

Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales municipales utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica

Generating of electricity and municipal wastewater treatment using microbial fuel cells (MFC) in the city of Huancavelica

Braulio Ccora^{1*}, Adiel Alvarez²
y Fernando Toribio¹

1 Laboratorio de Microbiología y Biología, Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú.

2 Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja «Daniel Hernández Morillo», Huancavelica, Perú.



Citar como: Ccora, B., Alvarez, A. y Toribio, F. (2020). «Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales municipales utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica». *South Sustainability*, 1(2), e018
DOI: 10.21142/SS-0102-2020-018

Artículo recibido: 23/10/2020
Revisado por pares
Artículo aceptado: 25/1/2021



© Los autores, 2020. Publicado por la Universidad Científica del Sur (Lima, Perú)

*E-mail de correspondencia:
braulio_8396@hotmail.com

RESUMEN

En la presente investigación se estudiaron las celdas de combustible microbiano (MFC, por el acrónimo en inglés de *microbial fuel cell*) como un sistema bioelectroquímico que emplea el metabolismo de las bacterias para generar electricidad, además de tratar el agua residual. El objetivo general del estudio fue evaluar el potencial de generación de energía eléctrica y la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales municipales utilizando MFC en la ciudad de Huancavelica. El procedimiento para la recolección de los datos se realizó en dos etapas. En la primera etapa de aclimatación se construyeron tres MFC: celda 1 (con 40 % de inóculo bacteriano y 60 % de sustrato), celda 2 (con 50 % de inóculo bacteriano y 50 % de sustrato) y celda 3 (con 60 % de inóculo bacteriano y 40 % de sustrato). Se probó el prototipo de MFC, se recolectó el inóculo microbiano y el sustrato, se caracterizó el agua residual, y se instaló el sistema para su aclimatación. En la segunda etapa de preprueba se identificaron, analizaron y corrigieron las dificultades durante la operación del sistema. La población en estudio fue el caudal de las aguas residuales municipales de la ciudad de Huancavelica administradas por la EPS Emapa Huancavelica, que es igual a 20 m³/s, y para la muestra se tomó 1 L/mes (periodo de muestreo), suficiente para el análisis a escala de laboratorio. Los resultados más relevantes presentaron a la celda 2 con un voltaje promedio de 521,24 mV. Además, las celdas 2 y 3 mostraron eficiencias de remoción de DQO promedios de 44,75 % y 39,95 %, respectivamente. Se concluye que se logró generar más de 500 mV en al menos una celda (celda 2).

Palabras clave: *tratamiento de agua residual, agua residual municipal, generación de energía eléctrica, celda de combustible microbiana, MFC*

ABSTRACT

In this research, the microbial fuel cell (MFC) was studied as a bioelectrochemical system that employs the metabolism of bacteria to generate electricity, in addition to treating wastewater. The overall aim of the study was to evaluate the potential for electricity generation and the efficiency of municipal wastewater treatment using MFC in the city of Huancavelica. The procedure for data collection was conducted in two stages; in the first stage the acclimation of three MFCs was constructed: Cell N°1 (40% bacterial inoculum and 60% substrate); Cell N°2 (50% bacterial inoculum and 50% substrate); and Cell N°3 (60% bacterial inoculum and 40% substrate). The MFC prototype was tested, bacterial inoculum and substrate were collected, the residual water was characterized, and the system was installed for acclimation. In the second pre-test stage, during the operating of the system difficulties were identified, analyzed, and corrected. Data was based on the flow of the municipality's wastewater, managed by the EMAPA-Huancavelica service provider, which was equal to 20 m³/s, and the sample taken, 1 L/month (sampling period), was sufficient for laboratory scale analysis. The most relevant results showed Cell N°2 with an average voltage of 521.24 mV, while Cells N°2 and N°3 exhibited average COD removal efficiencies of 44.75% and 39.95%, respectively. Therefore, it was concluded that it is possible to generate more than 500 mV in at least one cell (Cell N°2).

Keywords: *wastewater treatment, municipal wastewater, electricity generating, microbial fuel cell, MFC*



Introducción

El escaso suministro de electricidad principalmente en zonas rurales, el alto grado de contaminación de los combustibles fósiles en la generación de electricidad y la inadecuada disposición final de las aguas residuales municipales se han convertido en un problema de gran impacto ambiental. Por tal motivo, han surgido varios métodos para mitigarlos, que requieren de alta tecnología y son de excesivo costo. Sin embargo, en la presente investigación se ha propuesto realizar celdas de combustible microbianas (MFC), que, según Logan (2010), son dispositivos donde las bacterias generan energía eléctrica, mediante la oxidación de compuestos simples como la glucosa o complejas como la materia orgánica de las aguas residuales, lo cual representa un enfoque nuevo y promete solucionar los problemas planteados. Como señalan Páez *et al.* (2019), el uso de las celdas microbianas se presenta como una propuesta adecuada por su doble función de producir electricidad y tratar las aguas residuales. Hoy en día se requiere promover usos de energía al alcance de la población. De esa forma se logrará una sociedad inclusiva que pueda acceder a la electricidad para sus diversas necesidades (Pacheco, 2015).

A fin de mitigar los dos problemas críticos de carácter ambiental, aguas residuales municipales y generación de energía eléctrica, se plantea como objetivo general evaluar el potencial de generación de energía eléctrica y la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales municipales mediante el uso de MFC en la ciudad de Huancavelica, argumentando la justificación como un viable beneficio en la generación de electricidad a partir del tratamiento de contaminantes. Las celdas de combustible microbiano también han demostrado ser autosostenibles por las complejas interacciones que se desarrollan en este ambiente (Mora Collazos y Bravo Montaña, 2017). De igual modo, se ha reportado que el empleo de este tipo de celdas es una buena alternativa como una forma de energía limpia, así como de bioelectricidad sustentable frente a la problemática ambiental que afronta el mundo (Arboleda Avilés *et al.*, 2019).

A partir de la manipulación de celdas de combustible microbiano (MFC) tipo H se estudió su efecto en la eficiencia de tratamiento de aguas residuales municipales y el potencial de generación de energía eléctrica. Se planteó probar que el potencial de generación de energía eléctrica será superior a 500 mV y la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales municipales será superior al 70 % (en la remoción de la demanda química de oxígeno BQO) utilizando MFC en la ciudad de Huancavelica.

Las MFC son de gran importancia para la región de Huancavelica, porque con ellas se puede evaluar el potencial de suministro de energía eléctrica a las zonas rurales y, de esta manera, reducir los costos de tratamiento de agua residuales. Además, esta tecnología permitirá la operación en localidades remotas por la

facilidad de construcción y operación, que las aguas tratadas sean utilizadas en usos agrícolas sin efectos adversos y que se generen menores cantidades de lodos que otros tratamientos convencionales. Por último, se realizó la investigación porque las MFC son una tecnología emergente e innovadora, que actualmente están en etapa de investigación y promete resultados eficientes (Bermúdez y Bernal, 2018).

La tecnología de MFC representa el más nuevo enfoque para generar electricidad mediante la degradación de la materia orgánica presente en aguas residuales usando bacterias (Logan, 2010). Una MFC es un sistema bioelectroquímico que utiliza bacterias para convertir la energía química presente en el sustrato en energía eléctrica. Ello es posible bajo condiciones anaerobias, en las cuales algunas bacterias transfieren los electrones producidos en su actividad metabólica a un electrodo (ánodo) en lugar de a un aceptor natural de electrones (Franco y Ricaurte, 2018).

En una MFC las bacterias degradan (oxidan) la materia orgánica, produciendo electrones que viajan a través de una serie de enzimas respiratorias en la célula y generan energía en forma de ATP, y los electrones se liberan a un aceptor terminal de electrones (Logan, 2010). Por ejemplo, el oxígeno puede reducir los electrones y protones a agua a través de una reacción catalítica (Logan, 2010).

El esquema básico de una MFC comprende las cámaras anódica y catódica, las cuales están separadas por una membrana. Las bacterias crecen en la cámara anódica, oxidando la materia orgánica y liberando electrones al electrodo (ánodo) y los protones a la solución (Logan, 2010). Por diferencia de carga, los electrones son transferidos a la cámara catódica a través de un circuito eléctrico externo que conecta el ánodo y el cátodo, mientras que los protones son transferidos a través de la membrana selectiva de protones a la cámara catódica (Calderón, 2017). El cátodo se rocía con aire a fin de proporcionar oxígeno disuelto para las reacciones de los electrones, protones y oxígeno en la superficie del

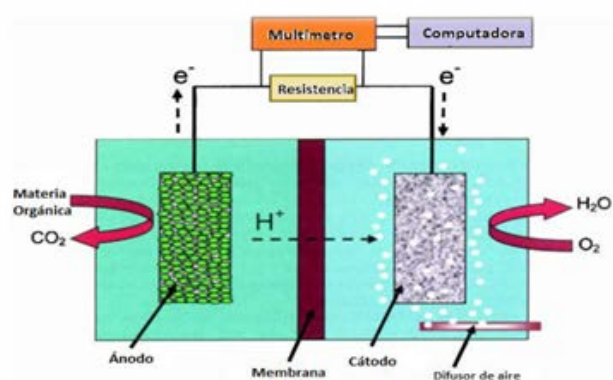


Figura 1. Esquema básico de una celda de combustible microbiano. Fuente: Logan, 2010.

cátodo (Logan, 2010), con el propósito de generar agua. La cámara anódica está en condiciones anaeróbicas, por lo que las bacterias se ven obligadas a cambiar su aceptor natural de electrones a un aceptor insoluble, tal como un electrodo (ánodo) (Calderón, 2017). El sistema se muestra con una resistencia utilizada como control de carga para la energía generada, y la corriente se determina mediante un multímetro (Logan, 2010).

La transferencia de electrones sobre el electrodo es directa con la participación de citocromos y no necesita de un agente mediador. Los Pili que se adhieren a los electrodos permiten que los electrones se transfieran al ánodo directamente (Romero y Vásquez, 2012).

El objetivo de la investigación fue evaluar el potencial de generación de energía eléctrica y la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales municipales utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) a nivel de prueba de laboratorio en la ciudad de Huancavelica, lo que es necesario para generar energía eléctrica en el ámbito rural, principalmente en las plantas de tratamiento de aguas residuales, que están alejadas de toda población, y contribuir con la búsqueda e investigación de energías renovables.

Materiales y métodos

En la investigación se consideró como población el efluente de las aguas residuales municipales de la ciudad de Huancavelica administradas por la EPS Emapa Huancavelica y como muestra 1 litro por periodo de muestreo. Los instrumentos fueron el multímetro, el colorímetro y el multiparámetro con los cuales se registraron los datos experimentales por cada celda.

Se construyeron tres celdas tipo H de igual geometría y volumen en frascos de plástico de 500 mL cuadrado tipo rosca (7 cm × 7 cm × 10 cm), que comprenden:

La cámara anódica: consta de un orificio con su tapón de hule para mantener condiciones anaeróbicas, medir los factores ambientales intervinientes y ventilar la celda; un electrodo de tela de carbón de platino sobre Vulcan 0,03 mg/cm² al 20 % de 3,5 cm por 8 cm para oxidar los

electrones; y 10 cm de alambre de platino de 0,1 mm de diámetro para transportar los electrones.

La cámara catódica: consta de un orificio con su respectivo tapón de hule para monitorear los factores ambientales intervinientes y añadir agua destilada; un electrodo de tela de carbón de platino sobre Vulcan 0,03 mg/cm² al 20 % de 3,5 cm por 8 cm para reducir los electrones; 10 cm de alambre de platino de 0,1 mm de diámetro para transportar los electrones; y un sistema de aireación que consta de un blíster difusor color azul, 50 cm de manguera de ¼" conectada a una bomba de aire de pecera NS 350 (consumo: 5 watts, fuerza max: 400 L/H, frecuencia: 60/50 Hz y voltaje: 220-240 V).

El puente de intercambio de protones: consta de una unión universal de PVC de 2" diámetro; dos adaptadores universales de 2" de diámetro; y un disco de 2 cm de diámetro de membrana selectiva de protones Nafion 117 de 183 μm de espesor para seleccionar el paso de protones de la cámara anódica a la catódica.

El circuito eléctrico externo: consta de dos conexiones de cocodrilos medianos con sus respectivos cables de cobre de 0,1" de diámetro, y resistencias externas de 1000 Ω para controlar el paso de electrones, todo ello conectado a un multímetro digital PRASEK PR-75C para la lectura y el registro de datos.

Recolección de inóculo microbiano y sustrato

El inóculo bacteriano fue recolectado del lodo activo de descarga ubicado afuera del camal municipal de Huancavelica en un volumen de 1800 mL. Se transportó en un recipiente de plástico estéril al laboratorio para su respectiva utilización, siguiendo el mismo protocolo de monitoreo que agua residual (Resolución Ministerial 273-2013-Vivienda). Por su parte, el sustrato se recolectó en el punto de descarga de aguas residuales municipales de la ciudad de Huancavelica (desarenador de Emapa), al extraer un volumen de 1 litro que luego se transportó al laboratorio en un recipiente de plástico estéril color ámbar, de acuerdo con los protocolos (Resolución Ministerial 273-2013-Vivienda).

Periodo de aclimatación: para conseguir una mejor estabilidad de las celdas, fue necesario realizar una aclimatación previa al funcionamiento. De este modo se logró que el inóculo bacteriano, el sustrato y los electrodos estén adaptados y no se genere ningún tipo de contaminación. Debido a este proceso el voltaje al inicio del monitoreo ya no registra valores cercanos a cero.

Diseño experimental: en la presente investigación se compararon tres tratamientos correspondientes a cada celda. Se instalaron tres celdas de combustible microbiano (MFC) y en cada una se colocó un volumen de 500 mL equivalente al 100 % de contenido: la celda 1 contiene 40 % de inóculo bacteriano y 60 % de sustrato; la celda 2 contiene 50 % de inóculo bacteriano y 50 % de sustrato;

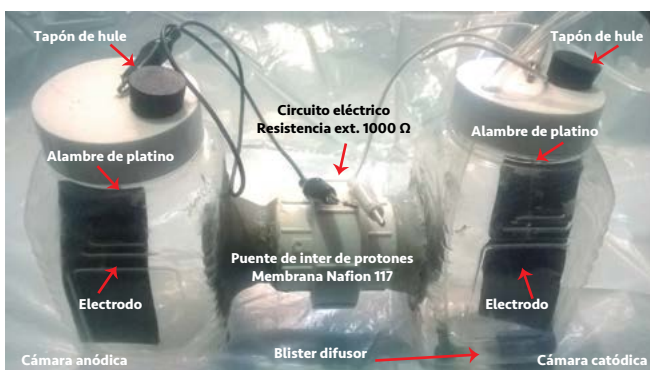


Figura 2. Componentes de la MFC.

y la celda 3 contiene 60 % de inóculo bacteriano y 40 % de sustrato.

Análisis estadístico: las técnicas de procesamiento y análisis de datos fueron el análisis de varianza ANOVA con un diseño completamente al azar (DCA) y la prueba de Tukey a una significancia de 0,05, procesadas en los softwares estadísticos de Excel 2016 y SAS para la prueba de hipótesis. En el ámbito de estudio se describe el trabajo en campo y el trabajo en laboratorio

Resultados

Potencial de generación de energía eléctrica (voltaje)

En la figura 3A, en el voltaje de la primera semana, la celda 2 (50 % de inóculo y 50 % de sustrato), es significativamente superior con una media de 521,24 mV. La mejor tendencia es para la celda 2, donde hubo igual cantidad de sustrato (agua residual municipal) e inóculo bacteriano (lodo activo), el cual, al encontrarse en un punto óptimo, generó más energía eléctrica,

En la figura 3B, en el voltaje de la segunda semana, la celda 2 (50 % de inóculo y 50 % de sustrato) obtuvo el mayor voltaje, con 393,10 mV, estadísticamente iguales a la celda 3 (60 % de inóculo y 40 % de sustrato) con 375,43 mV. Las mejores tendencias, que además son estadísticas iguales, las presentan las celdas 2 y 3, en cuya composición hubo mayor cantidad de inóculo que sustrato, lo que generó más energía eléctrica.

En la figura 3C, en el voltaje de la tercera semana, donde la celda 1 (40 % de inóculo y 60 % de sustrato) y la celda 2 (50 % de inóculo y 50 % de sustrato) son estadísticamente iguales, se obtuvieron los mayores voltajes de 337,10 mV y 304,81 mV, respectivamente. Las mejores tendencias son para las celdas 1 y 2, que han retenido mayor cantidad de sustrato que al inocular al inicio. A la tercera semana se genera mayor cantidad de energía eléctrica y se observa un agotamiento de sustrato para generar energía eléctrica con el tiempo.

En la figura 3D, en el voltaje de la cuarta semana, la celda 1 (40 % de inóculo y 60 % de sustrato) obtuvo el mayor voltaje y fue estadísticamente superior, con 388,10 mV (tabla suplementaria 1). La mejor tendencia es para la celda 1, que contiene mayor porcentaje de sustrato inicial y a largo plazo recién empieza a generar los mayores voltajes, por la poca cantidad de bacterias iniciales, las cuales a largo plazo se reproducen debido a la suficiente cantidad de sustrato.

Eficiencia del tratamiento de las aguas residuales municipales (eficiencia de remoción de DQO)

En la figura 4A, en la eficiencia de remoción de DQO de la semana 1, las celdas 2 y 3 son significativamente superiores, con promedios de 44,75 % y 39,95 %, respectivamente; y estadísticamente la celda 1 es similar a la celda 3, lo que demuestra que también presenta resultados eficientes para esta semana. En la primera

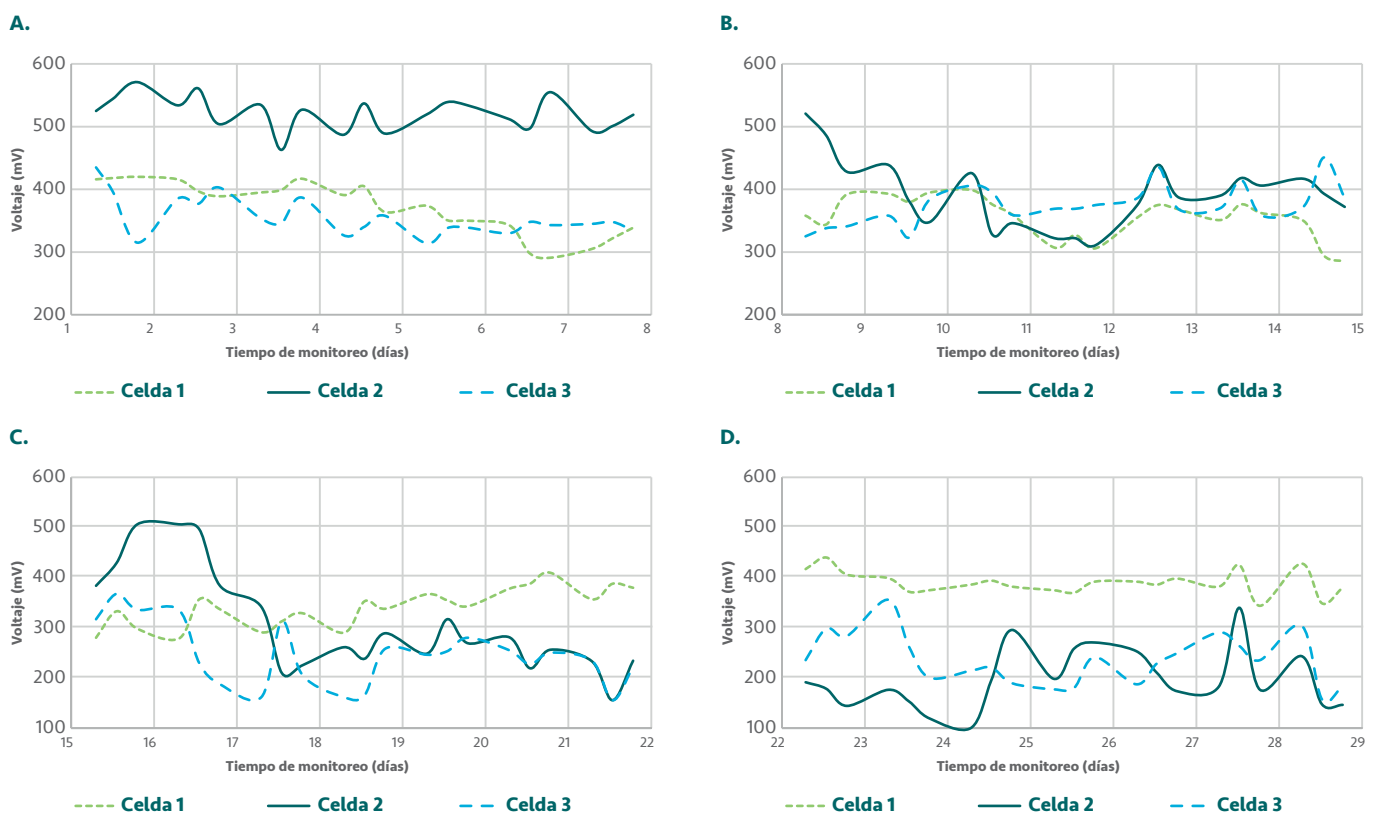


Figura 3. Voltaje diario producido por las celdas durante cuatro semanas de tratamiento. **A,** resultados de la semana 1; **B,** resultados de la semana 2; **C,** resultados de la semana 3; **D,** resultados de la semana 4.

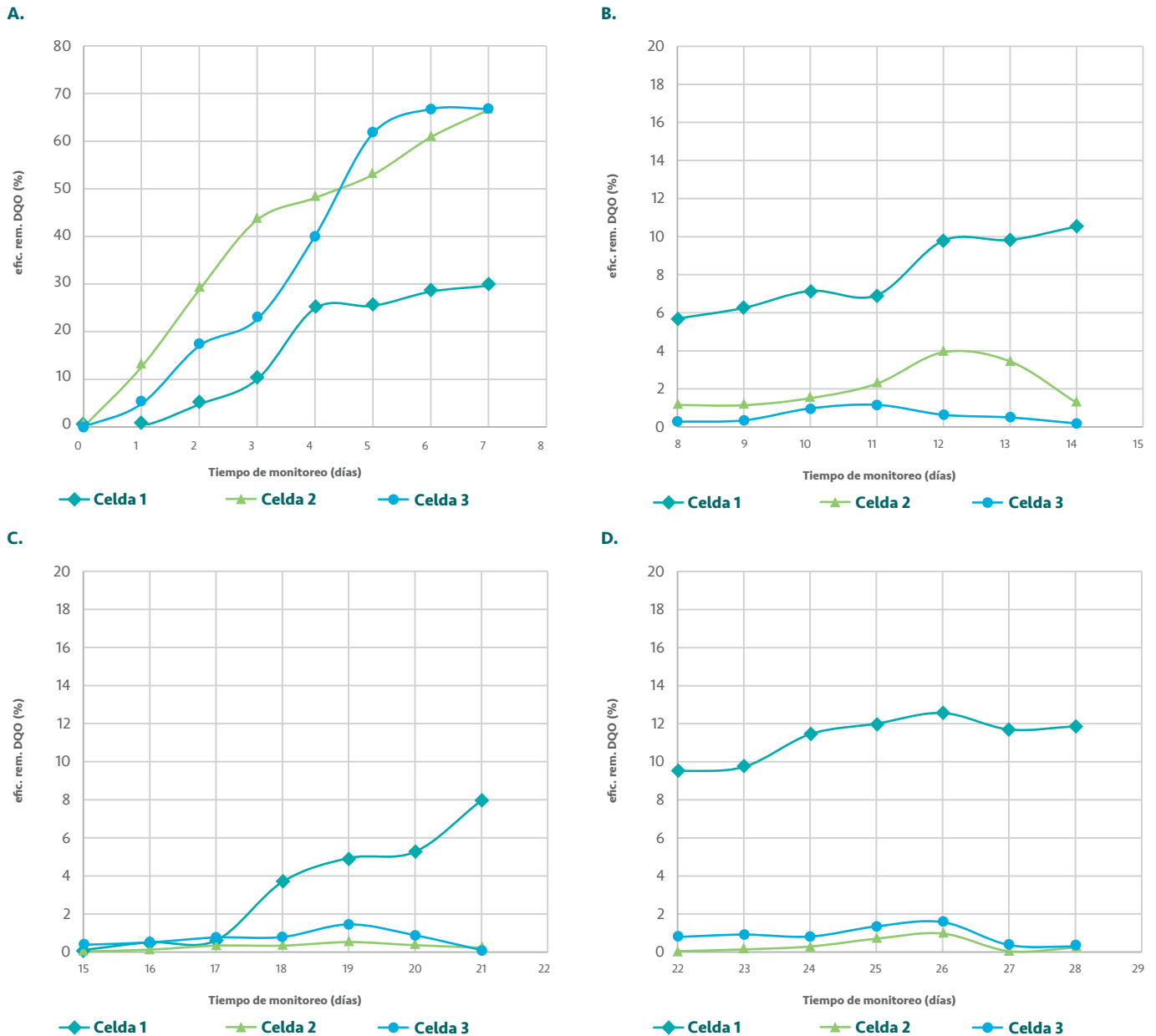


Figura 4. Eficiencia de remoción de DQO diario de las celdas durante las cuatro semanas de tratamiento. **A**, resultados de la semana 1; **B**, resultados de la semana 2; **C**, resultados de la semana 3; **D**, resultados de la semana 4.

semana la mejor tendencia es para las celdas 2 y 3, debido a que contienen mayor proporción de inóculo bacteriano, lo cual favoreció la degradación de la materia orgánica (DQO).

En la figura 4B, en la eficiencia de remoción de DQO de la semana 2, la celda 1 presenta la mejor eficiencia de remoción de DQO, con un promedio de 8,03 %. En la segunda semana la mejor tendencia es para la celda 1, donde hubo mayor cantidad de sustrato que inóculo, y a la larga la poca cantidad de bacterias empieza a degradar esa gran cantidad de sustrato.

En la figura 4C, en la eficiencia de remoción de DQO de la semana 3, evidencia que la celda 1 obtuvo la mayor

eficiencia de remoción de DQO con 3,30 %. En la tercera semana la mejor tendencia es para la celda 1, debido a que la poca cantidad de inóculo no degradó la mayor porción de sustrato en la primera semana. En las últimas semanas recién se evidenció la degradación de esa gran cantidad de sustrato.

En la figura 4D, en la eficiencia de remoción de DQO de la semana 4 se evidencia que la celda 1 presentó la mayor eficiencia significativa de remoción de DQO, con 11,26 % (tabla suplementaria 2). En la cuarta semana la mejor tendencia es para la celda 1, porque presenta mayor porcentaje de sustrato que inóculo, debido a la degradación lenta de las primeras semanas; se muestra más claramente que la poca cantidad de bacterias iniciales



(semana 1) degradaron parte del sustrato de la celda y en las últimas semanas empiezan a degradar mejor la DQO.

Discusión

Respecto a los voltajes obtenidos, Bermúdez y Bernal (2018) y Ñacato (2018) reportan máximos valores a las primeras horas de operación (294,17 mV a las 15 horas y 607,67 mV a las 20 horas, respectivamente), de la misma forma que sucedió en la presente investigación, en la cual al primer día (luego de 12 horas) se generó el máximo voltaje de 571 mV en la celda 2, debido a que las bacterias pasaron por una etapa de aclimatación para la formación del biofilm. Otro investigador como Saavedra (2012) no realizó la etapa de aclimatación, y obtuvo voltajes muy cercanos a cero al inicio. Es importante realizar aclimatación por al menos 15 días.

Asimismo, se relacionan los bajos voltajes obtenidos en un tiempo de 20 horas con la curva de crecimiento bacteriano, como también indica Ñacato (2018). De igual forma, en la presente investigación las bacterias pasaron por las cuatro fases del crecimiento microbiano, pero solo se observaron dos (fase exponencial y fase estacionaria), debido a que en la etapa de aclimatación las bacterias pasaron por una etapa de aclimatación, y no se logró evidenciar la fase de muerte ya que el tiempo de monitoreo fue corto. Se recomienda evaluar las celdas hasta obtener valores de voltaje iguales a cero, lo cual simbolizaría la fase de muerte.

Por otro lado, González (2015) generó menores voltaje con respecto a las demás investigaciones, entre 8 mV y 32 mV. González menciona que las variaciones de voltajes se deben a la concentración de oxígeno, el cual fue variable en su investigación. Otras investigaciones como las de Buitrón y Pérez (2011) generaron un voltaje máximo de 660 mV. Es posible que este aumento en el voltaje se haya debido a un mejor crecimiento bacteriano, pero también se observó la acidificación de la cámara anódica a medida que se consumía la materia orgánica, y por ende presenció una fuerte caída de la generación del voltaje. La presente investigación se realizó a escala de laboratorio; sin embargo, la generación del voltaje será superior en futuras investigaciones de mayor escala.

En la investigación el máximo porcentaje de remoción de DQO fue 67,18 % en la celda 3, similar a Franco y Ricarte (2018), de 60 %. En ambas investigaciones la DQO de entrada fueron similares, 259,00 mg/L y 274,31 mg/L, respectivamente. Las investigaciones de Bermúdez y Bernal (2018) removieron un máximo de 12,24 % de DQO a las 30 horas; en cambio, los trabajos de Medina y Zapata (2017) removieron un máximo de 11,53 % a las 24 horas. Al comparar con los resultados de la investigación, la remoción es muy baja, porque en sus investigaciones el tiempo de operación fue muy corto y en la investigación fue de una semana. En lo señalado por el trabajo de Ñacato (2018), logró remover mayor cantidad de DQO (84,04

%) a 95 miliTestla, ya que el campo magnético mejora el metabolismo microbiano. Se considera importante la aplicación del campo magnético en la presente investigación, pues hubiera mejorado el rendimiento de las celdas de combustible microbiana.

Conclusiones

Los mejores resultados en cuanto a la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales municipales de la ciudad de Huancavelica y al potencial de generación de energía eléctrica se logró mediante el uso de la celda 2 por cumplir con ambos parámetros como mejor tratamiento, con un nivel de confianza del 95 %.

La eficiencia de tratamiento de las aguas residuales municipales no supera al 70 % en ninguna de las celdas de combustible microbiano (MFC), con un nivel de confianza del 95 %.

El potencial de generación de energía eléctrica es superior a 500 mV al utilizar la celda de combustible microbiano (MFC) 2 con un nivel de confianza del 95 %.

Fuente de financiamiento

Financiamiento por parte del Programa 066-2018 de la Universidad Nacional de Huancavelica.

Contribución de autoría

BC se encargó de la ejecución experimental del proyecto, así como de la estadística, las discusiones y las conclusiones presentadas. FT se encargó de la metodología de la investigación. AA estuvo a cargo de la asesoría técnica para el desarrollo de este proyecto. Los autores aprobaron la versión final del texto.

Potenciales conflictos de interés

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés.

Referencias bibliográficas

- Arboleda Avilés, D. G., Núñez Barrionuevo, O. F., Sánchez Olmedo, O. F., Chinchin Piñan, B. D., Arboleda Briones, D. A. y Bahamonde Soria, R. A. (2019).** «Application of a direct current circuit to pick up and to store bioelectricity produced by microbial fuel cells». *Revista Colombiana de Química*, 48(3), pp. 26-35. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v48n3.77011>
- Bermúdez, M. y Bernal, E., (2018).** *Implementación de una celda de combustible microbiana a escala laboratorio para generación de energía eléctrica* (tesis de grado en Ingeniería Química). Universidad de América, Bogotá. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6695>
- Buitrón, G. y Pérez, J. (2011).** «Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos». *TIP*, 14(1). Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2011000100001
- Franco Rosero, L, Ricaurte Vargas, S., Lizcano Valbuena, W. y Madera Parra, C. (2018).** «Evaluación de una celda de combustible microbiana para el tratamiento del agua residual del campus universitario Meléndez». Disponible en: <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/11588>
- González del Campo García-Villarrubia, A. (2015).** *Valoración energética y tratamiento de efluentes residuales mediante celdas de combustible microbiológicas* (tesis de doctorado en Ingeniería Química). Universidad de Castilla-La Mancha. Disponible en: <https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/6531>
- Logan, B. E. (2010).** «Scaling up microbial fuel cells and other bioelectrochemical systems». *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(6), pp. 1665-1671. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2378-9>
- Medina, S. y 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* (tesis de grado en Ingeniería Química). Universidad de América, Bogotá. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6032>
- Mora Collazos, A. y Bravo Montaña, E. (2017).** «Diversidad bacteriana asociada a biopelículas anódicas en celdas de combustible microbianas alimentadas con aguas residuales». *Acta Biológica Colombiana*, 22(1), pp. 77-84. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/abc.v22n1.55766>
- Ñacato Chicaiza, D. (2018).** «Evaluación de la aplicación del campo magnético en la producción de energía eléctrica a partir de la degradación de aguas residuales domésticas utilizando celdas de combustible microbianas tipo Batch» (tesis de grado en Química). Universidad Central del Ecuador, Quito. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/14585>
- Pacheco, M. (2015).** «La energía que requiere nuestro territorio». *ARQ*, 89, pp. 17-21. Disponible en: <https://doi.org/10.4067/S0717-69962015000100003>
- Páez, A., Lache-Muñoz, A., Medina, S. y Zapata, J. (2019).** «Electric power production in a microbial fuel cell using *Escherichia coli* and *Pseudomonas aeruginosa*, synthetic wastewater as substrate, carbon cloth and graphite as electrodes, and methylene blue as mediator. Laboratory scale». *Tecnología y Ciencias del Agua*, 10(6), pp. 261-282. Disponible en: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-06-11>
- Saavedra, I. (2012).** *Diseño de una celda de combustible microbiológica con uso de bacterias oxidantes de azufre y hierro* (tesis de grado para optar el título de ingeniero civil químico e ingeniero civil en biotecnología). Universidad de Chile, Santiago de Chile. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104363>

