

Caracterización de aguas residuales domésticas, para la optimización de parámetros operativos en celdas de combustible microbianas

Characterization of domestic wastewater for the optimization of operating parameters in microbial fuel cells

Condori Aracayo Sammy Milagros¹

sammy.condori@upeu.edu.pe

*Universidad Peruana Unión, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, E.P. Ingeniería Ambiental,
Chullunquiani, Perú.*

Resumen

La caracterización fisicoquímica de aguas residuales domésticas es fundamental para optimizar su uso en celdas de combustible microbiano (CCM), tecnología que combina tratamiento de efluentes con generación de bioelectricidad. Este estudio analizó muestras de dos puntos del campus de la Universidad Peruana Unión (Juliaca, Perú), evaluando pH, conductividad eléctrica, DBO₅ y DQO.

Los resultados revelaron carga orgánica media-alta (DBO₅: 380 mg/L; DQO: 620 mg/L) con relación DQO/DBO₅ de 1.62–1.65, indicador de alta biodegradabilidad. El pH ligeramente ácido (6.07–6.08) sugiere necesidad de ajuste para maximizar la actividad microbiana en CCM. La conductividad eléctrica varió significativamente (1,450–3,060 μ S/cm), reflejando diferencias en composición iónica entre puntos de muestreo. La investigación demuestra que las CCM operan eficientemente a temperatura ambiente, con menores emisiones de CO₂ y sin requerir energía externa cuando emplean cátodos aireados pasivamente o biocátodos. Estos sistemas son particularmente relevantes en contextos de altura (Juliaca: 3,825 msnm) y clima frío, donde la infraestructura de saneamiento es limitada.

La caracterización detallada permitió validar que las aguas residuales domésticas son sustratos viables para CCM, destacando su potencial para tratamiento sostenible y producción de energía limpia. La optimización basada en parámetros fisicoquímicos específicos podría mejorar el rendimiento energético y la eficiencia de remoción de contaminantes, especialmente en entornos educativos y comunidades con desafíos similares de gestión hídrica. Este trabajo aporta datos cuantitativos esenciales para diseñar sistemas MFC adaptados a condiciones ambientales específicas, promoviendo soluciones circulares que integran tratamiento de aguas y generación de bioelectricidad en regiones altoandinas.

Palabras clave: Celdas de Combustible Microbiano, Aguas residuales domésticas, Caracterización fisicoquímica, Bioelectricidad, DBO₅/DQO, Optimización de procesos.

Abstract

The physicochemical characterization of domestic wastewater is essential to optimize its use in microbial fuel cells (MFCs), a technology that combines effluent treatment with bioelectricity generation. This study

analyzed samples from two sites on the Universidad Peruana Unión campus (Juliaca, Peru), assessing pH, electrical conductivity, BOD₅, and COD.

The results revealed a medium-high organic load (BOD₅: 380 mg/L; COD: 620 mg/L) with a COD/BOD₅ ratio of 1.62–1.65, indicating high biodegradability. The slightly acidic pH (6.07–6.08) suggests the need for adjustment to maximize microbial activity in MFCs. Electrical conductivity varied significantly (1,450–3,060 μS/cm), reflecting differences in ionic composition between sampling sites. The research demonstrates that CCMs operate efficiently at room temperature, with lower CO₂ emissions and without requiring external energy when using passively aerated cathodes or biocathodes. These systems are particularly relevant in high-altitude (Juliaca: 3,825 meters above sea level) and cold climates, where sanitation infrastructure is limited.

Detailed characterization validated domestic wastewater as a viable substrate for CCMs, highlighting their potential for sustainable treatment and clean energy production. Optimization based on specific physicochemical parameters could improve energy efficiency and contaminant removal efficiency, especially in educational settings and communities with similar water management challenges. This work provides essential quantitative data for designing CCM systems tailored to specific environmental conditions, promoting circular solutions that integrate water treatment and bioelectricity generation in high Andean regions.

Keywords: Microbial Fuel Cells, Domestic Wastewater, Physicochemical Characterization, Bioelectricity, BOD₅/COD, Process Optimization.in educational institutions and similar settings.

Introducción

En las últimas décadas se han emprendido acciones encaminadas a identificar la problemática mundial en torno al agua (French, 2016). La disminución de la contaminación ambiental constituye un reto para la humanidad, debido a que gran parte tiene principio a las actividades antropogénicas. (López, 2020). Es por ello que, el desarrollo sostenible se ha planteado para realizar un cambio integral enfocado a la naturaleza y los seres humanos, considerando el sentido de responsabilidad y perdurabilidad de los recursos para las actuales y futuras generaciones (Sánchez et al., n.d.).

Según Yee-Batista (2013) el 80% de la población latinoamericana vive en ciudades y una gran proporción en asentamientos próximos a fuentes contaminadas. La autora agrega que, siendo América Latina una de las regiones más biodiversas del mundo y dueña de un tercio de las fuentes de agua del mundo, la contaminación del agua representa consecuencias ecológicas adversas. En el Perú Cerca de 11 millones de personas carecen de alcantarillado, solo el 62% del desagüe es captado por las Empresas Prestadoras de Servicio (EPS) y los servicios de saneamiento son insostenibles por, la insuficiente inversión, problemas económicos en las operaciones, falta de apoyo estatal y normas legales inadecuadas (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento [VIVIENDA], 2017).

Las aguas residuales son aquellas aguas cuyas características originales han sido alteradas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser rehusadas (OEFA, 2014)., y las aguas residuales domésticas son aquellas de origen residencial y comercial que contienen desechos fisiológicos, entre otros, provenientes de la actividad humana, y deben ser dispuestas adecuadamente. Cuenca (2015), menciona que el vertimiento de estos presenta colorantes, hidrocarburos, compuestos fenólicos y que agrupados en común forman lo que se llaman demanda química de oxígeno y demanda biológica de oxígeno los cuales resultan difíciles de eliminar en estos efluentes.

Por otro lado, Franco & Vargas (2018), indica que una Celda de Combustible microbiano (CCM) es un sistema bioelectro-químico que utiliza microorganismos para convertir la energía química presente en el agua residual (sustrato) en energía eléctrica. A su vez estas pueden ser utilizadas como estrategia para tratar aguas residuales contaminadas y generar bioelectricidad o energía limpia (Valencia,2018). Es por ello que, la presente tiene como objeto estudiar la caracterización físico – químico de la contaminación por aguas residuales domesticas en la Villa Chullunquiari – Juliaca, en dos puntos, detrás del auditorio Fernando Sthal y detrás del Colegio Adventista del Titicaca (CAT), teniendo como principal problemática el estancamiento de aguas residuales domesticas no tratadas.

2. Metodología

2.1. Ubicación

La investigación se realizó en la Universidad Peruana Unión campus Juliaca, ubicada en la región de Puno, Perú sitúa a una altitud aproximada de 3,824 metros sobre el nivel del mar (msnm). Estas condiciones geográficas y ambientales son relevantes para el desarrollo experimental, ya que la altitud y el clima pueden influir en la actividad microbiana y en los procesos fisicoquímicos de las aguas residuales.

Figura 1

Mapa de la Universidad Peruana Unión



Nota. Fuente: Propia.

2.2. Lugar de Muestreo

La presente tuvo lugar en dos puntos de vertientes de aguas residuales domesticas en la villa chullunquiani:

- El punto 1 (P1) se realizó la caracterización del agua residual doméstica ubicado detrás del auditorio Fernando Stahl, dentro del campus de la Universidad Peruana Unión en Juliaca. Este sitio fue seleccionado debido a que representa un foco de vertimiento directo de aguas residuales sin tratamiento.

Figura 2

P1 a espaldas del auditorio Fernando Sthal



Nota. Fuente: Propia.

- El segundo punto (P2) de muestreo fue establecido a espaldas del colegio Adventista del Titicaca (CAT), dentro del campus de la Universidad Peruana Unión – Sede Juliaca, donde se identificó una descarga directa de aguas residuales generadas por actividades administrativas, sanitarias y académicas. Este punto representa un escenario realista de vertimiento sin tratamiento previo, lo que permite evaluar las condiciones del efluente en estado bruto.

Tabla 1

Coordenadas UTM de los puntos de Ubicación

	Latitud	Longitud	Altitud
	-	-	
P1	15.511773°	70.178256°	3820
	-	-	
P2	15.517215°	70.181408°	3820

Nota. Fuente: Propia.

3. Caracterización

La caracterización fisicoquímica de las aguas residuales es un paso fundamental para evaluar su calidad y determinar su potencial como sustrato en celdas de combustible microbiano. Esta caracterización incluye la medición de parámetros que reflejan las propiedades físicas y químicas del agua, así como la carga contaminante orgánica e inorgánica que contiene.

3.1. Ph

La medición del pH en las muestras de aguas residuales se realizó utilizando un método electrométrico con un pH-metro portátil equipado con un electrodo combinado de vidrio y referencia. Previo a las mediciones, el equipo fue calibrado con soluciones buffer estándar de pH 4, 7 y 10 para asegurar la precisión y trazabilidad de los resultados. La calibración se llevó a cabo en al menos dos puntos, enjuagando el electrodo con agua desionizada entre cada calibración para evitar contaminaciones cruzadas. Las muestras se midieron a temperatura ambiente, utilizando el ajuste automático de temperatura del equipo para compensar posibles variaciones térmicas. Cada muestra fue analizada por triplicado para garantizar la repetibilidad, y se registró el valor promedio de pH, que indica la acidez o alcalinidad del agua residual, parámetro fundamental para la actividad microbiana en las celdas de combustible microbiano.

3.2. Conductividad Eléctrica

Este parámetro refleja la concentración de sales disueltas y otros iones en el agua residual, lo cual influye en la capacidad del medio para conducir corriente eléctrica y en la transferencia de electrones en la celda microbiana. Las muestras se acondicionaron a temperatura ambiente y se introdujo el electrodo de conductividad en cada una, registrando la lectura cuando esta se estabilizó.

3.3. DBO5

Se realizó mediante el método estándar de incubación a cinco días (DBO5), que mide el oxígeno consumido por los microorganismos al degradar la materia orgánica biodegradable presente en la muestra de agua residual. Para ello, se tomó una alícuota representativa del agua residual, que en caso necesario fue diluida con agua de dilución estéril para ajustar la concentración a rangos adecuados. Se midió el oxígeno disuelto inicial en la muestra usando un oxímetro o método Winkler, y luego las muestras se incubaron en oscuridad a 20 °C durante cinco días para evitar la fotosíntesis y favorecer la actividad microbiana. Al finalizar la incubación, se midió nuevamente el oxígeno disuelto residual, y la DBO se calculó como la diferencia entre el oxígeno inicial y el residual, ajustando por el factor de dilución.

3.4. DQO

Se determinó mediante un proceso químico que mide la cantidad total de materia orgánica oxidable, incluyendo compuestos biodegradables y no biodegradables. Para ello, se tomó una alícuota de la muestra

y se añadió una solución de dicromato de potasio en medio ácido, que actúa como agente oxidante. La mezcla se sometió a digestión térmica a aproximadamente 150 °C durante dos horas para asegurar la oxidación completa de la materia orgánica. Posteriormente, se realizó una titulación con sulfato ferroso amoniacal para cuantificar el dicromato consumido, y con base en este volumen se calculó la cantidad equivalente de oxígeno requerido para la oxidación.

3.5. Optimización

La optimización de celdas de combustible microbiano (CCM) para la generación de bioelectricidad y tratamiento de aguas residuales implica ajustar diversos parámetros operativos y de diseño que influyen directamente en el desempeño eléctrico y la eficiencia de degradación de materia orgánica. Entre los factores más relevantes se encuentran la configuración y materiales de la celda, las condiciones ambientales y la composición del sustrato (Infotec, 2013).

4. Resultados

El análisis de las aguas residuales de la Universidad Peruana Unión en Juliaca-Puno reveló valores promedio de DBO₅ de 380 mg/L y DQO de 620 mg/L, calculados a partir de las mediciones realizadas en dos puntos de muestreo diferentes. Estos valores se obtuvieron mediante el promedio aritmético de las mediciones: DBO₅ promedio = (395 + 365) ÷ 2 = 380 mg/L y DQO promedio = (650 + 590) ÷ 2 = 620 mg/L.

Tabla 2

Caracterización del pH

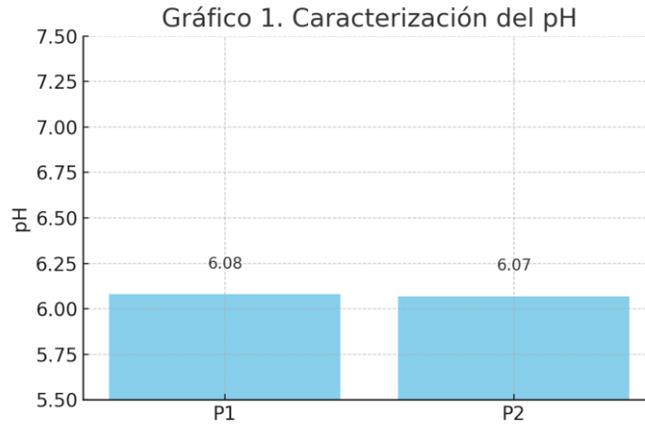
	Ph	Conductividad electrica	DBO5	DQO
P1	6.08	1362 us/cm	395 mg/L	650 mg/L
P2	6.07	2.96 mS/cm	365 mg/L	590 mg/L

Nota. Fuente: Propia.

El potencial de hidrógeno registrado en ambos puntos de muestreo mostró valores muy similares, con 6.08 en P1 y 6.07 en P2, resultando en un promedio de 6.075. Estos valores indican condiciones ligeramente ácidas, encontrándose por debajo del rango óptimo para tratamiento biológico que oscila entre 6.5 y 8.5. Esta característica sugiere la necesidad de implementar un ajuste de pH previo al tratamiento para optimizar la eficiencia de los procesos biológicos.

Grafica 1

Caracterización del pH de ambos puntos de recolección de muestra

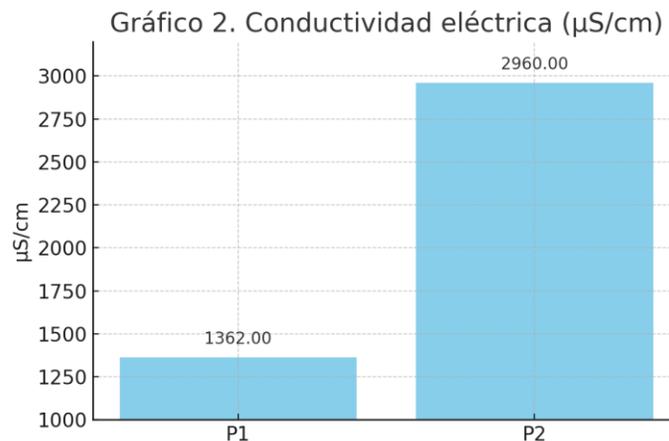


Nota. Fuente: Propia.

Los valores de pH registrados en ambos puntos de muestreo se encuentran consistentemente por debajo del rango óptimo para procesos de tratamiento biológico. La diferencia mínima entre P1 y P2 (0.01 unidades) indica una homogeneidad en las condiciones de acidez del agua residual. Esta condición ligeramente ácida puede atribuirse a la presencia de ácidos orgánicos producto de la descomposición de materia orgánica o a descargas específicas de laboratorios universitarios. El pH actual podría inhibir parcialmente la actividad microbiana en sistemas de tratamiento biológico, reduciendo la eficiencia de remoción de contaminantes. La proximidad al rango óptimo sugiere que con un ajuste menor mediante adición de álcali (como cal o hidróxido de sodio) se puede alcanzar las condiciones ideales para el tratamiento.

Gráfico 2

Caracterización de la conductividad eléctrica de ambos puntos de recolección de muestra

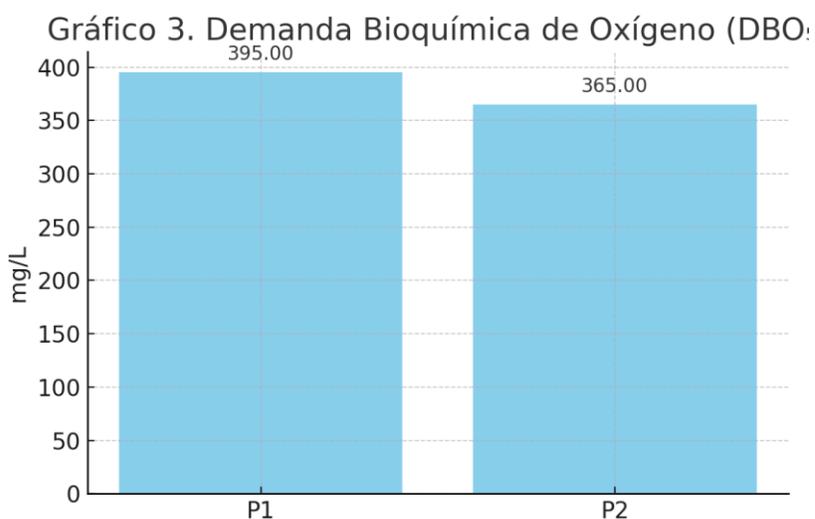


Nota. Fuente: Propia.

La marcada diferencia en conductividad eléctrica entre los puntos de muestreo indica variaciones sustanciales en la concentración de sales disueltas y sólidos totales disueltos. El punto P2 presenta más del doble de conductividad que P1, lo cual puede deberse a varios factores: diferencias en las fuentes de descarga (laboratorios con mayor uso de reactivos químicos, comedores con mayor concentración de sales, o sistemas de limpieza), variaciones en los procesos de dilución dentro del sistema de alcantarillado, o aportes específicos de agua con alta mineralización. Esta variabilidad espacial sugiere que existe una heterogeneidad en las características del agua residual dependiendo del área de la universidad que drena hacia cada punto. Los valores registrados están dentro del rango típico para aguas residuales institucionales, pero la diferencia indica la necesidad de caracterizar mejor las fuentes de descarga.

Gráfico 3

Caracterización de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) de ambos puntos de recolección de muestra

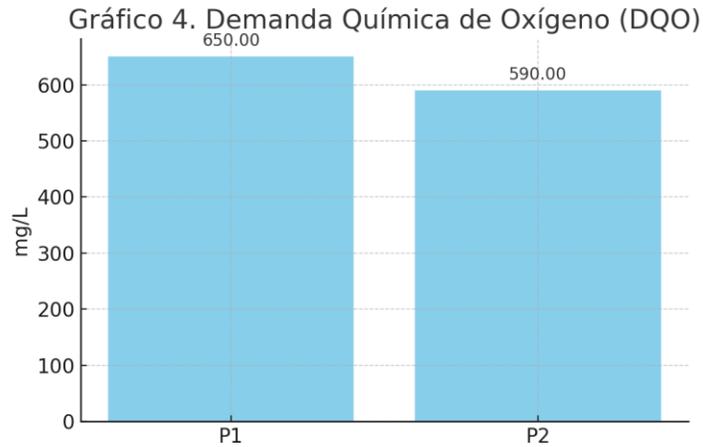


Nota. Fuente: Propia.

Los valores de DBO₅ registrados se encuentran en el rango superior para aguas residuales domésticas, clasificándose como concentración media-alta. El promedio de 380 mg/L supera en aproximadamente 38% el valor de referencia típico, indicando una carga orgánica biodegradable significativa. Esta concentración elevada es característica de instituciones educativas con alta densidad poblacional, donde se concentran actividades de alimentación, servicios sanitarios y posiblemente descargas de laboratorios con material orgánico. La diferencia entre P1 y P2 (30 mg/L) es relativamente pequeña comparada con la magnitud de los valores, sugiriendo una distribución relativamente homogénea de la carga orgánica biodegradable. Estos valores indican que el agua residual contiene una cantidad sustancial de materia orgánica que puede ser efectivamente removida mediante procesos biológicos convencionales.

Gráfico 4

Caracterización de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de ambos puntos de recolección de muestra

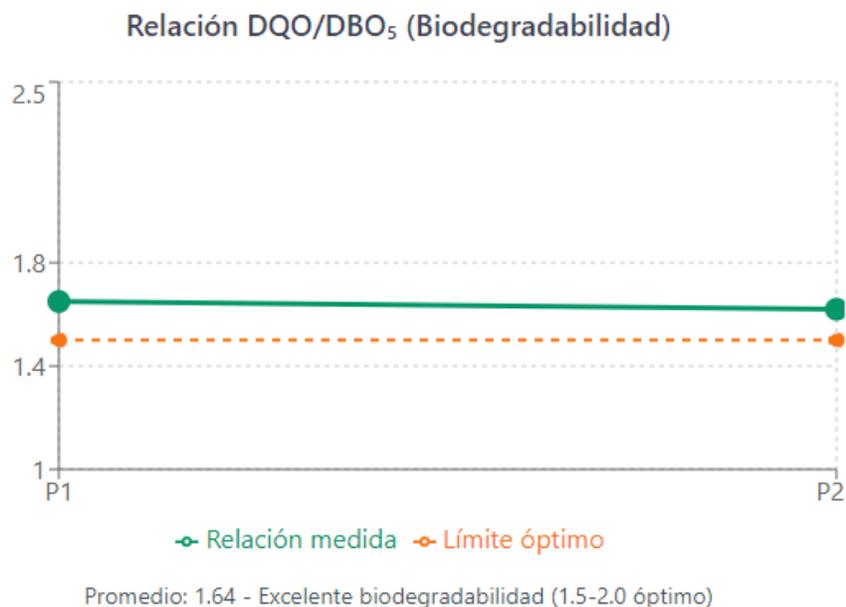


Nota. Fuente: Propia.

Los valores de DQO se mantienen dentro del rango medio para aguas residuales domésticas, con el promedio de 620 mg/L superando en 18% el valor de referencia típico. La concentración es coherente con el perfil de una institución educativa que genera principalmente descargas domésticas. La diferencia entre puntos (60 mg/L) es proporcionalmente similar a la observada en DBO_5 , manteniendo la consistencia en el patrón de distribución de contaminantes.

Grafica 5

Relación DQO/DBO_5



Nota. Fuente: Propia.

La relación DQO/DBO₅ es uno de los indicadores más importantes para evaluar la tratabilidad biológica de las aguas residuales. Los valores obtenidos (1.65 y 1.62) se encuentran dentro del rango óptimo de 1.5-2.0, indicando una excelente biodegradabilidad. Esta relación significa que aproximadamente el 60-65% de la materia orgánica total (representada por DQO) es fácilmente biodegradable (representada por DBO₅). La consistencia entre ambos puntos de muestreo (diferencia de solo 0.03) confirma que las aguas residuales mantienen características similares de biodegradabilidad independientemente de las variaciones locales observadas en otros parámetros.

5. Conclusiones

- La caracterización fisicoquímica de las aguas residuales domésticas del campus de la Universidad Peruana Unión en Juliaca evidenció una carga orgánica media-alta, con valores de DBO₅ y DQO que superan los estándares típicos, y una relación DQO/DBO₅ óptima para la biodegradabilidad. Esto confirma que las aguas residuales analizadas son aptas para ser tratadas mediante procesos biológicos avanzados como las CCM.
- El pH ligeramente ácido (promedio 6.07) registrado en ambos puntos de muestreo subraya la necesidad de realizar un ajuste previo para optimizar la actividad microbiana en las CCM, ya que el rango óptimo para estos sistemas es de 6.5 a 8.5.
- La variabilidad observada en la conductividad eléctrica entre los puntos de muestreo indica diferencias en la composición iónica de las descargas, lo que puede influir en la eficiencia de transferencia de electrones en las CCM. Por ello, es recomendable realizar una caracterización continua y específica de las fuentes de vertimiento.
- La relación DQO/DBO₅ obtenida (1.62–1.65) valida la alta biodegradabilidad de la materia orgánica presente, lo que favorece la generación eficiente de bioelectricidad en las CCM y respalda su uso como alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales en entornos institucionales.
- A través de la caracterización de aguas validamos la efectividad de las Celdas de Combustible microbiano (CCM), ya que, a diferencia de los métodos convencionales, operan a temperatura ambiente, emiten menos CO₂ y no requieren aportes externos de energía cuando el cátodo es aireado pasivamente o funciona como biocátodo. Para su validación, es indispensable la caracterización de parámetros físico-químicos, pues estos determinan la viabilidad y el rendimiento del sistema.
- La aplicación de CCM en contextos de altura y clima frío, como Juliaca, es viable siempre que se realicen los ajustes necesarios en los parámetros del sustrato, lo que abre oportunidades para implementar tecnologías limpias y sostenibles en zonas con limitada infraestructura de saneamiento.

6. Referencias

- Cuenca, D. (15 de 06 de 2012). El tratamiento de agua residual doméstica. Obtenido de El tratamiento de agua residual doméstica: <https://www.redalyc.org/pdf/401/40123894005.pdf>
- Franco, L., & Ricaute, S. (2018). Evaluación de una celda de combustible microbiana para el tratamiento del agua residual del Campus Universitario Meléndez.
- French, J. (16 de 06 de 2016). Wastewater management for coastal cities: the ocean disposal option. Obtenido de Wastewater management for coastal cities: the ocean disposal option: <https://link.springer.com/978-3-642-79729-3>
- Infotec. (2013). *Celdas de combustible microbianas (CCM)*. Recuperado de <https://www.infotec.com/celdas-combustible-microbianas>
- López, I. G. (2020). Desarrollo sostenible. Madrid, España: Editorial Elearning, SL.
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento [VIVIENDA]. (2017). Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Obtenido de http://www3.vivienda.gob.pe/ejes/agua_saneamiento/agua_y_saneamiento.html
- OEFA. (2014), Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA]. (2014). Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales. Lima: Perú Cyclus Print Matt.
- Sánchez, M., Fernández, L., & Espinoza-Montero, P. (n.d.). Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales mediante celdas de combustible microbianas Electric power generation and wastewater treatment using microbial fuel cells. *Novasinerгия*, 2021(1), 164–180. Retrieved May 30, 2025, from <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/rns/v4n1/2631-2654-rns-4-01-00164.pdf>
- Valencia, M. (2018). Evaluación de generación de electricidad y remoción de materia orgánica en celdas de combustible microbiana en aguas residuales del Camal.
- Yee-Batista, C. (diciembre, 2013). Un 70% de las aguas residuales de Latinoamérica vuelven a los ríos sin ser tratadas. Banco Mundial, BIRF – AIF. Recuperado de: <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/01/02/rios-de-latinoamerica-contaminados>