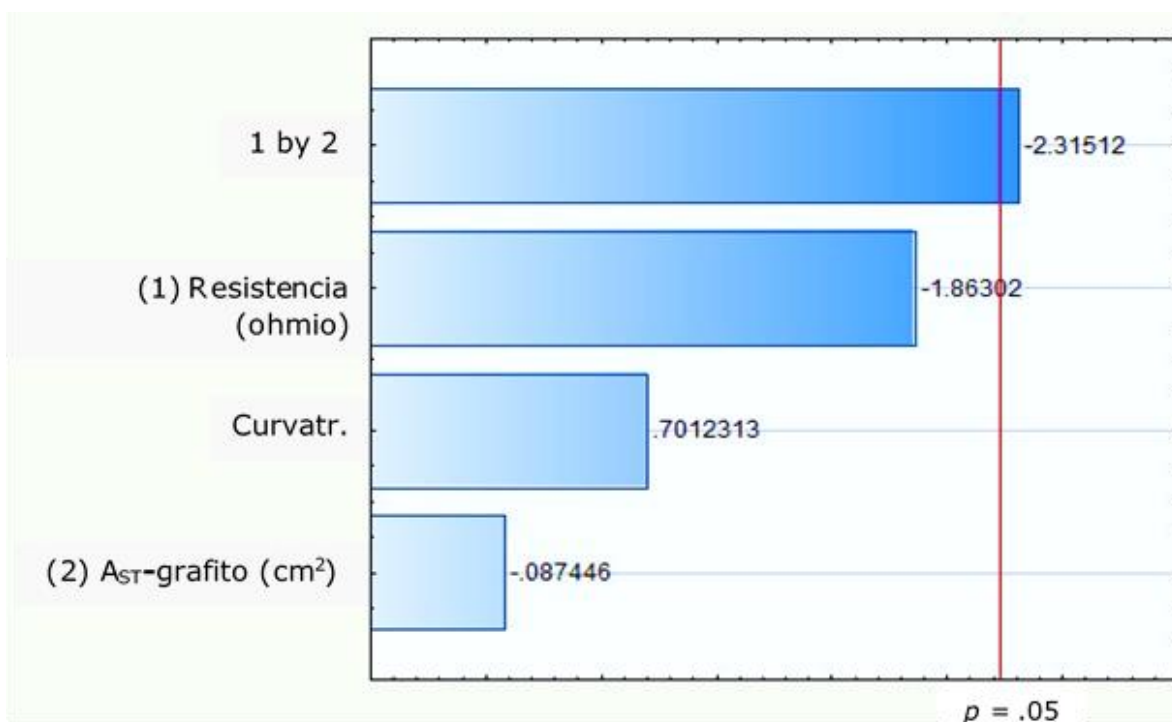
En la Tabla 5 se observa que el diseño estadístico aplicado resulta significativo ( $p < 0.03413$ ) para la interacción de la resistencia ( $\Omega$ ) y el

$A_{ST}$ -grafito ( $\text{cm}^2$ ) en la generación de bioelectricidad expresada en voltaje (mV); en cambio, los efectos principales de resistencia ( $\Omega$ ) ( $p = 0.09206$ ) y  $A_{ST}$ -grafito ( $\text{cm}^2$ ) ( $p = 0.93204$ ) no representaron significancia alguna. Por otra parte, el  $R^2 = 0.48$  indica que los efectos incluidos en el modelo ajustado (resistencia,  $A_{ST}$ -grafito y su interacción) presenta un 48% de ajuste, lo cual implica que el modelo se ajusta de modo relativo a los datos. Esto se debe probablemente a la cantidad de ensayos realizados. Según Pagura, Hernández y Dianda (2015), para un diseño factorial es necesario hacer máximo cuatro réplicas; sin embargo, la finalidad de esta investigación no sólo fue probar en el diseño estadístico sino determinar el efecto de la resistencia y el  $A_{ST}$ -grafito en el desempeño eléctrico de las celdas de combustible microbiano, utilizando como sustrato agua residual doméstica.

**Tabla 5.** Análisis de varianza para la resistencia externa y superficial total del electrodo de grafito ( $A_{ST}$ -grafito) sobre el voltaje.

Fuente de variación	SS	df	MS	F	P
Curvatura	569.49	1	569.492	0.49172	0.49915
(1) Resistencia (ohmio)	4 019.78	1	4 019.78	3.47081	0.09206
(2) $A_{ST}$ -grafito ( $\text{cm}^2$ )	8.86	1	8.85801	0.00765	0.93204
1 y 2	6 207.57	1	6207.57	5.35982	0.03413
Error residual	11 581.63	10	1 158.163		
Total SS	22 387.32	14			
$R^2 = 0.48$ ; $R^2$ ajustado = 0.28					

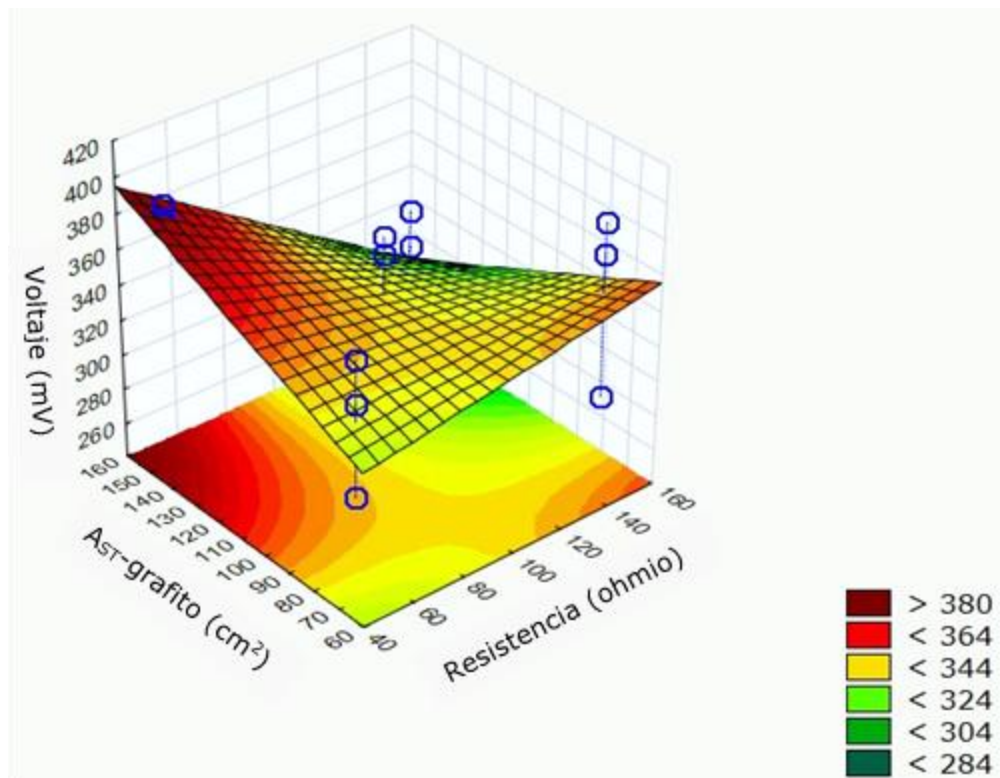
De la Figura 7 del diagrama de Pareto, se representan los efectos estandarizados con  $p = 0.05$ , donde se observa que la interacción de los efectos principales (resistencia y  $A_{ST}$ -grafito) son significativos. La longitud de las barras corresponde al valor absoluto del efecto estandarizado. Además, los valores negativos de los efectos conducen a una disminución de la respuesta (bioelectricidad), cuando sus niveles son aumentados.



**Figura 7.** Significancia de los efectos principales Resistencia ( $\Omega$ ) y  $A_{ST}$ -Grafito ( $\text{cm}^2$ ) en la generación de bioelectricidad (mV).

En la Figura 8 se muestra la gráfica de superficie de respuesta para la generación de bioelectricidad expresada en voltaje (mV), en función de la resistencia externa ( $\Omega$ ) y el área superficial del electrodo

(cm<sup>2</sup>). Se observa que la mayor generación de bioelectricidad se obtuvo en la interacción de los efectos, a una resistencia de 50 Ω y un área superficial del electrodo de grafito de 151 cm<sup>2</sup>. Las condiciones analizadas se ajustan a la Ecuación (2) generada por el diseño estadístico. Utilizando este modelo se puede alcanzar una mayor generación de bioelectricidad promedio > 380 mV.



**Figura 8.** Diagrama de superficie para la generación de bioelectricidad.

$$\text{Voltaje (mV)} = 250.15 + 0.93R + 1.45G - 0.015RG \quad (2)$$

Donde:

$R$ : resistencia externa ( $\Omega$ ).

$G$ :  $A_{ST}$ -grafito ( $\text{cm}^2$ ).

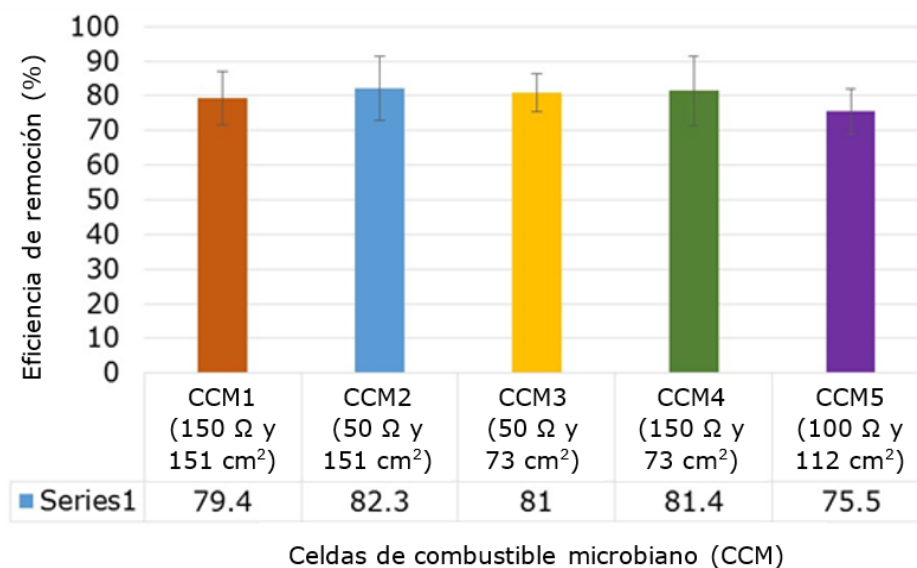
## Eficiencia de remoción de la materia orgánica

La remoción de la materia orgánica se evaluó para las cinco CCM con diferentes configuraciones. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

De la Tabla 6 resulta la Figura 9, donde se observa que la CCM2 obtuvo mayor eficiencia de remoción de materia orgánica, con un  $82.3\% \pm 9.2$  con respecto a las demás celdas. Asimismo, las CCM3 y CCM4 lograron remover un  $81.4 \pm 5.5$  y  $81 \pm 10.1\%$ , respectivamente, sin apreciarse una disminución significativa entre una celda y la otra; estas dos celdas trabajaron con diferentes resistencias externas de 50 y 150  $\Omega$ , respectivamente, pero con un  $A_{ST}$ -grafito de 73  $\text{cm}^2$  ambos iguales. De igual manera, la CCM1, con una resistencia externa de 150  $\Omega$  y  $A_{ST}$ -grafito de 151  $\text{cm}^2$ , obtuvo un  $79.4\% \pm 7.8$  de eficiencia de remoción, asemejándose en 2% a la eficiencia de las CCM3 y CCM4. En cambio, la CCM5, con una configuración de 100  $\Omega$  de resistencia externa y 112  $\text{cm}^2$  de  $A_{ST}$ -grafito, mostró una ligera caída en la remoción, alcanzando un 75.5%, pero aun así logró remover más de 70% de la materia orgánica.

**Tabla 6.** Remoción promedio en función de la DQO a diferentes configuraciones de CCM.

Configuración de las celdas de combustible microbiano			Concentración de DQO (mgO <sub>2</sub> /l)		Eficiencia de remoción (%)
Celdas	Resistencia (Ω)	A <sub>ST-grafito</sub> (cm <sup>2</sup> )	Afluyente	Efluente	
CCM1	150	151	1 490	307.7	79.4 ± 7.8
CCM2	50	151		264.3	82.3 ± 9.2
CCM3	50	73		283.0	81.4 ± 5.5
CCM4	150	73		276.7	81.0 ± 10.1
CCM5	100	112		360.3	75.5 ± 6.6



**Figura 9.** Eficiencia de remoción en función de la DQO en las distintas configuraciones de CCM.

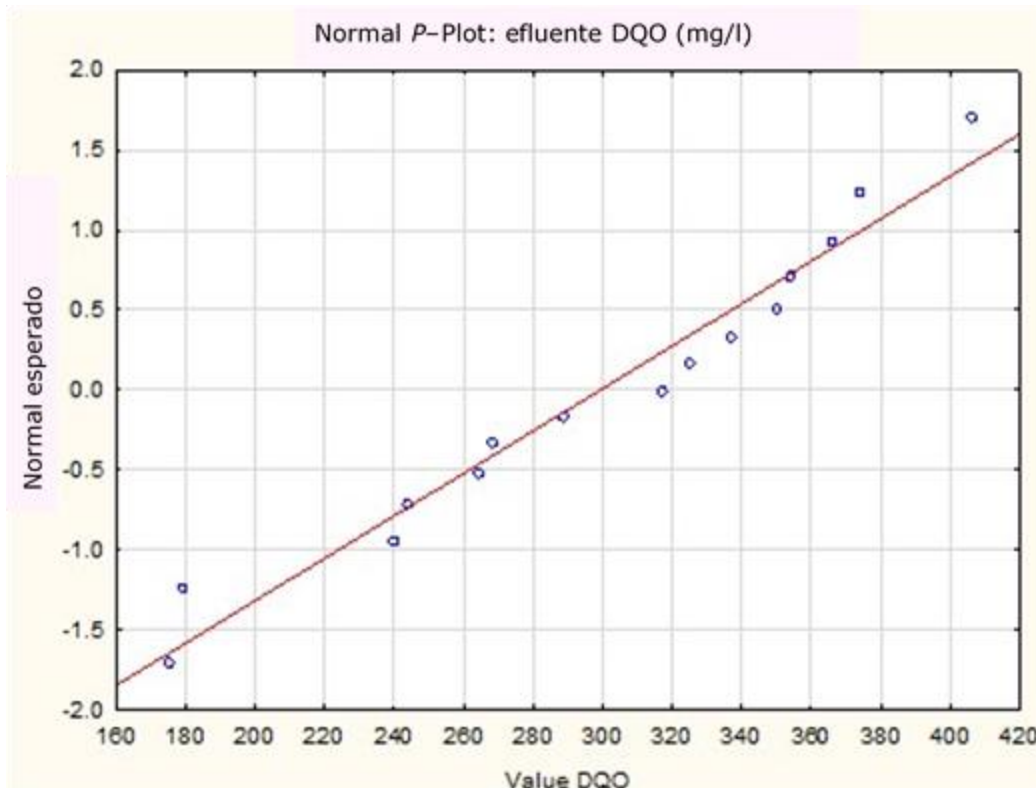


## Análisis estadístico del parámetro de DQO

En la Tabla 7 se observa que el  $P$ -valor de Shapiro-Wilk para el afluente es de 0.197, siendo mayor que el  $P$ -valor (0.05). Asimismo, el  $P$ -valor de Shapiro-Wilk para los efluentes de las cinco CCM fue mayor que el  $P$ -valor (0.05). Además, en el gráfico de Normal  $P$ -Plot (Figura 10), se observa que los puntos experimentales están cerca de la línea roja, lo cual indica que los datos del parámetro DQO siguen una distribución normal.

**Tabla 7.** Normalidad para la variable dependiente DQO.

Variable dependiente (mgO <sub>2</sub> /l)	$P$ -valor (afluente)	$P$ cal-valor (efluente)	Nivel de significancia > ( $\alpha$ ) 0.05
DQO	0.197	CCM <sub>1</sub>	0.491 > 0.05
		CCM <sub>2</sub>	0.593 > 0.05
		CCM <sub>3</sub>	0.130 > 0.05
		CCM <sub>4</sub>	0.787 > 0.05
		CCM <sub>5</sub>	0.340 > 0.05



**Figura 10.** Gráfico de normal *P*-Plot, para determinar la normalidad de datos del parámetro DQO a) afluyente y b) efluente.

Después de haber determinado que los datos de la DQO tienen una distribución normal, se analizaron la diferencia de medias y *T-student* para muestras relacionadas.

Los resultados de la Tabla 8 muestran que la DQO antes de pasar por el sistema de tratamiento obtuvo un promedio de 1 490 mgO<sub>2</sub>/l y una variabilidad de 316. Sin embargo, después de que el agua residual doméstica (ARD) pasó por el proceso de tratamiento en las cinco celdas de combustible microbiano (CCM) presentó resultados favorables, con

un promedio de 307.7 mgO<sub>2</sub>/l para CCM<sub>1</sub>; 264.3 mgO<sub>2</sub>/l para CCM<sub>2</sub>; 283.0 mgO<sub>2</sub>/l para CCM<sub>3</sub>; 276.7 mgO<sub>2</sub>/l para CCM<sub>4</sub>, y 364.3 mgO<sub>2</sub>/l para CCM<sub>5</sub>, mostrando así que el sistema de CCM tuvo una eficiencia de remoción > 70% de DQO en promedio, demostrando su efectividad en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

**Tabla 8.** Análisis de comparación de medias del parámetro DQO.

Variable (mgO <sub>2</sub> /l)	Media afuente	N	DE	Em	Media efluente		N	Desv.	Em
DQO	1 490	3	316	182.5	CCM1	307.7	3	57	32.9
					CCM2	264.3	3	99.8	57.6
					CCM3	283	3	29.51	17
					CCM4	276.6	3	96.1	55.5
					CCM5	364.3	3	36.7	21.2

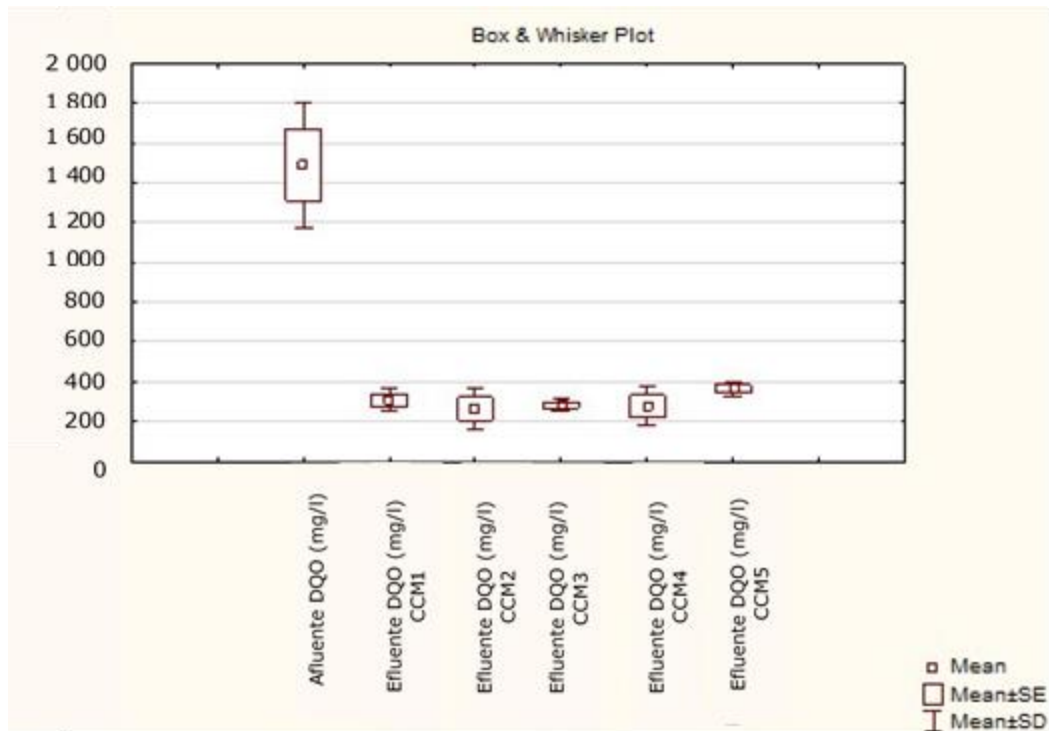
La prueba estadística de estudio demuestra que existe suficiente evidencia para señalar que el promedio entre los resultados de la DQO antes de ingresar al sistema de tratamiento mediante las CCM se distingue notablemente con el promedio alcanzado después del tratamiento; además, el valor de prueba ( $p < 0.05$ ) indica que las diferencias de los promedios son significativas, debido a que "sig.", que vendría ser el  $P$ -calculado, es menor (0.032 CCM1, 0.028 CCM2, 0.025 CCM3, 0.036 CCM4 y 0.030 CCM5PC) que 0.05, resultado que permite rechazar la hipótesis nula, al demostrar que la materia orgánica en

función de la DQO se removi6 gracias al sistema de tratamiento mediante las celdas de combustible microbiano (Ver Tabla 9).

**Tabla 9.** Prueba de *T-Student* de muestras relacionadas con el parámetro DQO.

		Diferencias relacionadas					t	gl	P-valor
Afluente	Efluente	Media	DE	Error media	95% intervalo de confianza				
					Inferior	Superior			
Afluente	CCM1	1 182.3	372.5	215.1	257.0	2107.7	5.5	2	0.032
Afluente	CCM2	1 225.6	359.8	207.7	331.9	2119.3	6.9	2	0.028
Afluente	CCM3	1 207.0	335.7	193.8	373.1	2040,9	6.2	2	0.025
Afluente	CCM4	1 213.3	409.6	235.9	198.2	2228,4	5.1	2	0.036
Afluente	CCM5	1 125.7	343.4	198.3	272.6	1978,7	6.7	2	0.030

Por otro lado, en la Figura 11 se presentan las gráficas de *box-plot*, donde se muestra claramente la diferencia de concentración de DQO del afluente y la disminuci6n de la concentraci6n de DQO luego del tratamiento reflejado en los datos del efluente.



**Figura 11.** Diagrama de bloques, para el parámetro de la DQO.

## Discusión

El voltaje inicial inmediato registrado se debió a la oxidación de la materia orgánica biodegradable realizada por los microorganismos formados en la biopelícula del electrodo. Así como también a la diferencia de potencial entre los electrodos basada en factores químicos y biológicos (Min, Cheng, & Logan, 2005). A partir de entonces, el

voltaje empezó a incrementar debido a la actividad biológica, llegando a registrar voltajes máximos (ver Tabla 3). Además, para las cinco configuración de las CCM se comprobó, como se esperaba, que con una resistencia menor, área superficial mayor y longitud del electrodo mayor, se registra una mayor generación de energía. Esto se debe a que con bajas resistencias, los electrones se mueven con más facilidad a través del circuito (Jang *et al.*, 2004) y que con un área superficial mayor existe mayor contacto de los microorganismos electrogénicos con la materia orgánica presente en el sustrato para degradarlo y de esta manera donar sus electrones al ánodo, incrementando la generación de bioelectricidad, tal como lo menciona Antonili (2015). Sin embargo, la CCM5 demostró también que con una configuración equilibrada entre la resistencia, área superficial y longitud del electrodo mantiene una generación de energía casi similar a la CCM2, diferenciada sólo en 24 mV entre una y otra. Por otro lado, la CCM1 presentó un voltaje menor que las demás, a pesar de haber operado con un mayor  $A_{ST}$ -grafito de  $151 \text{ cm}^2$ , esto se debe a la influencia que tiene la resistencia externa, ya que esta celda trabajó con una resistencia mayor ( $150 \Omega$ ), que actúa como una barrera que inhibe el flujo de electrones desde el ánodo hasta el cátodo.

Analizando la Figura 7 y los valores de la Tabla 5, puede establecerse que la interacción del efecto de la resistencia ( $\Omega$ ) y el  $A_{ST}$ -grafito ( $\text{cm}^2$ ) fue significativo. Ello implica que los efectos escogidos son determinantes para la generación de bioelectricidad; no obstante, los valores obtenidos en la interacción son negativos, lo que entraña que la disminución en las unidades conduce a un aumento de la bioelectricidad. Asimismo, el valor negativo para el efecto principal (resistencia externa

$\Omega$ ) significa que a menor resistencia externa existe un incremento de la bioelectricidad. Sin embargo, el efecto del  $A_{ST}$ -grafito ( $\text{cm}^2$ ) no presentó un valor significativo, esto se debe a las características físicas del material, ya que autores como Liu, Ramnarayanan y Logan (2004) mencionan que un electrodo de barra de grafito presenta una superficie lisa, lo cual limitaría el crecimiento de la biopelícula y la adhesión de microorganismo electrogénicos por completo en la superficie de grafito, ya que cada vez que se alimenta las CCM, la biopelícula formada sobre electrodo tiende a lavarse y tardar un tiempo en volver a formarse la biopelícula de microorganismo; al no ser éste rugoso o poroso, a pesar de ser un buen conductor de electrones, por su baja porosidad afectaría la generación de bioelectricidad.

Por otro lado, en la Figura 8 de la gráfica de superficie de respuesta muestra que la mayor generación de bioelectricidad se generó en la interacción de los valores de resistencia externa  $< 50 \Omega$  y  $A_{ST}$ -grafito  $> 151 \text{ cm}^2$ . Esto se puede corroborar con los resultados obtenidos en la Tabla 4 y el comportamiento de la generación de energía durante la operación de las CCM (Figura 2, Figura 3, Figura 4, Figura 5 y Figura 6). Según Alzate *et al.* (2008), esto se debe a que con bajas resistencias los electrones se mueven con más facilidad a través del circuito; además, a mayor oxidación del combustible (agua residual doméstica) por los microorganismos, se esperan altos índices de oxidación de los transportadores de electrones en el cultivo. Por lo tanto, una CCM puede comenzar a operar a bajas resistencias para remover contaminantes de altos índices orgánicos (Jang *et al.*, 2004). El mayor voltaje obtenido que se registró en la CCM2 se debe a que en dicho sistema siguió una cinética de saturación; es decir, la utilización

del sustrato (agua residual doméstica) en un sistema biológico en función de la concentración y la velocidad de transporte electrones (Liu & Logan, 2004). Además, utilizando el modelo matemático de la Ecuación (1), se puede alcanzar una generación de bioelectricidad  $> 380.42 \pm 6.3$  mV bajo las condiciones analizadas, resistencia externa  $50 \Omega$  y  $A_{ST}$ -grafito de  $151 \text{ cm}^2$ .

De los valores de la Tabla 6 y Figura 9 se muestra que la remoción de la materia orgánica que presentaron las CCM se debe a la presencia de consorcios de microorganismos, especialmente los bioelectrogénicos presentes en el agua residual y en la biopelícula del electrodo (ánodo), quienes descomponen la materia orgánica y a la vez donan electrones al electrodo de grafito (ánodo), generando de esta forma bioelectricidad (Du Li, & Gu, 2007). Con respecto a las resistencias externas utilizadas, se observa que la remoción promedio de la materia orgánica expresada en DQO fue de 82, 80 y 76%, con 50, 150 y 100  $\Omega$ , respectivamente. Los resultados muestran que operar con resistencias externas más bajas conlleva una mayor remoción de materia orgánica. Tales resultados son semejantes a investigaciones realizadas por Jang *et al.* (2004) y Alzate *et al.* (2008), quienes obtuvieron una eficiencia de remoción de la materia orgánica expresada en DQO de 65 y 82%, con 100 y 600  $\Omega$ , respectivamente. Asimismo, Gonzales-del-Campo, Cañizares, Lobato, Rodrigo y Morales (2014) mencionan que al incrementar la resistencia externa, el potencial eléctrico tiende a disminuir, al igual que la remoción de materia orgánica.

Finalmente, las CCM operadas en esta investigación fueron capaces de llevar a cabo la biodegradación de la materia orgánica en función de la DQO, donde se obtuvieron porcentajes de remoción



mayores al 70% de eficiencia. Destacan las CCM2 y CCM3 con mayor eficiencia de remoción frente a las demás celdas. De igual forma, la variación de las configuraciones (resistencia y área superficial del electrodo de grafito) de las CCM permitió ver que tienen influencia sobre la remoción de materia orgánica.

## Conclusiones

De acuerdo con los ensayos de laboratorio, se evaluó la biodegradación de la materia orgánica en términos de eficiencia de remoción a partir del agua residual doméstica, utilizando las celdas de combustible microbiano; se obtuvo una eficiencia de remoción de la materia orgánica mayor al 70% (DQO) y, en forma simultánea, generación de bioelectricidad.

El análisis de la biodegradación de la materia orgánica en función de la demanda química de oxígeno (DQO), considerando que los niveles promedio de concentración del agua residual doméstica fueron altos (1 490 mg/l), determinó que las CCM1, CCM2, CCM3, CCM4 y CCM5 presentaron eficiencias de remoción promedio de 79.4, 82.3, 81, 81.4 y 75.5%, respectivamente, siendo la CCM2 la que tuvo mayor porcentaje de remoción de materia orgánica en comparación con las demás celdas, que presentan valores cercanos.

Por otro lado, mediante la simulación y predicción por superficie de respuesta con un diseño factorial  $2^2$  y punto central al 95% de nivel de confianza, se determinó que al operar con resistencia externa de 50  $\Omega$  (menor) y el área superficial del electrodo de 151  $\text{cm}^2$  (mayor), se generó una mayor producción de bioelectricidad. Además, mediante el diagrama de Pareto, se determinó que el efecto principal de mayor significancia fue la interacción de la resistencia externa y  $A_{ST}$ -grafito, determinándose que la mayor generación de bioelectricidad fue en la CCM2, que trabajó con una resistencia externa de 50  $\Omega$  y  $A_{ST}$ -grafito de 151  $\text{cm}^2$ .

## Referencias

- Alzate, G. L., Fuentes, A. C., Alvarez, G. A., & Sebastian, P. (2008). Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo pem. *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe*, 33(7), 503-509.
- Alzate, G. L., Sebastian, P., & Pérez, H. A. (2007). Comparison of two anaerobic systems for hydrogen production from the organic fraction of municipal solid waste and synthetic wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 3141-3146.
- Antonili, E. (2015). Composite materials for polymer electrolyte membrane microbial fuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*, 54-70, DOI: 10.1016/j.bios.2015.02.013
- Bernal, D., Cardona, D., Galvis, A., & Peña, M. (2003). Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales. *Seminario Internacional sobre Métodos*

*Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales*. Instituto de Cinará, Universidad del Valle. A. A 25157, Cali, Colombia.

- Buitrón, G., & Pérez, J. (2011). Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto distancia entre electrodos. *Revista Especializada en Ciencias Químico Biológicas*, 14(1), 5-11.
- Chaudhuri, S. K., & Lovley, D. (2003). Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediator less microbial fuel cells. *Nature Biotechnology*, 21(10), 1- 4. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12960964>
- Du, Z., Li, H., & Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*, 25, 464-482.
- Fan, Y., Hu, H., & Liu, H. (2007). Enhanced coulombic efficiency and power density of air-cathode microbial fuel cells with an improved cell configuration. *Journal of Power Sources*, 171, 348-354.
- Gonzales-del-Campo, A., Cañizares, P., Lobato, J., Rodrigo, M., & Morales, J. F. (2014). Effects of external resistance on microbial fuel cell's performance. *The Handbook of environmental Chemistry*, 34, 175-197.
- He, Z., & Angenent, L. (2006). Application of bacterial biocathodes in microbial fuel cells. *Electroanalysis*, 18, 2009-2015.
- INEI, Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018). *Perú, Anuario de Estadísticas Ambientales*. Recuperado de

[https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1637/libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1637/libro.pdf)

- Jang, J., Pham, T., Chang, I., Khan, K., Moon, H., Cho, K., & Kim, B. (2004). Construction and operation of a novel mediator —and membrane— less microbial fuel cell. *Process Biochemistry*, 39, 1007-1012.
- Kumar, S., & Babu, G. K. (2012). A study on the electricity generation from the cow dung using microbial fuel cell. *Journal of Biochemical Technology*, 3(4), 442- 447. Recuperado de <http://www.jbiochemtech.com/index.php/jbt/article/view/281/2>
- Liu, H., & Logan, B. (2004). Electricity generation using an air cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. *Environmental Science Technology*, 38(14), 4040-4046
- Liu, H., Ramnarayanan, R., & Logan, B. (2004). Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. *Environmental Science & Technology*, 38(7), 2281-2285. DOI: [doi.org/10.1021/es034923g](https://doi.org/10.1021/es034923g)
- Logan, B. (2004). Extracting hydrogen and electricity from renewable resources. *Environmental Science & Technology*, 38(9), 160A-167A.
- Logan, B. (2009). Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nature Reviews Microbiology*, 7(5), 375-381. DOI: [doi.org/10.1038/nrmicro2113](https://doi.org/10.1038/nrmicro2113)

Logan, B., & Rabaey, K. (2012). Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies. *Science*, 337(6095):686-690. DOI: [doi.org/10.1126/science.1217412](https://doi.org/10.1126/science.1217412)

Logan, B., & Regan, J. (2006). Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. *TRENDS in Biotechnology*, 14(12), 512-518.

Min, B., Cheng, S., & Logan, B. (2005). Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. *Elsevier*, 1-12.  
Recuperado de <https://www.engr.psu.edu/ce/enve/logan/publications/2005-Min-et-al-WatRes.pdf>

Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. México, DF, México: Limusa Wiley.

Naranjo, A. F. (2011). Alternativas ecológicas para el manejo de aguas residuales. *Éxito Empresarial*, (152), 1-3.

OEFA, Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. Lima, Perú: Cyclus Print Matt. Recuperado de [https://www.oefa.gob.pe/?wpfb\\_dl=7827&fbclid=IwAR0wN8\\_5hICR-84WZC-jjZUbFfd5z6t0wGvUan4GBCSn2p3vDy3c8wyhRLg](https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827&fbclid=IwAR0wN8_5hICR-84WZC-jjZUbFfd5z6t0wGvUan4GBCSn2p3vDy3c8wyhRLg)

Pagura, J. A., Hernandez, L. N., & Dianda, D. F. (2015). *Diseño de experimentos-diseños factoriales 2K*. Recuperado de <https://docplayer.es/51978798-Diseno-de-experimentos-disenos-factoriales-2-k-disenos-2-k.html>

- Rabaey, K., & Verstraete, W. (2005). Microbial fuel cells: Novel biotechnology for energy generation. *Trends in Biotechnology*, 23(6), 292-298. DOI: [doi.org/10.1016/j.tibtech.2005.04.008](https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2005.04.008)
- Rodrigues, M., & Iemma, A. (2015). *Experimental design and process optimization*. Boca Raton, USA: CRC Press.  
DOI:[doi.org/10.1201/b17848](https://doi.org/10.1201/b17848)
- Shapiro, M., & Wilk, B. (Dec., 1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591-611.  
DOI: [doi.org/10.2307/2333709](https://doi.org/10.2307/2333709).
- You, S., Zhao, Q., Jiang, J., Zhang, J., & Zhao, S. (2006). Sustainable approach for leachate treatment: Electricity generation in microbial fuel cell. *Journal of Environmental Sciences*, 41(12), 2721-2734. DOI: [doi.org/10.1080/10934520600966284](https://doi.org/10.1080/10934520600966284)
- Zhou, M., Wang, H., Hassett, D., & Gu, T. (2013). Recent advances in microbial fuel cells (MFCs) and microbial electrolysis cells (MECs) for wastewater treatment, bioenergy and bioproducts. *Chemical Technology and Biotechnology*, 88(4), 508-518. DOI: [doi.org/10.1002/jctb.4004](https://doi.org/10.1002/jctb.4004)