



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Aprovechamiento de agua ácida de relave minero como
sustrato en celdas de combustible microbianas para la generación de
energía eléctrica

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniera Ambiental

AUTORAS:

Salvador Salinas, Angie Vanessa (orcid.org/0000-0002-1725-2162)

Silva Palacios, Fernanda Anais (orcid.org/0000-0002-1059-5410)

ASESOR:

Dr. Quezada Alvarez, Medardo Alberto (orcid.org/0000-0002-0215-5175)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

TRUJILLO — PERÚ
2022

DEDICATORIA

La presente tesis se encuentra dedicada a nuestros padres, quienes nos apoyaron en todo momento, educaron con el ejemplo y nos motivaron a salir adelante para culminar nuestros estudios con éxito y conocimiento para enfrentar nuevos retos.

AGRADECIMIENTO

El más sincero agradecimiento a nuestras familias que durante estos cinco años nos brindaron su apoyo incondicional y se esforzaron al máximo para brindarnos las mejores condiciones en esta etapa de nuestras vidas. También agradecemos al Mg. Misael Villacorta y Dr. Medardo Quezada por orientarnos durante el periodo de desarrollo de este proyecto para llevarlo a cabo de manera satisfactoria. Así mismo al grupo de investigadores del Instituto de Investigación en Ciencia y Tecnología de la Universidad César Vallejo, en especial al Mg. Segundo Rojas, Dra. Magaly De La Cruz y Mblgo. Luis Cabanillas por su valioso tiempo brindado y confianza desde el primer día.

Índice de contenido

Dedicatoria.....	iii
Agradecimiento.....	iv
Índice de contenido.....	v
Resumen.....	viii
Abstract.....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
III. METODOLOGÍA.....	11
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	11
3.2. Variables y operacionalización.....	11
3.3. Población, muestra, muestreo, unidad de análisis.....	12
3.3.2. Muestra.....	12
3.3.3. Muestreo.....	12
3.3.4. Unidad de análisis.....	12
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	13
3.5. Procedimientos.....	13
3.6. Método de análisis de datos.....	16
3.7. Aspectos éticos.....	16
IV. RESULTADOS.....	17
V. DISCUSIÓN.....	35
VI. CONCLUSIONES.....	44
VII. RECOMENDACIONES.....	45
REFERENCIAS.....	46
ANEXOS.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros físico - químicos iniciales de cada sustrato.	19
Tabla 2: Microorganismos identificados a partir del ánodo de las CCMs con agua ácida de relave minero.	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diseño de celda de combustible microbiana de una cámara con cátodo de aire a escala de laboratorio.	17
Figura 2: Celda de combustible microbiana de una cámara con alimentados con sustratos.	18
Figura 3: Valores de voltaje a partir de la monitorización de las CCMs.	20
Figura 4: Valores de corriente a partir de la monitorización de las CCMs.	21
Figura 5: Valores de pH a partir de la monitorización de las CCMs.	22
Figura 6: Valores de pH en función a la corriente del blanco a partir de la monitorización de las CCMs.	22
Figura 7: Valores de pH en función a la corriente del agua ácida a partir de la monitorización de las CCMs.	23
Figura 8: Valores de pH en función a la corriente de la bacteria <i>Serratia fonticola</i> a partir de la monitorización de las CCMs.	23
Figura 9: Valores de pH en función a la corriente de la levadura <i>Rhodotorula mucilaginosa</i> a partir de la monitorización de las CCMs.	24
Figura 10: Valores de turbidez a partir de la monitorización de las CCMs.	25
Figura 11: Valores de turbidez en función a la corriente del blanco a partir de la monitorización de las CCMs.	25
Figura 12: Valores de turbidez en función a la corriente del agua ácida a partir de la monitorización de las CCMs.	26
Figura 13: Valores de conductividad eléctrica a partir de la monitorización de las CCMs.	27
Figura 14: Valores de conductividad eléctrica en función a la corriente del blanco a partir de la monitorización de las CCMs.	27
Figura 15: Valores de conductividad eléctrica en función a la	

corriente del agua ácida a partir de la monitorización de las CCMs.	28
Figura 16: Valores de conductividad eléctrica en función a la corriente de la bacteria <i>Serratia fonticola</i> a partir de la monitorización de las CCMs.	28
Figura 17: Valores de conductividad eléctrica en función a la corriente de la levadura <i>Rhodotorula mucilaginosa</i> a partir de la monitorización de las CCMs.	29
Figura 18: Valores de resistencia eléctrica interna a partir de la monitorización de las CCMs con agua ácida de relave minero.	30
Figura 19: Valores de resistencia eléctrica interna a partir de la monitorización del blanco.	30
Figura 20: Valores de resistencia eléctrica interna a partir de la monitorización de las CCMs con bacteria <i>Serratia fonticola</i> .	31
Figura 21: Valores de resistencia eléctrica interna a partir de la monitorización de las CCMs con levadura <i>Rhodotorula mucilaginosa</i> .	31
Figura 12: Microorganismos aislados del ánodo de las CCMs con blanco.	33
Figura 13: Microorganismos aislados a partir del ánodo de las CCMs con agua ácida de agua ácida relave minero.	34

RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el uso de agua ácida de relave minero como sustrato para la generación de energía eléctrica a través de celdas de combustible microbianas de una cámara, a fin de buscar una alternativa de reúso de estas aguas y contribuir con tecnologías ecoamigables que logren el apaciguamiento de la alta demanda de energía eléctrica. Esta investigación fue aplicada y de diseño experimental, siendo las variables el agua ácida de relave minero y la energía eléctrica. Se construyó una celda de combustible microbiana (CCM) de cámara única con cátodo de aire, que tuvo como electrodos una placa de grafito como ánodo y cátodo. Además, se midieron parámetros fisicoquímicos durante 30 días a temperatura ambiente ($18 \pm 2,2$ °C). El voltaje, corriente y turbidez, lograron valores pico de 0.65 ± 0.02 V, 1.83 ± 0.04 mA, 981.5 ± 13.44 NTU respectivamente, además el agua ácida de relave minero operó a pH ácido y valores de conductividad mayores a 146 mS/cm. Se identificaron *Serratia fonticola* y *Rhodotorula mucilaginosa* del ánodo de las CCMs. Estos resultados demostraron que fue de utilidad el agua ácida de relave minero como sustrato en las CCMs para la generación de energía eléctrica sostenible.

Palabras clave: Celdas de combustible microbianas, agua ácida de relave minero, energía eléctrica, microorganismos.

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the use of acid mine tailings water as a substrate for the generation of electric energy through single-chamber microbial fuel cells, in order to find an alternative for the reuse of this water and contribute with eco-friendly technologies that achieve the alleviation of the high demand for electric energy. This research was applied and of experimental design, being the variables acid mine tailings water and electric energy. A single chamber microbial fuel cell (MFC) with an air cathode was constructed, which had a graphite plate as anode and cathode electrodes. In addition, physicochemical parameters were measured for 30 days at room temperature (18 ± 2.2 °C). Voltage, current and turbidity, achieved peak values of 0.65 ± 0.02 V, 1.83 ± 0.04 mA, 981.5 ± 13.44 NTU respectively, and the acid mine tailings water operated at acid pH and conductivity values greater than 146 mS/cm. *Serratia fonticola* and *Rhodotorula mucilaginosa* were identified from the anode of the MCCs. These results demonstrated that acid mine tailings water was useful as a substrate in the MFC for sustainable power generation.

Keywords: Microbial fuel cells, acid mine drainage, electric power, microorganisms.

I. INTRODUCCIÓN

La crisis por la escasez energética, en los últimos años es de gran importancia y la humanidad se encuentra en la búsqueda de nuevas tecnologías, las cuales sean relevantes al uso de energías alternas, las mismas que sean fuentes de energía limpia y sostenible. Asimismo, en el Perú existen pueblos alejados que son zonas rurales estos tienden a tener muchas limitaciones para el desarrollo de sus actividades, y una de las principales es la energía eléctrica (Odar, 2016, p. 12). Por ello, la utilización de combustibles para la producción de energía es un problema global; es así que, el uso de este agente biológico para la producción de energía ha contribuido a la destrucción del paisaje natural. Sin embargo, desde la perspectiva ambiental, la energía renovable es una alternativa eficaz para reducir las emisiones de dióxido de carbono y otros factores de contaminación. (Santander, 2020, p. 18).

Por otro lado, la contaminación del recurso hídrico son problemas a nivel mundial que perjudican el desarrollo de la sociedad. En el Perú, principalmente se suscitan en las zonas andinas, donde se lleva a cabo la actividad minera; generando contaminación desenfrenada en los recursos naturales y que origina gran preocupación en toda la población. Los efluentes de las industrias mineras contienen una gran variedad de iones de metales pesados (Zhao et al., 2017, p. 20), los cuales son relativamente densos, tóxicos y se encuentran presentes en altas concentraciones, lo que constituye un gran peligro tanto para los ecosistemas como para la salud humana (Ai, et al., 2020, p. 15).

Es por ello que, destacamos que la contaminación del agua ácida de relave minero es uno de los problemas ambientales más preocupantes, y al no tener un valor agregado de reutilización como materia prima para otra actividad viene siendo una amenaza latente; ya que estos metales también se encuentran en suelos, sedimentos, así como en las áreas de

influencia de extracción y procesamiento de minerales (Kaushik y Singh, 2020, p. 10).

De manera que, al considerar el agua y energía como parte imprescindible para las actividades antropogénicas es necesaria su protección y el uso de tecnologías innovadoras para evitar o minimizar impactos ecológicos por su gran demanda; lo que conlleva a la necesidad de realizar investigaciones conjuntas en el campo de la ingeniería ambiental para buscar una alternativa colaborativa del reúso de estas aguas ácidas de mina para la mitigación de los impactos ecológicos que provoca (Jadhav et al., 2017, p. 12); influyendo así a la presente investigación que propone generar energía eléctrica a través de Celdas de Combustible Microbianas alimentadas con agua ácida de relave minero como sustrato. Estas, logran contribuir de tal manera con la conservación de fuentes de agua y el apaciguamiento de la alta demanda de energía eléctrica, minimizar el consumo de energía proveniente de combustibles fósiles y de esta manera reducir las emisiones de efecto invernadero para contribuir con la mitigación del cambio climático (Guadarrama-Pérez et al., 2019).

Ante la situación expuesta surge el siguiente problema de investigación, ¿será de utilidad el uso del agua ácida de relave minero como sustrato en celdas de combustible microbianas para la generación de energía eléctrica?

En base a lo mencionado anteriormente, esta investigación tiene como objetivo general evaluar el uso de agua ácida de relave minero como sustrato para la generación de energía eléctrica a través de celdas de combustible microbianas de una cámara; como objetivos específicos tiene construir celdas de combustible microbianas de una cámara a escala de laboratorio, evaluar los parámetros de voltaje, corriente,

turbidez, pH, conductividad y resistencia interna durante el proceso de funcionamiento de las celdas de combustible microbiana de una cámara; así como identificar los microorganismos presentes en el ánodo de las celdas de combustible de una cámara con mayor voltaje.

De manera que, la presente investigación planteó como hipótesis que es de utilidad el uso del agua ácida de relave de minera aurífera como sustrato en celdas de combustible microbianas para la generación de energía eléctrica.

Esto se justifica debido a que mediante el presente trabajo se busca incentivar la investigación de nuevas tecnologías que funcionen con fuentes de energía renovable y sostenible para reducir costos y contribuir a la mitigación de la contaminación de los recursos naturales y contrarrestar el cambio climático; como lo hacen las celdas de combustible microbianas a través de las aguas ácidas de relave minero, los cuales funcionan como sustrato y se le brinda un valor agregado, para la generación de energía eléctrica.

La celda de combustible microbiana es un biorreactor (Tabassum et al., 2021, p. 12) en el que bacterias bioelectroquímicas transfieren electrones para realizar biorremediación, biorrecuperación de metales y materiales puros (Fadzli et al., 2021, p. 21), así como el procesamiento de sustancias, tratamiento de contaminantes ambientales, producción de energía eléctrica, etc. (Wang et al., 2019, p. 17). Y presenta ventajas como lo son la conversión directa del sustrato en electricidad, condiciones de operación adaptables, sin necesidad de tratamiento de gas, sin usar energía para el proceso de aireación y se puede aplicar en áreas rurales (He et al., 2017, p. 22).

II. MARCO TEÓRICO

Existen diversos estudios que se enfocan en el tratamiento de aguas residuales con presencia de metales pesados y la generación de energía eléctrica; sin embargo, están orientados al tratamiento de estas aguas y como sustrato contienen soluciones preparadas en laboratorio. Esto conllevó al cuestionamiento sobre lo que ocurriría con agua ácida de relave minero reales y enfocados en la generación de energía eléctrica a través de Celdas de Combustible Microbianas (CCMs), por ello se presentan los siguientes antecedentes que aportan al desarrollo y cuentan con relación a los objetivos de la presente investigación.

Según Gul, et al. (2021, p. 01-15); en su estudio presenta como objetivo construir un sistema de recolección de energía que tenga una producción de energía neta positiva, lo que puede hacer que el sistema sea sostenible, es así que se afirma que las CCMs están reconocidas como una excelente opción para la aplicación simultánea de la generación de bioenergía y el tratamiento de aguas residuales. Además, como resultado se obtuvo que los consorcios microbianos electrogénicos generan energía gracias a la biodegradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales. Es así, que se logró el potencial anódico estándar producido por la oxidación fue de $-0,296$ V, mientras que el potencial catódico producido por la oxidación - reducción fue de $0,805$ V.

Autor Rojas, et al. (2021, p. 01-14); en su estudio de generación de bioelectricidad a partir de aguas residuales mediante celdas de combustible microbianas de bajo costo, según el monitoreo se presentan los siguientes valores de voltaje inicial fue de 0.189 ± 0.12 V; asimismo, estos valores de voltaje fueron incrementando hasta el día 21, donde muestra un valor pico de 0.349 ± 0.21 V; posterior a ello, decae drásticamente hasta 0.025 ± 0.008 mV en el último día de monitoreo de los valores voltaje y corriente de celdas de combustible microbianas. A consecuencia, el aumento progresivo del voltaje en los días iniciales se

debe principalmente a la aclimatación y la degradación del sustrato utilizado por los microorganismos generadores de electricidad, en el electrodo anódico, en su metabolismo.

La función de las CCMs consta en la conversión de la energía química en eléctrica por medio de reacciones redox catalizadas por microorganismos (Sumisha y Haribabu, 2021, p.1). De manera que, son un biorreactor en el que los microorganismos electroactivos transfieren electrones para realizar biorremediación, biorrecuperación de metales y materiales puros, tratamiento de campo de contaminantes ambientales, producción de energía, entre otros (Wang et al., 2019, p. 7). Las ventajas de aplicar este método son la conversión directa del sustrato en electricidad, bajo volumen de lodos, condiciones de operación adaptables, sin tratamiento de gases y sin energía para el proceso de aireación y se puede aplicar en áreas rurales.

Cabe precisar que, los sistemas habituales de tratamiento de efluentes industriales poseen restricciones que hacen que el costo de funcionamiento y mantenimiento sean elevados. Estas pueden incluir la precipitación química, extracción con solventes, solidificación, adsorción, neutralización de acidez, reducción (Kaushik y Singh, 2020, p. 6), flotación con espuma o floculación, control de toxicidad, entre otros; siendo complejos por sus procedimientos, gran consumo de energía y falta de consideración hacia el medio ambiente.

A todo esto, las CCMs según su construcción son de dos cámaras o una cámara. En este trabajo nos centramos en la CCM de una cámara con cátodo de aire, donde este queda expuesto al exterior para que reaccione con el oxígeno que se encuentra presente en el aire; ayudando a minimizar costos debido a que ya no se necesita la adición química del oxígeno (Butti, et al., 2016, p. 6). Además, ambos electrodos (ánodo y cátodo) se encuentran en una cámara individual y sin membranas en el interior siendo factible económicamente (Gul et al., 2021, p. 6), así mismo, posee alto rendimiento y es ambientalmente viable. Es decir, el ánodo, cátodo, sustrato e inóculo se encuentran operando juntos para

generar energía eléctrica (Anexo 26).

De manera que, el funcionamiento de las CCMs se ve afectado por los materiales empleados para la construcción del sistema, estructura, microorganismos presentes, sustrato y las condiciones del entorno (Wu et al., 2021, p. 25). En la obtención de energía, los electrodos impulsan al desenvolvimiento de la diferencia de potencial que actúan como fuerza propulsora neta en la transferencia de electrones desde el ánodo al cátodo y de tal manera ocasionar equivalentes reductores como lo son los electrones con forma de portadores redox (Butti, et al., 2016, p.6).

El ánodo funciona como electrodo de oxidación (aceptor de electrones) y el cátodo como electrodo de reducción (donante de electrones) para acelerar el metabolismo microbiano que cataliza las reacciones redox bioelectroquímicas (Butti, et al., 2016, p.3). Es decir, en presencia de microorganismos electrógenos los donantes de electrones se oxidan en el ánodo generando electrones, mientras que los sustratos reducibles se reducen en el cátodo por la presencia de oxígeno, de manera que acepta los electrones generados por parte del ánodo (Bagchi y Behera, 2020, p. 2). Esta transferencia de electrones generados al cátodo y la migración de los mismos al ánodo produce diferencia de voltaje y por lo tanto es la responsable de la generación de energía eléctrica (He et al., 2017). Esto implica que, los productos tóxicos presentes en las CCMs se transformen en productos con menor toxicidad o se produzcan productos de valor añadido (Gul et al., 2021, p. 2).

Además, la posición del cátodo en la CCM influye debido a que, al emplear un cátodo de aire, el oxígeno facilita las reacciones y por consiguiente genera alto rendimiento energético en comparación a cuando se usa un cátodo sumergido (Nealson, 2017, p. 4). De la misma manera, el sustrato es parte fundamental del proceso de funcionamiento de la CCM, su composición química y concentración afecta en la entrega de electrones por parte de las bacterias, por lo tanto, en la generación de electricidad (Butti, et al., 2016, p. 4). Entre los sustratos se encuentran

los simples; entre los cuales destacan la glucosa, acetato, butirato, almidón, lactosa, melaza, entre otros, ya que son comúnmente estudiados; y los complejos como las aguas residuales, lodos, sedimentos, residuos orgánicos, lixiviados de residuos de alimentos, entre otros (Tharali et al., 2016, p. 2).

Cabe precisar que, en las aguas residuales donde se encuentran presentes metales pesados, el potencial redox de estos presenta influencia en la generación de energía eléctrica. Existen metales pesados que poseen un considerable potencial redox (reducción y oxidación) los cuales son bioacumulables exitosamente en las CCMs, por lo tanto, también incrementan la eficiencia en generación de energía eléctrica; entre ellos se encuentran el cobre, plata, oro, cromo, cobalto, vanadio, selenio, mercurio, zinc, etc. (Kaushik y Singh, 2020, p. 27).

La eficiencia de las CCMs depende de las condiciones de operación, debido a la susceptibilidad de los procesos, el pH juega un rol sumamente importante (Kaushik y Singh, 2020, p. 8) a causa que, su incremento impacta sobre la densidad de corriente por la simple transferencia de electrones. Sustratos con pH ácido generan inestabilidad en las biomoléculas de la célula provocando alteraciones en los parámetros físicos, concentraciones de los iones, así como en la transferencia de protones; por otro lado, la transferencia extracelular de electrones se incrementará con esta característica del pH, puesto que facilita el traslado de los electrones del interior de la célula al exterior (Butti, et al., 2016, p.10). Insignificantes impactos en la eficiencia se originan por la variación de temperatura, sin embargo, investigaciones evidenciaron que a mayores temperaturas superiores son los resultados (Agrawal et al., 2019, p. 18). La alimentación por lotes y continua hacen visibles las óptimas respuestas respecto a eficiencia; en este proyecto nos centramos en el sistema por lotes para conocer sus propiedades en un tiempo determinado.

Cabe mencionar que, los materiales que se usan en para elaborar los electrodos anódicos y catódicos deben poseer compatibilidad, alta

superficie específica, además de no ser corrosivos (Roy et al, 2019, p. 9). Ejemplo de ello son los electrodos a base de carbono como el carbono simple y grafito en sus presentaciones como placa, lámina, fieltro, varilla, entre otros (Fang y Achal, 2019, p. 5). Estos, poseen bajo costo y el requerimiento de mantenimiento es mínimo en razón a su propiedad no corrosiva. Por otro lado, también son comúnmente usados los electrodos de base metálica, los cuales son altamente favorables para la obtención de un eficiente rendimiento, a causa de sus propiedades de conductividad eléctrica, durabilidad y sencillez para lograr adhesión microbiana en su superficie; entre estos se encuentran el cobre, acero inoxidable, níquel, aluminio y otros (Palanisamy, et. al, 2019, p. 6). Así mismo, los microorganismos poseen importancia debido a que absorben el sustrato (sustancias simples, complejas, mixtas) y lo catalizan por medio de reacciones redox para la generación de energía limpia (Gul et al., 2021, p. 4). Se consideran microorganismos electroquímicamente activos a los que posean alta capacidad de descarga de electrones y transferencia extracelular de electrones (Butti, et al., 2016, p.4).

Los microorganismos electroactivos poseen la facultad de donar (electrógenos) o aceptar (electrótrofos) electrones desde un sustrato (Lovley y Holmes, 2022, p. 2). Los microorganismos electrógenos liberan los electrones sobre la superficie del ánodo, siendo representados y cuantificables como corriente eléctrica positiva, sin embargo, los microorganismos electrótrofos son las encargadas de recuperar estos electrones desde la superficie del cátodo (Yee et al., 2020, p. 2). Aunque, es necesario mencionar que ciertos microorganismos logran desempeñarse de ambas maneras, considerando las condiciones en las que se encuentren presentes (Lovley y Holmes, 2022, p. 17).

La transferencia extracelular de electrones (TEE) se desarrolla mediante dos mecanismos (Hossain et al., 2018, p. 20). El primero es la transferencia directa de los electrones, donde el electrógeno acepta un donante de electrones para el metabolismo oxidativo, pero sin ningún aceptor de electrones y el electrótrofo se encuentra suministrado

solamente de un aceptor de electrones (Yee et al., 2020, p.14). Durante este proceso los microorganismos presentan generalmente contacto físico mediante las proteínas conductoras de electrones, es decir realizan la transferencia de los electrones por medio de la membrana celular que poseen, como lo son los pili conductores de electricidad, membrana externa de los citocromos multiheme de tipo C, extensiones de cable de la membrana externa de los citocromos multiheme de tipo C, extensiones periplásmicas o proteínas; que asiste al citoplasma para realizar la transferencia de los electrones a la membrana externa de la célula y para luego formar biopelículas sobre el electrodo (Yee et al., 2020, p. 5). Estos mecanismos varían en cada especie de microorganismo, por el desarrollo y características de facilidad de adaptación al medio en el que se encuentren. Entre ellas se encuentran las *Geobacter sulfurreducens.*, *Aeromonas hydrophilia*, *Clostridium sp.* *Arcobacter sp.* *Rhodoferax sp.*, *Orchrobactrum sp.* y *Shewanella putrefaciens* (Agrawal et al., 2019, p. 20). Y el segundo mecanismo es la transferencia indirecta o mediada de electrones, donde el microorganismo recibe el electrón desde el interior de la membrana celular, reduciendo y transfiriendo los electrones al ánodo (Butti, et al., 2016, p.4). Este mecanismo posee dos categorías que son los mediadores por lanzaderas redox y los mediadores por enzimas extracelulares secretados por otros microorganismos que generan sustancias químicas difusibles (Kaushik y Singh, 2020, p. 12).

La transferencia con mediadores por lanzaderas redox proceden como transportadoras de electrones, entre estos las flavinas, fenazinas y menaquinona soluble, vinculando las reacciones dentro y fuera de la célula; sin embargo, son más eficaces dependiendo de la distancia entre electrodos y la riqueza de materia orgánica del sustrato (Lovley y Holmes, 2022, p. 19). Como ejemplo de ello, se encuentran las bacterias gram positivas *Listeria monocytogenes* y las bacterias gram negativas como la *Pseudomonas*, *Shewanella* y la *Serratia sp.* (Thulasinathan, 2020, p. 12) la cual poseen flagelos peritricosos que a través de su movimiento cumplen la función de transporte de electrones (Agrawal et

al., 2019, p. 13). Los *Bacillus sp.*, *Chlorobium limicola*, *Rhodobacter sphaeroides*, *Rhodopseudomonas palustris*, *Chlamydomonas reinhardtii* y *Escherichia coli* también son ejemplo de ello (Yee, et al., 2020, p. 20). Además, las especies *Enterobacter cloacae*, *Geothrix fermentans*, *Micrococcus luteus*, *Proteus vulgaris*, *Shewanella japonica*, *Shewanella loihica* y *Shewanella oneidensis* poseen ambos mecanismos de transferencia de electrones (Koch, 2016, p.7).

Por otro lado, las levaduras son particulares y especiales por su rápido crecimiento unicelular y a la vez su adaptación a crecer en medios líquidos, como por ejemplo *Rhodotorula slooffiae*, *Rhodotorula mucilaginosa*, *Rhodosporium babievae*, entre otras que según estudios afirman que las paredes celulares de éstas son capaces de enlazar cantidades importantes de Calcio (Ca^{2+}) además, de un amplio rango de iones de metales pesados que son acumulables en su sistema (Arias y Covinos, 2021, p. 21); asimismo, la biomasa de levadura es apta de absorber cantidades considerables de cationes y otros elementos químicos en el medio de crecimiento (Fang y Achal, 2019, p. 12).

Finalmente, las levaduras son eucariotas que presentan mecanismos catabólicos en el citoplasma (vías glucolíticas), matriz mitocondrial y membrana interna mitocondrial, dificultando la accesibilidad de los electrones al interior de la celda a diferencia de las procariotas que tienen ubicado el sistema en la membrana celular (Elabed, 2021, p. 4). A todo ello, es importante conocer qué microorganismos pueden tolerar hasta ciertos niveles de concentración de estos metales, esta tolerancia que presenten será una ventaja para la obtención de energía eléctrica (Wang et al., 2018, p. 16).

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

El tipo de investigación del proyecto fue aplicativo, debido a que se encontró encaminado a la generación de energía eléctrica a través de celdas de combustible microbianas; por lo tanto, enfocado a la resolución de problemas relacionados a las actividades antropogénicas y que como producto brindan conocimiento tecnológico (Nicaragua, 2018, p. 22).

El diseño del presente proyecto fue experimental; ya que se procedió a verificar cuantitativamente la relación que posee una variable sobre otra en uso de celdas de combustible microbianas para la generación de energía eléctrica, implicando de tal manera la manipulación de manera intencional de la variable independiente, lo que da a entender que se tuvo un plan de acción que fue establecido por etapas para posteriormente observar y conocer el comportamiento que presenta la variable dependiente (Arias y Covinos, 2021, p. 81).

Además, según el diseño empleado fue cuasi experimental, puesto que se construyeron y pusieron en marcha celdas como control en las cuales se monitorearon los mismos parámetros que en las celdas de combustible microbianas con agua ácido de relave minero como sustrato, para su posterior comparación de resultados y verificación de cambios ocurridos (Arias y Covinos, 2021, p. 84).

3.2. Variables y operacionalización

Se consideró como variable independiente el agua ácida de relave minero en las celdas de combustible microbianas. Y como variable dependiente se consideró a la energía eléctrica generada por las

CCMs. La operacionalización de estas variables puede evidenciarse en el Anexo 1.

3.3. Población, muestra, muestreo, unidad de análisis

3.3.1. Población

La población del proyecto estuvo comprendida por el volumen total del agua ácida de relave minero, en los días de investigación, tomada en la Relavera Santa Catalina.

3.3.2. Muestra

Para las pruebas experimentales de este proyecto se tomó 2 litros de muestra de agua ácida de relave minero de la Relavera Santa Catalina. Este volumen de agua fue usado para los experimentos de la investigación y los análisis requeridos. La ficha de recolección de datos del lugar de la muestra se evidencia en el anexo 2.

3.3.3. Muestreo

El muestreo fue no probabilístico, puesto que se eligió la población en relación con el propósito de la investigación de manera que en este caso no se utilizó métodos estadísticos de muestreo. Además, según la forma de elegir a la muestra fue por el método de muestreo intencional usando el criterio de inclusión y exclusión de los autores (Arias y Covinos, 2021, p.124).

3.3.4. Unidad de análisis

Celda de combustible microbiana empleando 100 ml de agua ácida de relave de minero como sustrato.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La observación fue la técnica mediante la cual se desarrolló esta investigación, definida como una técnica que facilita observar el comportamiento o reacción (Arias, 2020, p. 12). En este caso se empleó la observación directa de los datos obtenidos en el monitoreo de los parámetros de las CCMs.

Además, se usó una ficha como instrumento de recolección de datos, ya que permitió obtener información para posteriormente analizarla y evaluarla (Arias, 2020, p. 15).

3.5. Procedimientos

3.5.1. Identificación del punto de muestreo y toma de muestra

En la Región La Libertad, Provincia de Santiago de Chuco, Distrito de Quiruvilca exactamente en la Relavera Santa Catalina del poblado de Shorey a una altitud de 3,818 msnm, en las vertientes del flanco Este de la cordillera Occidental de los Andes, zona naciente del Río Moche (SEDALIB, 2018, p. 52), se seleccionó un sitio específico para el muestreo de agua ácida de relave minero para uso como sustrato en las celdas de combustible microbianas.

El punto específico del muestreo está situado en dentro de la Relavera Santa Catalina, a una latitud de $8^{\circ}1'39,954''S$ y longitud de $78^{\circ}18'36,852''O$ (Anexo 24) aproximadamente y donde se evidenció aguas de color rojizo.

Se colectó 2 litros de muestra de agua ácida de relave minero en una botella de polietileno de alta densidad (Anexo 25). Para la conservación de esta muestra se almacenó a $4^{\circ}C$ para luego ser transportada al laboratorio en el cual se le realizaron los análisis correspondientes (Leiva, et al., 2018, p. 3).

3.5.2. Preparación de sustratos

El agua ácida de relave minero fue empleada como sustrato en dos CCMs. En las dos CCMs de referencia se usó 200 ml de agua ácida autoclavado a 130 °C.

3.5.3. Construcción de las CCMs

Para esta investigación las CCMs estuvieron diseñadas con una sola cámara de cátodo de aire y electrodos (ánodo y cátodo) (Figura 1). Para la construcción de la CCM se empleó un prototipo de vidrio transparente borosilicato de 100 ml de capacidad. El ánodo constó de una placa de grafito de 3 cm de ancho y 5.50 cm de largo y el cátodo de una placa de grafito de 1 cm de radio x 2 cm de longitud. Cada electrodo se conectó a un cable de cobre de 0,5 mm de espesor a los extremos, previamente lijado para quitarle la protección plástica. Se fabricaron 8 CCMs de una sola cámara con cátodo de aire, las cuales posteriormente fueron esterilizadas bajo una lámpara de luz UV en la cabina de bioseguridad (JSR Biological Safety Level Class II Type A2) por un periodo de 20 minutos (Yang, et al., 2019, p. 3).

3.5.4. Monitoreo de parámetros

Se realizó el monitoreo diario del voltaje y corriente eléctrica por medio de un multímetro marca Prasek Premium PR-85; pH (pH- meter 110 Series Oakton), conductividad eléctrica (conductivity meter CD-4301), turbidez (turbidímetro Lutron TU - 2016) y resistencia mediante un sensor de energía (Vernier- $\pm 30V$ & ± 1000 mA).

3.5.5. Aislamiento e identificación de microorganismos anódicos

Finalizada la etapa de mediciones, se procedió a aislar los

microorganismos. Para la toma de muestra se empleó el método del hisopado (Charro, 2022, p. 27) en el área de la placa del ánodo. Seguidamente, se realizaron cultivos en caldo BHI y caldo medio mínimo de sales (MMS), el cual contenía 6 g/l de $Na_2(HPO_4)$, 3 g/l KH_2PO_4 , 1 g/l NH_4Cl , 0,5 g/l $NaCl$, 0,246 g/l $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 0,01 g/l $CaCl_2$ y 0,5% de glucosa (Kabir et al., 2018, p. 3) y fueron incubados a 33 °C por 24 horas.

Posteriormente, se realizó la siembra por medio del método de estriado en placas Petri en una placa con Agar MMS para el aislamiento de bacterias y Agar Sabouraud modificado al 2%, que contuvo en su composición 10 g/l de peptona, 20 g/l de glucosa y 20 g/l de agar agar y la modificación radicó en la adición de 4% de MMS (Orbegoso, et al., 2018, p.2) para el aislamiento de hongos y levaduras. El periodo de incubación fue de 24 horas a 33 °C.

Una vez aislados los microorganismos, se realizó la coloración Gram y azul de metileno para la identificación mediante las características morfológicas microscópicas. Consiguientemente, los cultivos axénicos o puros fueron enviados al laboratorio Ecobiotech Lab S.A.C. para la identificación molecular, empleando técnicas de biología molecular; usándose para identificar bacterias el gen 16S rRNA, debido a que tiene una secuencia altamente conservada; mientras que, para identificar levaduras se utilizó las secuencias ITS (Internal Transcribed Spacer).

3.5.6. Inoculación de cepas en CCMs para su evaluación electrogénica

La cepa identificada, fue inoculada en una CCM que contenía un medio mínimo de sales, de acuerdo a la siguiente

composición: 6 g/l de $Na_2(HPO_4)$, 3 g/l KH_2PO_4 , 1 g/l NH_4Cl , 0,5 g/l $NaCl$, 0,246 g/l $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 0,01 g/l $CaCl_2$ y 0,5% de glucosa (Kabir, et al., 2018, p. 3). Se realizó por duplicado y se realizó lo mencionado en el ítem 3.5.4.

3.6. Método de análisis de datos

En consecuencia, se realizó un análisis estadístico de los datos que se obtuvieron de las celdas de combustibles microbianas, a través del programa Microsoft Excel que permitió su tabulación, calcular la desviación estándar y promedio de estos datos, el segundo programa fue el Software libre OriginLab - Data Analysis and Graphing Software (Yaqoob et al., 2020, p. 12) que permitió elaborar los gráficos en base a la data previamente obtenida. Todo ello, nos sirvió de apoyo para la discusión de resultados y conclusiones del proyecto de investigación teniendo en cuenta el rigor científico para la validez y confiabilidad de lo desarrollado.

3.7. Aspectos éticos

En cuanto a los aspectos éticos en esta investigación cabe resaltar que se respetó la autoría de todos los documentos consultados y citando cada uno de ellos, de forma que no sea considerado como copia o plagio intelectual y añadiendo así originalidad en la información expuesta.

IV. RESULTADOS

4.1. Diseño de la CCM

Las CCMs permiten generar energía eléctrica mediante el uso de sustratos, tal como se evidencia en la presente investigación.

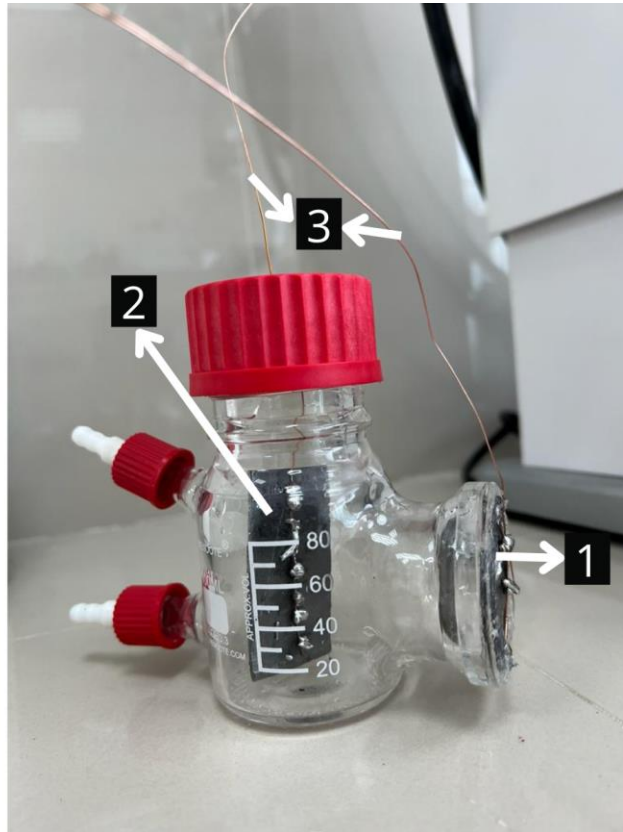


Figura 1: Diseño de celda de combustible microbiana de una cámara con cátodo de aire a escala de laboratorio.

Nota. La figura representa el diseño de la CCM de una cámara y los componentes son: Cátodo de grafito (1); Ánodo de grafito (2) y alambres de cobre (3).

En la figura 1, se muestra el diseño de la CCM empleada en la presente investigación, la cual se construyó a partir de un prototipo con cátodo de aire, y de material de vidrio transparente borosilicato de 100 ml de capacidad. Los electrodos constan de una placa de

grafito como ánodo y como cátodo. Además, los parámetros fisicoquímicos que se midieron fueron el voltaje (V), corriente eléctrica (mA), pH, turbidez (NTU) y conductividad eléctrica (mS/cm) de las CCMs de cámara única para cada una de las condiciones, se realizó el monitoreo diario durante 30 días y todos los datos se midieron a temperatura ambiente ($18 \pm 2,2$ °C).

Las CCMs de una cámara generaron energía eléctrica a través del uso de agua ácida de relave minero como sustrato, el blanco (agua ácida de relave minero autoclavado), así como el medio mínimo de sales (MMS) empleado para la identificación de la capacidad electrogénica de los microorganismos aislados.

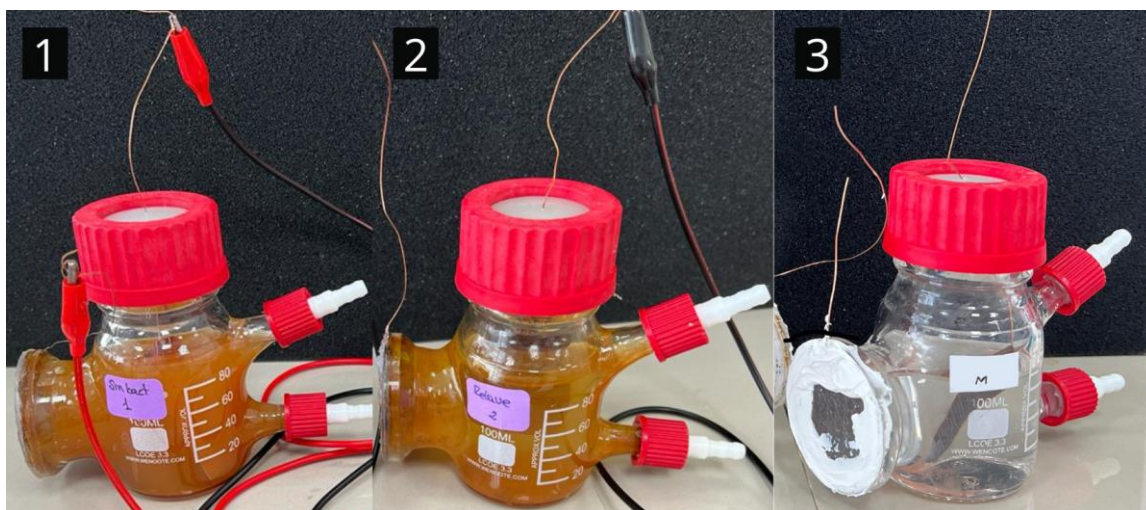


Figura 2: Celda de combustible microbiana de una cámara con alimentados con sustratos.

Nota. La figura representa los sustratos usados en este proyecto: Blanco (1); Agua ácida de relave minero (2) y Medio mínimo de sales (3).

En la figura 2, se muestran los sustratos empleados en las CCMs en ambas etapas de la presente investigación. En la primera parte del proyecto se operaron las CCMs con blanco y las CCMs con agua

ácida de relave minero; en la segunda parte del proyecto se operaron las CCMs con MMS inoculadas con bacteria, así como las CCMs con MMS inoculadas con levadura.

4.2. Interpretación de los parámetros físico - químicos

	PH	CONDUCTIVIDAD D (mS/cm)	TURBIDEZ (NTU)
Blanco	2.73	220.00	228.00
Agua ácida	2.95	148.00	804.00
Bacteria	2.98	239.30	0,05
Levadura	2.97	241.10	0,05

Tabla 1: Parámetros físico - químicos iniciales de cada sustrato.

Los puntos de datos obtenidos en las siguientes figuras representan los valores medios obtenidos de las CCMs por duplicado en cada una de las condiciones mencionadas, y las barras de error representan las correspondientes desviaciones estándar, además cabe mencionar que el coeficiente de variación corresponde a rangos menores al 10%.

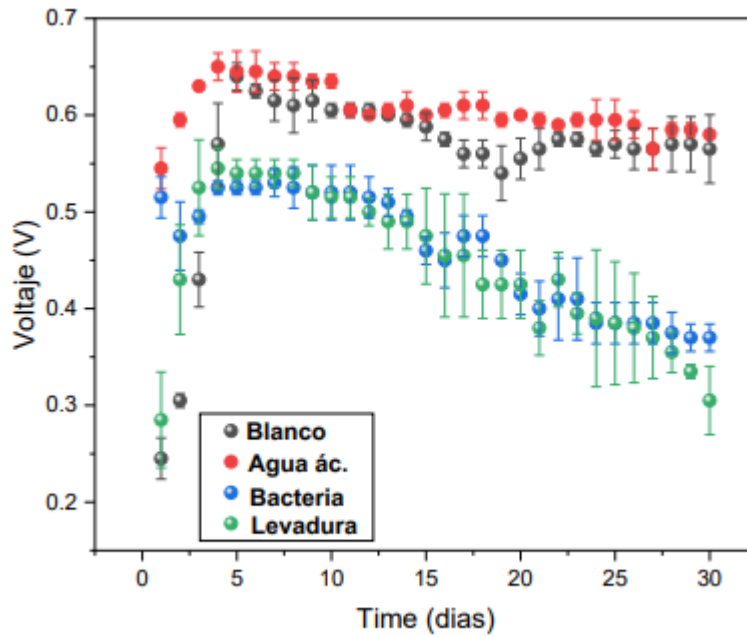


Figura 3: Valores de voltaje a partir de la monitorización de las CCMs.

En la figura 3 se muestra, el voltaje máximo generado se registró en los días 4, 5 y 6 con 0.65 ± 0.02 V en el agua ácida, seguido del blanco alcanzando una generación de 0.64 ± 0.01 V en el día 5, la bacteria *Serratia fonticola* que produjo 0.53 ± 0.01 V desde el día 4 al 8 y con la levadura *Rhodotorula mucilaginosa* se generó en el día 4 valores de 0.55 ± 0.02 V. Por otro lado, los valores mínimos registrados del voltaje de presentaron en el día 1 con un valor de 0.55 ± 0.02 V, en el agua ácida, seguido del blanco alcanzando una generación mínima de 0.25 ± 0.02 V en el día 1; además, con la bacteria *Serratia fonticola* se produjo 0.37 ± 0.01 V en los días 29 y 30 y con la levadura *Rhodotorula mucilaginosa* se generó en el día 30 valores de 0.31 ± 0.04 V.

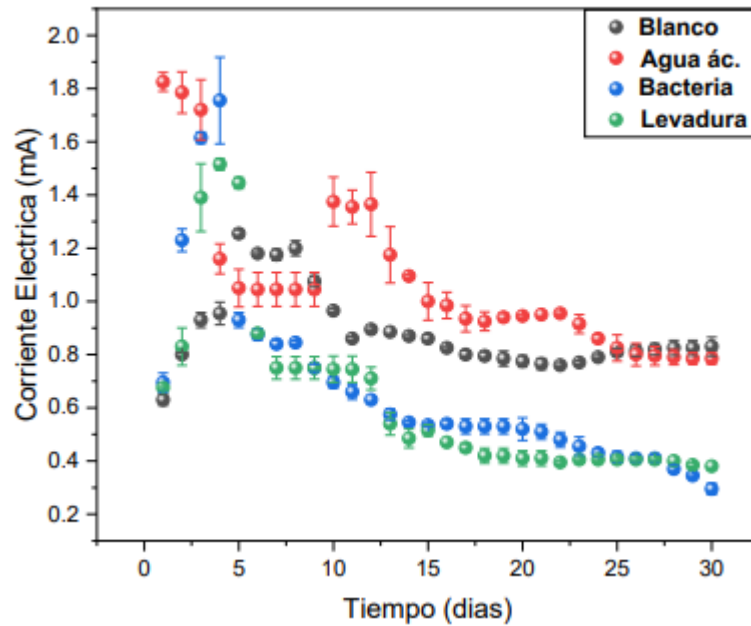


Figura 4: Valores de corriente a partir de la monitorización de las CCMs.

En el registro de la monitorización de la corriente eléctrica que se observa en la figura 4, los valores máximos se dieron en el día 5 del blanco con 1.26 ± 0.02 mA, y en agua ácida de relave minero se logró una corriente máxima de 1.83 ± 0.04 mA en el día 1, la bacteria *Serratia fonticola* produjo 1.76 ± 0.16 mA en el día 4 y con la levadura *Rhodotorula mucilaginosa* se generó 1.52 ± 0.02 mA en el día 4. En cuanto a los valores mínimos alcanzados, se dieron en el día 1 del blanco con 0.63 ± 0.01 mA, y en el agua ácida se generó de manera continua durante tres días (28,29 y 30) con valores de 0.79 ± 0.02 , seguido de la bacteria *Serratia fonticola* se logró una corriente de 0.30 ± 0.02 mA en el día 30 y con la Levadura *Rhodotorula mucilaginosa* se generó 0.38 ± 0.00 mA en el día 30.

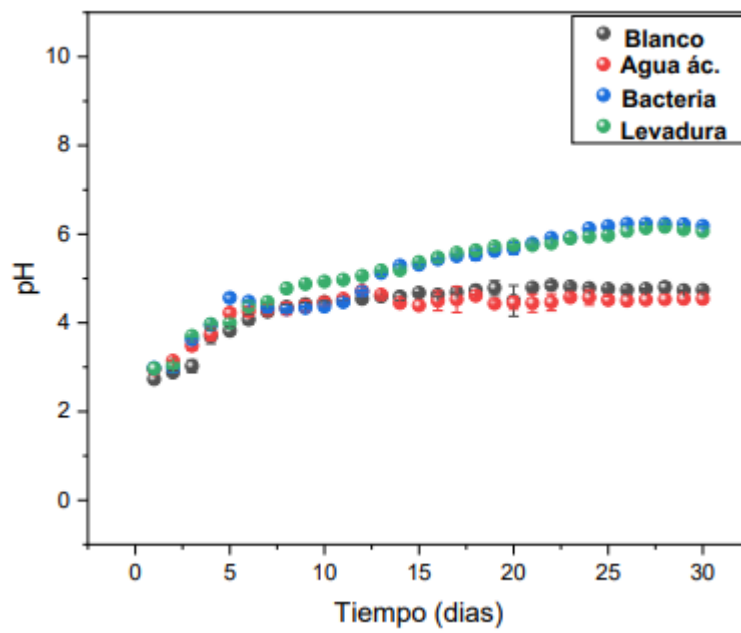


Figura 5: Valores de pH a partir de la monitorización de las CCMs.

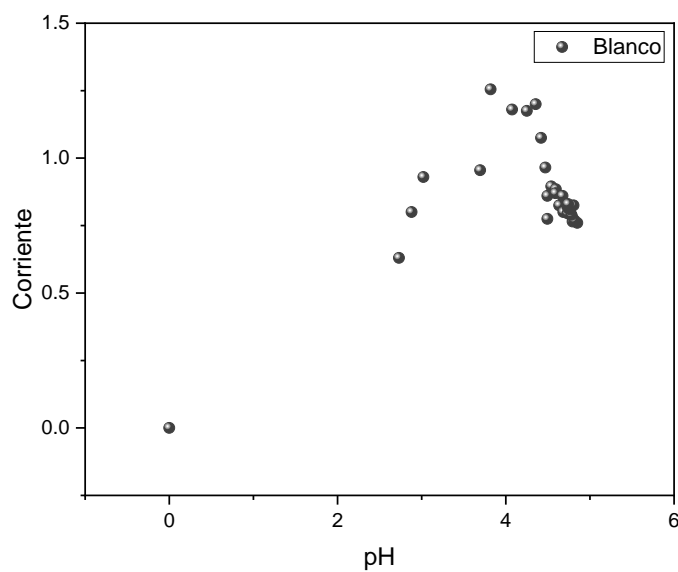


Figura 6: Valores de pH en función a la corriente del blanco a partir de la monitorización de las CCMs.

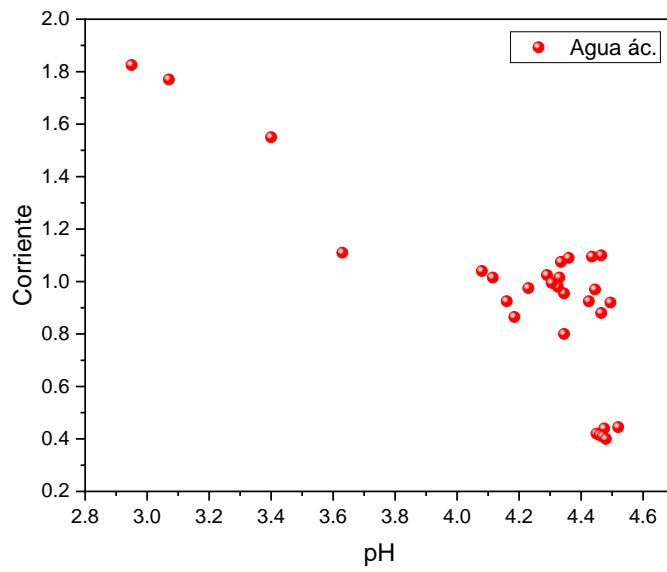


Figura 7: Valores de pH en función a la corriente del agua ácida a partir de la monitorización de las CCMs.

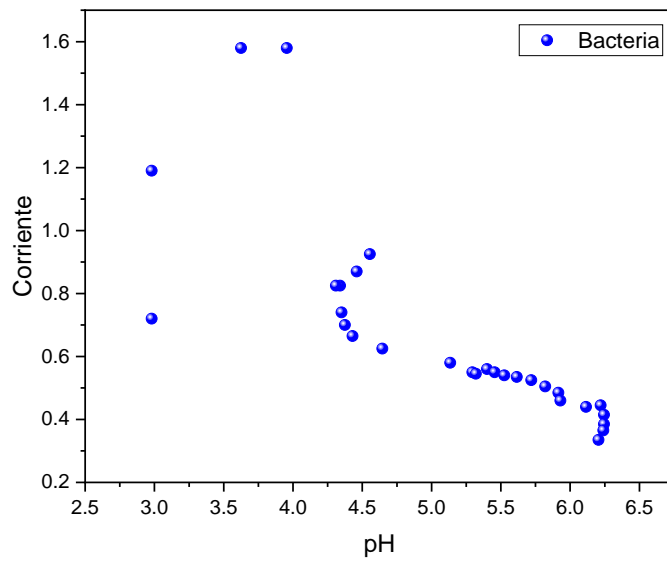


Figura 8: Valores de pH en función a la corriente de la bacteria *Serratia fonticola* a partir de la monitorización de las CCMs.

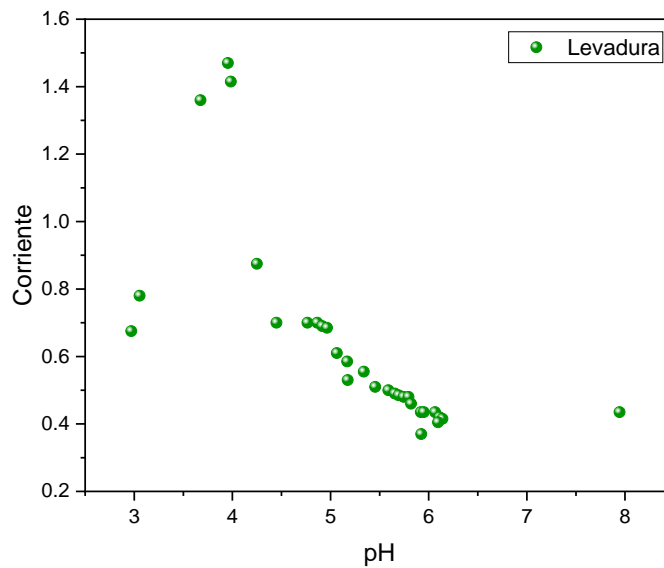


Figura 9: Valores de pH en función a la corriente de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa* a partir de la monitorización de las CCMs.

Asimismo, en la figura 5,6,7,8 y 9 del pH máximo del blanco se observa un medio ácido ya que el valor máximo alcanzado fue de 4.85 ± 0.06 en el día 22 y un valor mínimo de 2.73 ± 0.00 en el día 1; además en el agua ácida, se logró una medida máxima de 4.72 ± 0.03 en el día 12, mientras que en el día 1 se obtuvo un mínimo de 2.95 ± 0.00 , en cuanto a la bacteria *Serratia fonticola* se midió un máximo de 6.24 ± 0.01 en 3 días (26, 27 y 28) de manera consecutiva y el valor mínimo fue de 2.98 ± 0.00 en el día 1 y 2, seguido de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa* con un máximo de 28 con un valor de pH de 6.17 ± 0.01 y el mínimo de 2.97 ± 0.00 en el primer día de toma de datos.

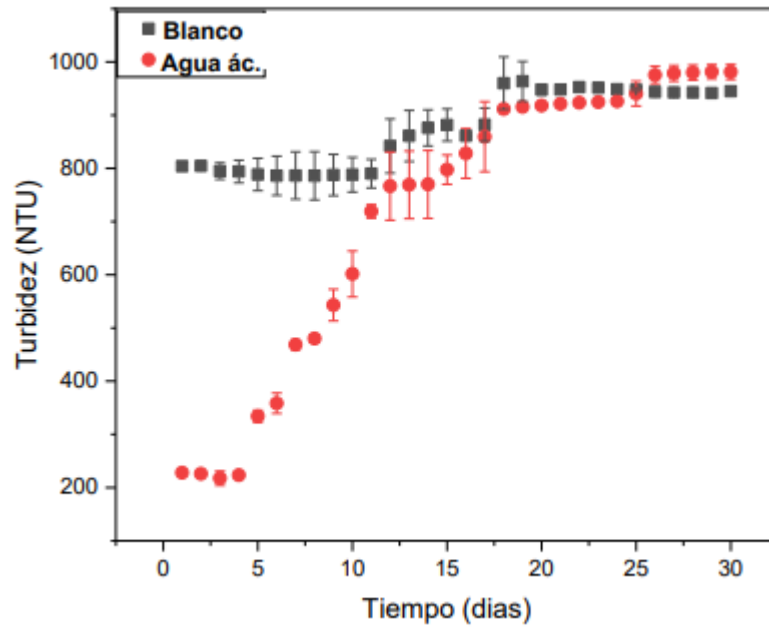


Figura 10: Valores de turbidez a partir de la monitorización de las CCMs.

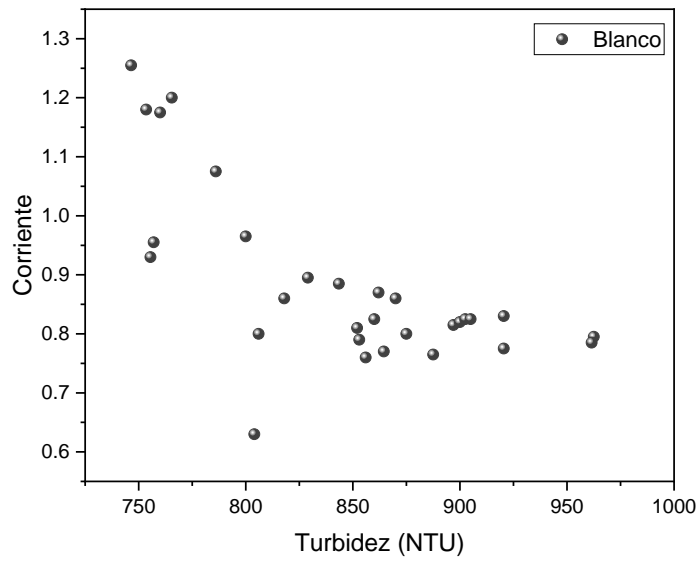


Figura 11: Valores de turbidez en función a la corriente del blanco a partir de la monitorización de las CCMs.

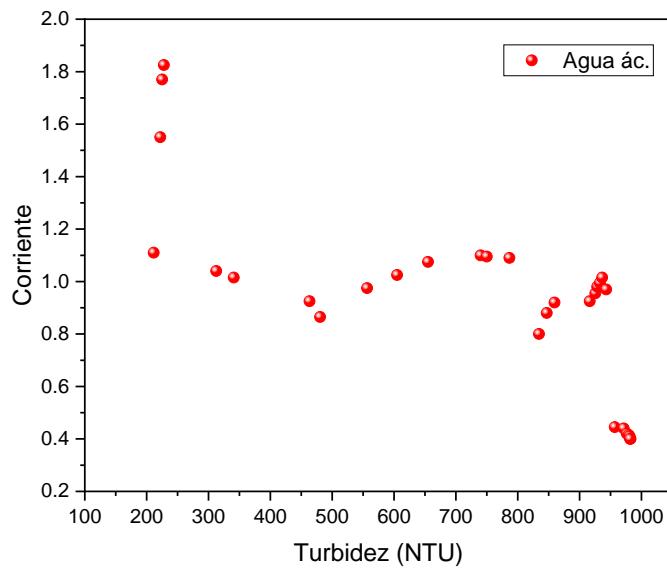


Figura 12: Valores de turbidez en función a la corriente del agua ácida a partir de la monitorización de las CCMs.

Por otro lado, se realizó la monitorización de la turbidez la cual se observa en la figura 10,11 y 12 obteniendo un máximo de 981.5 ± 13.44 NTU en el día 29 y un mínimo 217.5 ± 13.44 NTU en el día 3 de monitoreo en el agua ácida; mientras que, en el blanco se alcanzó en el día 19 de monitorización de los sistemas un máximo de 963.5 ± 37.48 NTU y un mínimo de 786 ± 45.25 NTU en el día 8 de monitoreo.

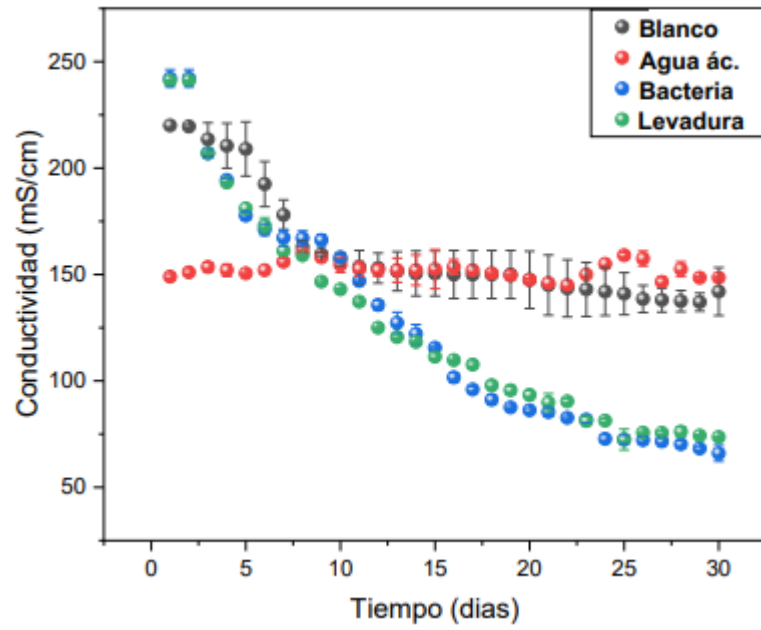


Figura 13: Valores de conductividad eléctrica a partir de la monitorización de las CCMs.

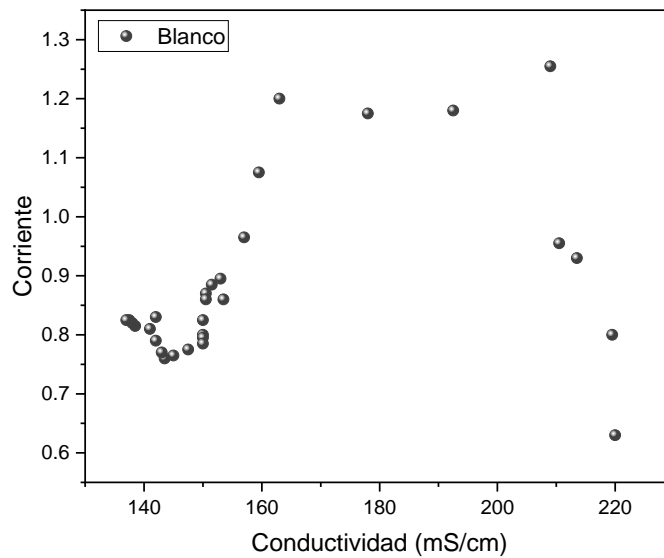


Figura 14: Valores de conductividad eléctrica en función a la corriente del blanco a partir de la monitorización de las CCMs.

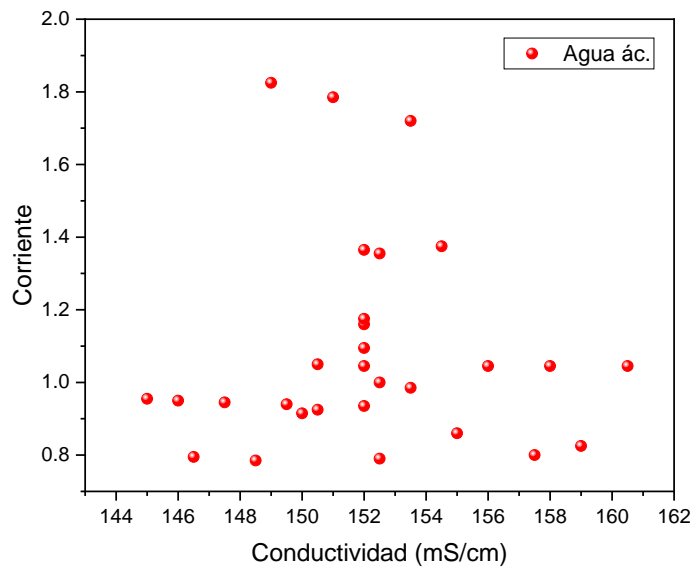


Figura 15: Valores de conductividad eléctrica en función a la corriente del agua ácida a partir de la monitorización de las CCMs.

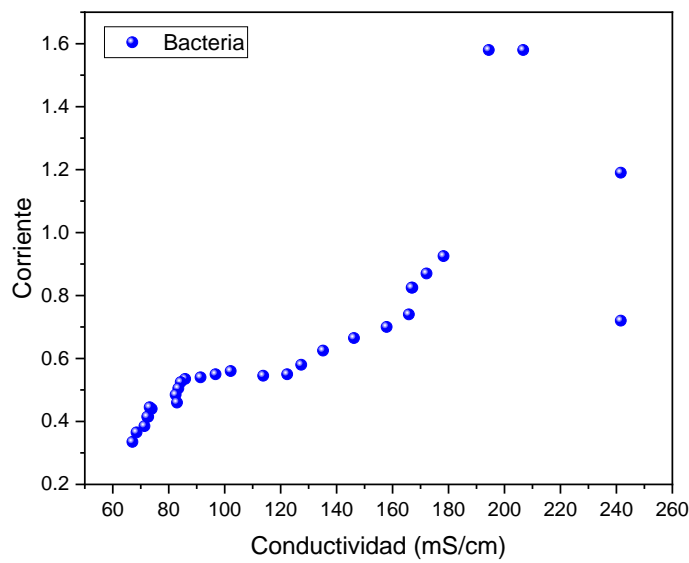


Figura 16: Valores de conductividad eléctrica en función a la corriente de la bacteria *Serratia fonticola* a partir de la monitorización de las CCMs.

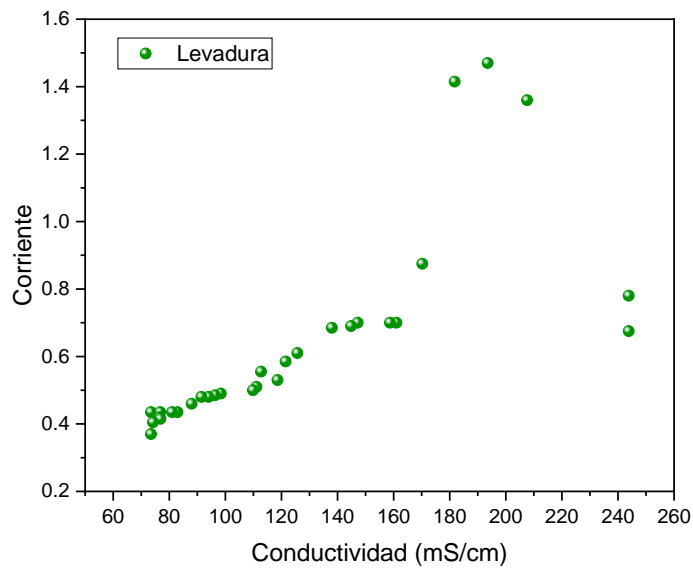


Figura 17: Valores de conductividad eléctrica en función a la corriente de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa* a partir de la monitorización de las CCMs.

Y en la figura 13,14,15,16 y 17 se observa la conductividad eléctrica máxima del blanco se registró en el día 1 de la toma de datos logrando valores de 220 ± 0.00 mS/cm, y en el día 8 se obtuvo 160.5 ± 0.71 mS/cm en agua ácida, por otro lado, en los 2 primeros días del monitoreo se registró 242.20 ± 4.10 mS/cm en la CCM inoculada con la bacteria *Serratia fonticola*, seguido de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa* teniendo valores de 241.05 ± 0.07 mS/cm en los 2 primeros días. Por otro lado, los valores mínimos del blanco fue en el día 29 se obtuvo 137 ± 4.24 mS/cm y se obtuvo 146.5 ± 2.12 mS/cm en el agua ácida en el día 27 de monitoreo, por otro lado, en el último día se registró 65.95 ± 3.75 mS/cm en la bacteria *Serratia fonticola*, seguido de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa* teniendo valores de 73.60 ± 0.28 mS/cm en el día 30.

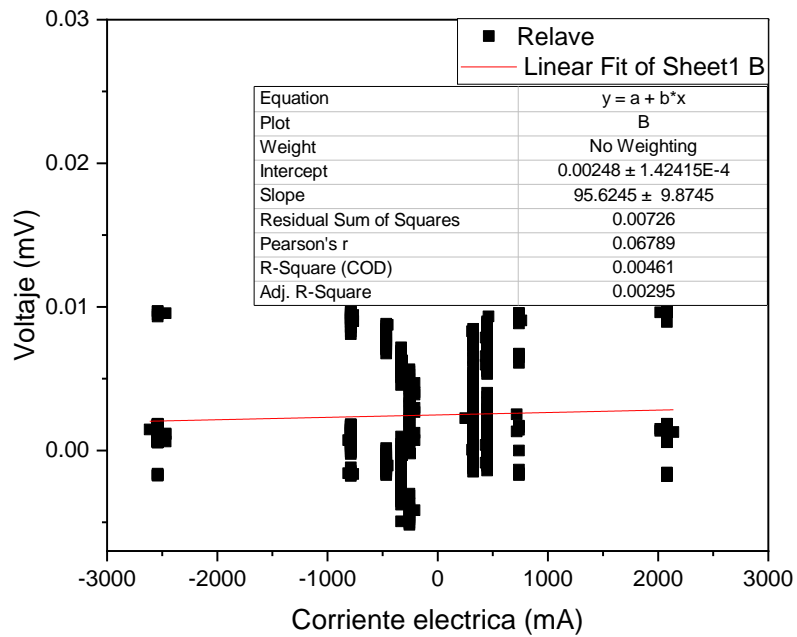


Figura 18: Valores de resistencia eléctrica interna a partir de la monitorización de las CCMs con agua ácida de relave minero.

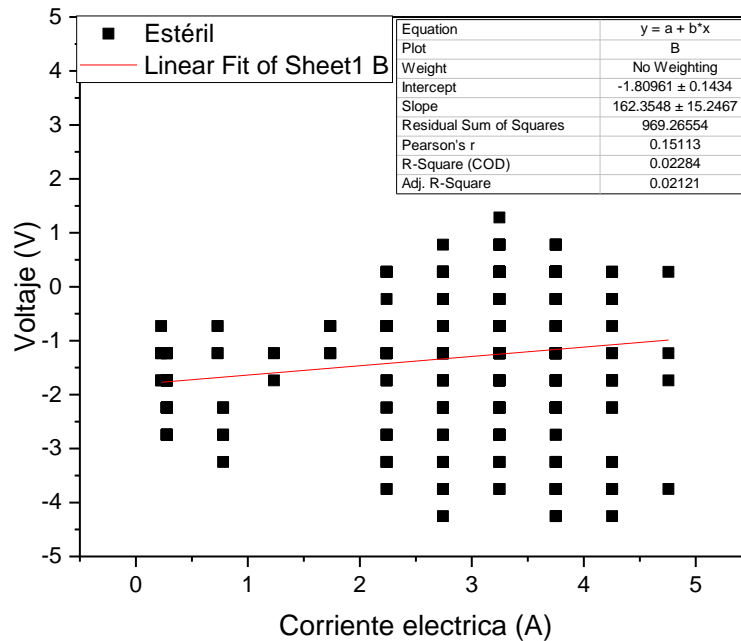


Figura 19: Valores de resistencia eléctrica interna a partir de la monitorización del blanco.

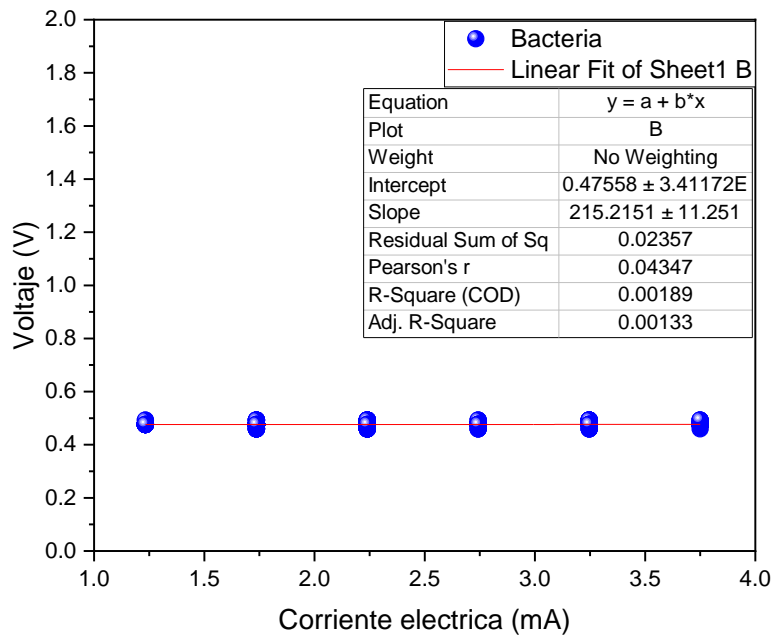


Figura 20: Valores de resistencia eléctrica interna a partir de la monitorización de las CCMs con bacteria *Serratia fonticola*.

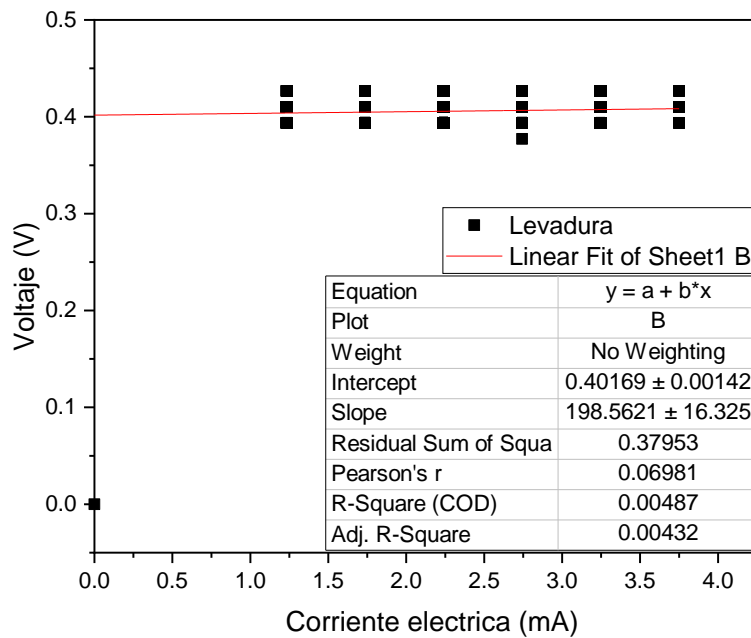


Figura 21: Valores de resistencia eléctrica interna a partir de la monitorización de las CCMs con levadura *Rhodotorula mucilaginosa*.

En las Figuras 18, 19, 20 y 21, se muestran las gráficas que acatan a la Ley de Ohm, la cual puede manifestarse mediante la fórmula $V = RI$, donde V es la diferencia de potencial o el voltaje (V), R es la resistencia (Ω), e I es la corriente (mA) (Tessema y Yemata, 2021, p. 8). En referencia a esta fórmula el voltaje es directamente proporcional a la corriente por lo que se puede establecer una función lineal ($y = mx + b$) (Potrykus et al., 2021, p. 5), y a partir de la pendiente (m) se puede calcular la resistencia (Ω) de la CCM (Logan et al., 2019, p. 7). Esta metodología utiliza las curvas de polarización (gráfica de la corriente eléctrica (I) frente al voltaje (V)) y es la más ampliamente aceptada para analizar la eficiencia eléctrica de una CCM (Koók et al., 2021, p. 3).

De acuerdo a lo señalado en el párrafo anterior, en la CCM con aguas ácidas de relave minero los datos experimentales se ajustan a la ecuación lineal $y = 95.6245x \pm 9.8745$ con un $R^2 = 0.00461$, donde la resistencia fue de $95.6245 \pm 9.8745 \Omega$ (Figura 18). Mientras que la resistencia en la CCM con el blanco ($y = 162.3548x \pm 15.2467$; $R^2 = 0.02284$), con bacteria *Serratia fonticola* ($y = 215.2151x \pm 11.251$; $R^2 = 0.00189$) y con levadura *Rhodotorula mucilaginosa* ($y = 198.5621x \pm 16.325$; $R^2 = 0.00487$), fueron de $162.3548 \pm 15.2467 \Omega$ (Figura 19), $215.2151 \pm 11.251 \Omega$ (Figura 20) y $198.5621 \pm 16.325 \Omega$ (Figura 21) respectivamente.

4.3. Identificación de los microorganismos

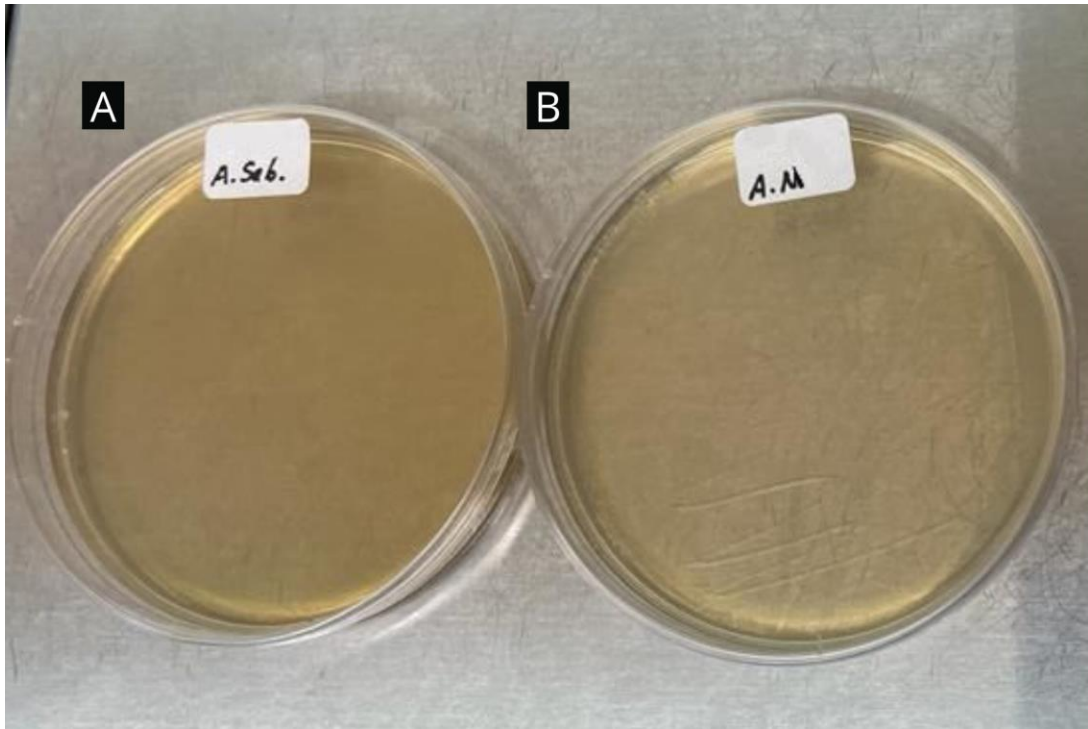


Figura 22: Microorganismos aislados del ánodo de las CCMs con blanco.

Se realizó el procedimiento para aislar microorganismos de los ánodos de ambas CCMs alimentadas con blanco, sin embargo, no crecieron colonias ni se aislaron microorganismos a partir de ellas, lo que indicaría que no se presentó contaminación en el periodo de ejecución del proyecto. En la figura 22, se puede evidenciar que (A) es la placa petri con agar Sabouraud modificado al 2%, (B) es la placa petri con agar medio mínimo de sales.

Sustrato	Código	Especie identificada	pb	BLAST	
				Identidad (%)	Número de accesión
Agua ácida de relave minero	1	<i>Serratia fonticola</i>	1387	99.57%	NR_025339.1
	2	<i>Rhodotorula mucilaginosa</i>	611	99.50%	NR_073296.1

Tabla 2: Microorganismos identificados a partir del ánodo de las CCMs con agua ácida de relave minero.

En la tabla 2 se presentan los resultados de la identificación molecular que se realizó en el laboratorio EcoBiotech Lab S.A.C, donde se empleó técnicas de biología molecular; usándose para identificar bacterias el gen 16S rRNA, debido a que tiene una secuencia altamente conservada; mientras que, para identificar levaduras se utilizó las secuencias ITS (Internal Transcribed Spacer); logrando así la identificación de la bacteria *Serratia fonticola* y la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*, las cuales fueron aisladas a partir del ánodo de las CCMs con agua ácida de relave minero.

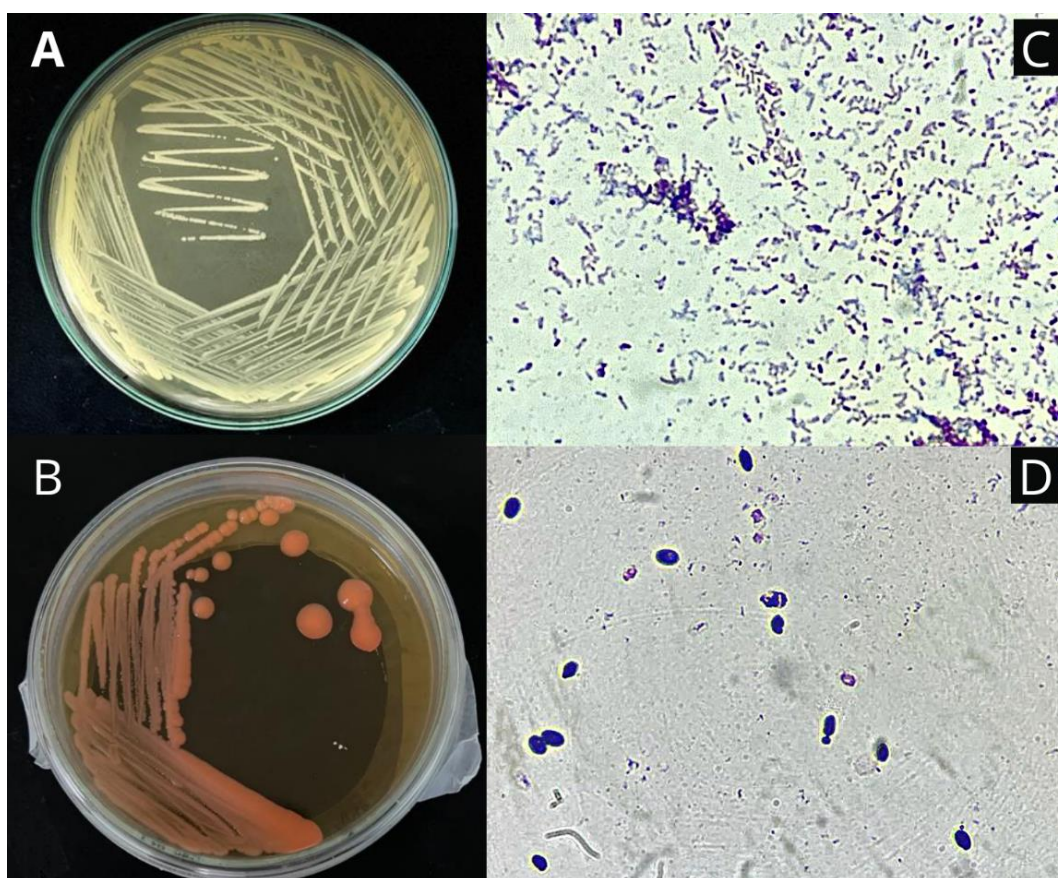


Figura 23: Microorganismos aislados a partir del ánodo de las CCMs con agua ácida de relave minero.

En la figura 23, se puede evidenciar que (A) es la colonia de *Serratia fonticola* en agar Sabouraud modificado al 2%, (B) es la colonia de *Rhodotorula mucilaginosa* en agar Sabouraud modificado al 2%, (C) la observación microscópica de colonia *Serratia fonticola* y (D) la observación microscópica de colonia *Rhodotorula mucilaginosa*.

V. DISCUSIÓN

En la figura 1, se muestra el diseño de las CCMs empleadas en la presente investigación, en las cuales se evidenció el uso de aguas ácidas de relave minero como sustrato para la generación de energía eléctrica. Cabe precisar que, las CCMs de una cámara con cátodo de aire, se caracterizan por poseer utilidad debido al metabolismo microbiano en el cátodo (He et al., 2017, p. 4) y a pesar de que su proceso de reducción es tardado, es más factible y juega un papel importante puesto que no se precisa adición química de oxígeno (Butti, et al., 2016, p.6).

De igual importancia, para el diseño y construcción de las CCMs, es necesario considerar su aplicación a gran escala, por lo que su configuración debe ser sencilla y económicamente viable (Butti, et al., 2016, p.5). Dicho esto, las CCMs de una cámara se destacan debido a que son fáciles de operar y monitorear en comparación a las CCMs de doble cámara (Wang, 2017, p. 2), además reduce costos debido a la ausencia de membrana de intercambio iónico (Wu et al, 2018, p. 3).

Los electrodos a base de materiales carbonosos como el grafito son comúnmente usados por su gran superficie, estabilidad que brindan a los microorganismos, elevada conducción eléctrica y bajo precio (Fadzli et al, 2021, p. 3), además la superficie de los electrodos es de gran importancia a fin de maximizar la densidad de potencia (He et al., 2017, p. 3). Por otro lado, los electrodos metálicos son buenos conductores de electrones, sin embargo, se han suscitado ocasiones en las que se han corroído (Yaqoob et al., 2020, p. 5), es por ello que se evitó trabajar con ellos en esta investigación. Esto concuerda con el estudio realizado por Guzmán (2022, p. 11), que concluye que a consecuencia del diferencial de potencial de los metales y el fenómeno electroquímico microbiano se genera de corriente eléctrica, por la transferencia de los electrones

generados por el metabolismo de los microorganismos a receptores finales extracelulares e insolubles (óxidos de hierro y manganeso o electrodos).

Los resultados encontrados en este estudio en cuanto a los parámetros fisicoquímicos de cada sustrato (Tabla 1) se obtuvo un pH ácido en todos los sustratos tanto en el blanco, agua ácida y microorganismos; además, se determinó la conductividad en donde la levadura *Rhodotorula mucilaginosa* presentó un valor más alto 241.10, mS/cm, seguido de la bacteria *Serratia fonticola*, el blanco y el valor más bajo presento el agua ácida con 148.00, mS/cm, en tal sentido una baja conductividad resulta en una alta resistencia limitando la corriente que circula en el sistema (He et al., 2017). Finalmente, se obtuvo 804.00 NTU en el sustrato de agua ácida siendo el más alto debido a que su contenido es a su estado natural y el más bajo fue el blanco 228.00 NTU por la esterilización en la autoclave, logrando eliminar ciertos componentes debido al calor suministrado. Cabe mencionar que el estudio de las variables fisicoquímicas es de importancia para conocer la influencia en cada sustrato de acuerdo a la obtención de resultados.

Referente a la figura 3, se evidencian los valores de voltaje a partir de la monitorización de las CCMs, donde se lograron obtener distintos valores para cada sustrato. Los resultados obtenidos en las CCMs con aguas ácidas de relave minero, pueden estar dados por la diferencia de potencial de los metales presentes en el relave con la energía química de oxidación-reducción mediante un electrodo, convirtiéndola en energía. Los sustratos son metabolizados mediante procesos de oxidorreducción donde se generarán electrones y que además influyen en el aumento de los valores de voltaje (He et al., 2017, p. 5). Además, las pérdidas de voltaje se encuentran relacionadas al metabolismo de los microorganismos, esta disminución es inevitable debido a que la obtención de energía está dada por la oxidación de la materia orgánica

presente en el relave minero (Rojas, 2021, p.4).

Los valores de voltaje del blanco, están dados debido a que en este existen iones de metales como plomo, cadmio, cobre, cobalto, mercurio, entre otros; los cuales por su diferencia de potencial generan energía eléctrica. Al obtener voltaje, los iones positivos migran al cátodo, mientras que los iones negativos migran al ánodo. Debido a su estado de valencia, pierden electrones y pueden recuperar electrones; por lo general, transportan electrones y luego tienen la capacidad de entregarlos. Si los cationes entran en contacto con el cátodo, recuperan los electrones perdidos y entran en el estado elemental; por otro lado, los aniones reaccionan de manera opuesta gracias a los metales; por otro lado, si dejan caer sus electrones y entran en el estado fundamental y en el catión del electrodo se reducirá y los aniones se oxidarán (Angarita y Pereira, 2017, p. 19).

Además, la bacteria *Serratia fonticola* y la levadura *Rhodotorula mucilaginosa* generaron valores similares, puesto que presentaban las mismas condiciones de operación, además estos microorganismos en medio mínimo de sales transforman la glucosa presente en este sustrato y donan estos electrones al ánodo que posteriormente migran al cátodo, lo que produce la diferencia de potencial y por lo tanto la generación de energía eléctrica (He et al., 2017).

En la figura 4, se exponen los valores de corriente, donde el comportamiento en la CCM blanco en comparación con la CCM con el agua ácida, puede estar dada a la presencia de materia orgánica en el sustrato, como ciertas partículas de tierra. Porque como se mencionó Repuello (2020, p. 12), el relave minero incluye también metales pesados, estos son transformados en energía química de oxidación-reducción mediante un electrodo para la descomposición de los

compuestos, lo que hace que ésta vaya disminuyendo con el paso del tiempo, lo que conlleva a la disminución de la corriente eléctrica de las CCMs.

Por otro lado, los valores obtenidos en las CCMs con la bacteria *Serratia fonticola* y la levadura *Rhodotorula mucilaginosa* generaron valores similares, puesto que los sustratos en ambos casos fueron en medio mínimo de sales (MMS). Como menciona Hernandez (2020, p. 12) la corriente eléctrica puede atribuirse a los microorganismos que realizan la conversión del sustrato, como la glucosa presente en el MMS, en ácidos orgánicos de cadena corta, hidrógeno y dióxido de carbono, es así que la electricidad se genera al interactuar con los compuestos reducidos producidos en condiciones redox por transferencia directa de electrones entre los microorganismos y la superficie del ánodo.

Otro parámetro importante es el pH, donde los valores obtenidos en la monitorización de las CCMs se encuentran en la figura 5,6,7,8 y 9. En la CCM con agua ácida y la del blanco, los valores pueden ir aumentando debido a que, el valor inicial de pH del sustrato es inferior a 8 y se eleva pasados uno o dos días de operación de la CCM, puesto que el intercambio de protones será en menor proporción que la producción de los mismos, en otras palabras, el pH se encuentra condicionado a las reacciones catódicas por el oxígeno oxidante (Malekmohammadi y Mirbagheri, 2021, p.7).

Y los valores de pH obtenidos en las CCMs con la bacteria *Serratia fonticola* y la levadura *Rhodotorula mucilaginosa* tienden a elevarse. Los microorganismos poseen influencia en el aumento de valores de pH debido a la generación de electrones en oxidación del sustrato (Rojas, 2021, p.5). Así mismo, debido a que estos microorganismos como último recurso, se alimentan de la biomasa muerta al término de los nutrientes

del sustrato; ya que los microorganismos muertos pueden acumularse en el ánodo durante el funcionamiento de la CCM con el tiempo y esta capa microbiana muerta resultante también puede proporcionar resistencia, lo que limita la generación de energía (Gul et al., 2021, p.9). Así mismo Li et al. (2021, p. 6) expresa que, estos microorganismos muertos generan una capa en el inferior de la biopelícula, lo que promueve la alimentación y proliferación de bacterias vivas en la capa superior, mejorando el rendimiento de la CCM y elevando el valor de pH (Li, 2021, p. 4).

En la figura 10,11 y 12 se muestran los valores de turbidez, donde el incremento en las CCMs blanco, dado que la turbidez en las aguas generalmente se debe a la presencia de sólidos en suspensión (Tee et al., 2017, p. 2), podría estar dado por reacciones de los compuestos del relave al suministrarle calor al realizar la esterilización en la autoclave, como lo sucedido en la investigación de Li (2017, p. 6), el cual consideró un fenómeno interesante el aumento de la turbidez durante el tiempo de operación de las CCM, explicando que pudo surgir la oxidación de carbono para producir óxido de grafeno, de manera que el aumento de las partículas suspendidas fue gracias a las fibras de carbono fragmentadas del electrodo.

Los valores de conductividad eléctrica a partir de la monitorización de las CCMs, se evidencian en la figura 13,14,15,16 y 17. En las CCMs del blanco y el agua ácida, la conductividad va disminuyendo debido a las reacciones que se generan por la influencia del pH del sustrato, puesto que tiene un impacto significativo en la presencia de metales pesados y sus características. Los metales pesados en solución acuosa dependen en gran medida del pH, en valores de pH neutros o bajos, los metales pesados existen generalmente en su estado catiónico y tienden a ser más solubles y móviles en las fuentes de agua (Joseph, 2019, p. 12). Se ha demostrado que la estabilidad y la movilidad del cobre aumentan con

la disminución del pH. Sin embargo, al aumentar el pH, los metales pesados forman complejos con iones de hidróxido, lo que afecta al estado de oxidación del metal pesado. En muchos casos, al aumentar el pH por encima del neutro, los metales pesados forman sólidos que precipitan fuera del agua. Se ha demostrado que el estado de oxidación del cromo, por ejemplo, cambia de Cr (III), su forma más estable, a Cr (VI), su forma más tóxica, a medida que aumenta el pH. Además, existe una gran variedad de especies de cromo con distintas cargas y a distintos valores de pH. En el caso del plomo, los valores de pH más bajos aumentan la concentración de iones de plomo libres en la fuente de agua, mientras que el aumento de los valores de pH conduce a la inmovilización, principalmente debido a la precipitación (Joseph, 2019, p. 13).

En las CCMs con microorganismos, el comportamiento de la conductividad podría darse por el consumo de la materia orgánica (glucosa presente en el MMS) presente en el sistema, por lo tanto, el consumo de electrones se encuentra limitado; esto se expresó como $C_6H_{12} + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + H_2O + \text{electrones}$. Concordando con Jung (2021, p. 7) los sustratos más efectivos para aumentar la conductividad son la glucosa, el acetato y el agua residual, así como los posibles combustibles en la cámara de combustión microbiana. Por otro lado, en base a los sustratos inorgánicos, los autores prefieren utilizar sustratos de azufre reducidos e iones de hierro tiosulfato, donde la estabilización se logró utilizando iones de hierro y tiosulfato para mejorar la conductividad; sin embargo, los sustratos orgánicos son más efectivos que los inorgánicos (Repuello, 2020, p. 10).

En las Figuras 18, 19, 20 y 21, se presentan los valores de resistencia interna partir de la monitorización de las CCMs, los cuales son bajos. Como sucede también en la investigación de La Rotta (2020, p. 7), la falta de capacidad oxidativa del sustrato reduce significativamente la

eficiencia de "extracción" de electrones y, por tanto, la generación de energía eléctrica. Asimismo, el mecanismo de transferencia de electrones difiere de un microorganismo a otro, lo cual es crucial para determinar la eficiencia del proceso.

La resistencia interna de las CCMs depende de la descomposición de los sustratos utilizados para la generación de energía debido a que los electrones que se liberan en el proceso de oxidación en la cámara del ánodo fluyen libremente por todo el sistema cuando la resistencia interna es baja, lo que también influye en la formación de biopelículas anódicas de las CCMs (Rojas, 2022, p. 6). De manera que, la baja resistencia interna expuesta puede ser afectada por la adhesión de los microorganismos presentes en el sustrato con el electrodo del ánodo y confirma los altos valores de corriente que muestran las celdas (Arkatkar, et al, 2019, p.4; Rossi y Logan, 2020, p. 5), así como por la transferencia de electrones, la cual ocurrirá de manera más eficiente del ánodo al cátodo; por lo tanto, los microorganismos pueden preferir formas más directas de transferencia de electrones debido a su genética (Rojas, 2022, p. 4).

Los microorganismos aislados del ánodo de la CCM con aguas ácidas de relave minero, se muestran en la figura 23, las cuales son la bacteria *Serratia fonticola* y la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*. Como precisa Koch (2016, p.8), dentro de las CCMs pueden estar presentes especies de diferentes grupos filogenéticos que abarcan bacterias, arqueas, levaduras y algas. La importancia de estos microorganismos electroactivos radica en que poseen la facultad de donar o aceptar electrones desde un sustrato, oxidando los compuestos y generando electrones, necesarios para la producción de energía eléctrica (Yee et al., 2020, p. 2).

Algunas investigaciones como la de Kabir (2018, p. 4) aislaron microorganismos resistentes al Cr (VI) como *Kosakonia cowanii*, *Klebsiella pneumoniae*, *Acinetobacter gernerii*, *Klebsiella variicola* y *Serratia marcescens* con un 99% de identidad, por medio de técnicas morfológicas y moleculares basadas en el análisis de la secuencia del gen 16S rDNA. Otro ejemplo de ello se da en Lumba (2020, p. 10) ya que, el conocimiento de cómo algunos microorganismos generan y transportan electrones a través de la pared celular y, por lo tanto, interactúan electrónicamente con el medio ambiente caracteriza el desarrollo de procesos biológicos avanzados y mejorados electroquímicamente en los llamados sistemas bioelectroquímicos. Por otro lado, los bioánodos se utilizan para el aislamiento mediante la obtención de suspensiones celulares a partir de las cuales se realizan diluciones seriadas y placas en diferentes medios como medios Luria Bertani y medios sintéticos suplementados con aminocitrato férrico (Guzmán, 2022, p. 5).

A todo esto, las ventajas que presenta el uso de agua ácida de relave minero como sustrato para la generación de energía eléctrica a través de celdas de combustible microbianas de una cámara, es que se emplean aguas ácidas reales y por lo tanto muestra un comportamiento real durante el proceso; puesto que la mayoría de investigaciones que se vienen realizando emplean aguas sintéticas (preparadas en laboratorio) lo que no es práctico para aplicaciones en el mundo real (Zhang et al., 2019, p.2). Sin embargo, una limitante es la composición y concentración de los metales presentes en estas aguas ácidas, puesto que poseen distintos diferenciales de potencial y alteran así la cantidad de energía eléctrica generada.

Así mismo, presenta ventajas por el diseño de cátodo de aire, es decir este se encuentra expuesto directamente al ambiente lo que permite que el oxígeno presente en el aire reaccione con los electrones generados

por las CCMs y facilite las reacciones redox para la generación de energía eléctrica. De manera que, no se requiere de aireación artificial o el uso de agentes químicos oxidantes que usualmente son empleados en otros tipos de celdas (Butti, et al., 2016, p. 6). Adicionalmente, debido a que son CCMs de una cámara no es necesaria la membrana de intercambio iónico. Todo lo mencionado anteriormente hace que sean factibles, económicamente viables, con potencial de escalabilidad, así mismo que su operación y monitoreo sean simples en comparación a otros tipos de CCMs. Es preciso mencionar que, una de las desventajas es que se debe reforzar el cátodo para lograr soportar la presión hidráulica, así como para minimizar las fugas que se puedan dar (Logan et al., 2019, p.4).

Finalmente, cabe mencionar que es de utilidad el uso de las aguas ácidas para la generación de energía eléctrica como evidencian los resultados expuestos anteriormente, sin embargo, teniendo en cuenta que muchas aplicaciones prácticas requieren aproximadamente 3 voltios, el voltaje de funcionamiento de las CCMs debe ser superior a esta cantidad para que se considere viable como fuente energética directa (Kim et al., 2019, p.3).

VI. CONCLUSIONES

Este estudio ha demostrado la utilidad del sistema de las CCM, mas no la eficiencia del sustrato de agua ácida de la Relavera Santa Catalina - Shorey para la generación de energía eléctrica a través de una celda de combustible microbiana de una cámara con cátodo de aire, que fue operada y monitoreada durante 30 días a temperatura ambiente.

En las celdas de combustible microbianas con relave minero como sustrato, se lograron valores pico de 0.65 ± 0.02 V, 1.83 ± 0.04 mA, 981.5 ± 13.44 NTU, de voltaje, corriente y turbidez respectivamente, además los relaves mineros operaron a un pH ácido, valores de conductividad mayores a 146 mS/cm y resistencia interna de 95.6245 ± 9.8745 Ω .

Se identificó por medio de análisis molecular dos microorganismos aislados del ánodo, estos son la bacteria *Serratia fonticola*, la cual posee flagelos peritricos que a través de su movimiento cumplen la función de transporte de electrones y la levadura *Rhodotorula mucilaginosa* que es capaz de enlazar metales pesados con un amplio rango de iones que son acumulables en su sistema; ambas estuvieron presentes en el ánodo de la CCM.

VII. RECOMENDACIONES

Mediante este estudio de investigación se hace la invitación a la universidad, facultad, programa académico, compañeros y colegas de seguir investigando sobre el diseño y construcción de nuevas tecnologías, sostenibles e innovadoras sistemas para darle un valor agregado a las aguas ácidas de relaves mineros de nuestra región para contribuir a la mitigación de la contaminación de los recursos y además de cooperar con el desarrollo de los objetivos del desarrollo sostenible.

Esta investigación se encuentra a disposición para que personas interesadas en el tema puedan tomarla como referencia para continuar la investigación y llevar a cabo la experimentación del funcionamiento de las CCMs con agua ácida como sustrato operado en las condiciones óptimas identificadas en este proyecto a fin de evaluar el desempeño y rendimiento de generación de energía eléctrica, teniendo en cuenta que se requiere aproximadamente 3 voltios, para que se considere viable como fuente energética directa.

Además, se recomienda realizar el análisis y pruebas para conocer las propiedades electroquímicas que poseen los microorganismos hallados, los cuales son la bacteria *Serratia fonticola*, y la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*, a manera de conocer su relación con la generación de energía eléctrica. Podrían realizarse técnicas convencionales como la cronoamperometría y la voltamperometría cíclica, o técnicas bioelectroquímicas no comerciales.

REFERENCIAS

ABDULLAH, N., et al. Recent Trends of Heavy Metal Removal from Water/Wastewater by Membrane Technologies. Review, Journal of Industrial and Engineering Chemistry [en línea]. Agosto 2019, 76. [Fecha de consulta: 05 de mayo de 2022]. Disponible en <https://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2019.03.029>.

AGRAWAL, Komal, et al. Microbial fuel cell: a boon in bioremediation of wastes. En Microbial wastewater treatment. Elsevier [en línea]. 2019. p. 175-194. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816809-7.00009-9>

Al, Chenbing, et al. Effective treatment of acid mine drainage with microbial fuel cells: an emphasis on typical energy substrates. Minerals [en línea]. 2020, vol. 10, no 5, p. 443. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://dx.doi.org/10.3390/min10050443> ISSN: 2075-163X}

ANGARITA, Leslly Alejandra; PEREIRA OSORNO, Juan Fernando. Evaluación energética de baterías de hierro-níquel para el almacenamiento estacionario en sistemas fotovoltaicos. Tesis (Título de Ingenieros Electricistas). Medellín: Institución Universitaria Pascual Bravo, 2017. Disponible en <https://repositorio.pascualbravo.edu.co/handle/pascualbravo/291>

ARIAS GONZÁLES, José Luis. Técnicas e instrumentos de investigación científica. [en línea]. 1era ed., Perú, 2020. [Fecha de consulta: 15 de octubre de 2022]. Disponible en <http://hdl.handle.net/20.500.12390/2238> ISBN: 9786124844409

ARIAS GONZÁLES, José Luis; COVINOS GALLARDO, Mitsuo. Diseño y metodología de la investigación. [en línea]. 1era ed., Perú, 2021. [Fecha de consulta: 15 de octubre de 2022]. Disponible en <http://hdl.handle.net/20.500.12390/2260> ISBN: 9786124844409

ARKATKAR, Ambika; MUNGRAY, Arvind Kumar; SHARMA, Preeti. Effect of microbial growth on internal resistances in CCMs: A case study.

En *Innovations in Infrastructure*. Springer [en línea]. Singapore, 2019. p. 469-479. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en https://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-1966-2_42

BUTTI, Sai Kishore, et al. Microbial electrochemical technologies with the perspective of harnessing bioenergy: maneuvering towards upscaling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea]. 2016, vol. 53, p. 462-476. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.058>

CHAKRABORTY, Indrajit, et al. Bioelectrochemically powered remediation of xenobiotic compounds and heavy metal toxicity using microbial fuel cell and microbial electrolysis cell. *Materials Science for Energy Technologies* [en línea]. 2020, vol. 3, p. 104-115. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.09.011>

CHARRO REVELO, Michelle Johanna. Determinación de materia orgánica y coliformes totales en superficies inertes limpias de un matadero de porcinos. Tesis (Licenciatura en Zootecnia). Quito: Universidad Central del Ecuador, 2022. Disponible en <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/25932/1/UCE-FMVZ-SUB-CHARRO%20MICHELLE.pdf>

ELABED, Alae, et al. Bioelectrochemical Characterization of Heavy Metals Resistant yeast: *Hansenula fabianii* Isolated from Tannery Wastewater. *International Journal of Electrochemical Science* [en línea]. 2020, vol. 16, p. 140128. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.20964/2021.01.31>

FADZLI, Fatin Syahirah; BHAWANI, Showkat Ahmad; ADAM MOHAMMAD, Rania Edrees. Microbial fuel cell: recent developments in organic substrate use and bacterial electrode interaction. *Journal of Chemistry* [en línea]. 2021, vol. 2021. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1155/2021/4570388>

FANG, Chaolin; ACHAL, Varenjam. The potential of microbial fuel cells for remediation of heavy metals from soil and water—review of application.

Microorganisms [en línea], 2019, vol. 7, no 12, p. 697. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://dx.doi.org/10.3390/microorganisms7120697>.

GUADARRAMA-PÉREZ, Oscar, et al. Recent advances in constructed wetland-microbial fuel cells for simultaneous bioelectricity production and wastewater treatment: a review. *International Journal of Energy Research* [en línea]. 2019, vol. 43, no 10, p. 5106-5127. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1002/er.4496>

GUL, Hajera, et al. Progress in microbial fuel cell technology for wastewater treatment and energy harvesting. *Chemosphere* [en línea]. 2021, vol. 281, p. 130828. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130828>

GUZMAN CONDORI, Carmen Rosa. Producción de bioenergía a base de aguas residuales mediante la aplicación de tecnología basadas en Microalgas: revisión sistemática. [en línea]. 2022. Fecha de consulta: 13 de noviembre de 2022]. Disponible en <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/95789>

HE, Li, et al. Advances in microbial fuel cells for wastewater treatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea]. 2017, vol. 71, p. 388-403. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.069>.

HERNÁNDEZ-MACEDO, Maria Lucila, et al. Environmental Biotechnology: Challenges and perspectives in applying combined technologies to enhance remediation and renewable energy generation. *Revista peruana de biología*, 2020, [en línea]. vol. 27, no 1, p. 043-048. Fecha de consulta: 13 de noviembre de 2022]. Disponible en <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/rpb/article/view/17578>

HOSSAIN, Laila; SARKER, Sumit Kanti; KHAN, Mohidus Samad. Evaluation of present and future wastewater impacts of textile dyeing industries in Bangladesh. *Environmental Development* [en línea]. 2018, vol. 26, p. 23-33. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en

<https://doi.org/10.1016/j.envdev.2018.03.005>.

JADHAV, Dipak A.; RAY, Sreemoyee Ghosh; GHANGREKAR, Makarand M. Third generation in bio-electrochemical system research—A systematic review on mechanisms for recovery of valuable by-products from wastewater. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea]. 2017, vol. 76, p. 1022-1031. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.096>.

JOSEPH, B., et al. Removal of heavy metals from water sources in the developing world using low-cost materials: A review. *Chemosphere* [en línea]. 2019, vol. 229, p.142-159. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.198>

JUNG, Heejung; INABA, Yuta; BANTA, Scott. Genetic engineering of the acidophilic chemolithoautotroph *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Trends in Biotechnology*, [en línea]. 2021. Fecha de consulta: 13 de noviembre de 2022]. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167779921002353>

KABIR, Mohammad Mahbub, et al. Isolation and characterization of chromium (VI)-reducing bacteria from tannery effluents and solid wastes. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* [en línea]. 2018, vol. 34, no 9, p. 1-17. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11274-018-2510-z>

KAUSHIK, A.; SINGH, Aradhana. Metal removal and recovery using bioelectrochemical technology: The major determinants and opportunities for synchronic wastewater treatment and energy production. *Journal of Environmental Management* [en línea]. 2020, vol. 270, p. 110826. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110826>

KIM, T., et al. Boosting voltage without electrochemical degradation using energy-harvesting circuits and power management system-coupled multiple microbial fuel cells. *Journal of Power Sources* [en línea]. 2019, 410-411, 171-178. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.11.010>

KOCH, Christin; HARNISCH, Falk. Is there a specific ecological niche for electroactive microorganisms? *ChemElectroChem* [en línea]. 2016, vol. 3, no 9, p. 1282-1295. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1002/celc.201600079>

KOÓK, László, et al. The influential role of external electrical load in microbial fuel cells and related improvement strategies: a review. *Bioelectrochemistry* [en línea]. 2021, vol. 140, p. 107749. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2021.107749>

LA ROTTA, Camilo Enrique, et al. Hybrid microbial-photosynthetic biofuel cells for simultaneous bacterial glycerol biotransformation and algal carbon dioxide capture. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, [en línea]. 2020, vol. 25, p. Fecha de consulta: 13 de noviembre de 2022]. Disponible en <https://www.scielo.br/j/jbchs/a/4cZcjMPLjB3JXZnz45djGcv/?lang=en#>

LEIVA, Eduardo, et al. Arsenic removal mediated by acidic pH neutralization and iron precipitation in microbial fuel cells. *Science of the Total Environment* [en línea]. 2018, vol. 645, p. 471-481. [Fecha de consulta: 15 de octubre de 2022]. Disponible en <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.378>

LI, Xiao, et al. Effect of pH on bacterial distributions within cathodic biofilm of the microbial fuel cell with maltodextrin as the substrate. *Chemosphere* [en línea]. 2021, vol. 265, p. 129088. [Fecha de consulta: 15 de octubre de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129088>

LI, Jun, et al. Voltage reversal causes bioanode corrosion in microbial fuel cell stacks. *International Journal of Hydrogen Energy* [en línea]. 2017, vol. 42, no 45, p. 27649-27656. [Fecha de consulta: 15 de octubre de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.221>

LOGAN, Bruce E., et al. Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems. *Nature Reviews Microbiology* [en línea]. 2019, vol. 17, no 5, p. 307-319. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0173-x>

LOVLEY, Derek R.; HOLMES, Dawn E. Electromicrobiology: the ecophysiology of phylogenetically diverse electroactive microorganisms.

Nature Reviews Microbiology [en línea]. 2022, vol. 20, no 1, p. 5-19. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1038/s41579-021-00597-6>

LUMBA IDROGO, Nady Sadith; PORRAS PIZARRO, Lizet Deysi. Generación de bioelectricidad a partir de agua residual doméstica por el método celdas de combustible microbiano (CCM): Una Revisión. [en línea]. 2020. Fecha de consulta: 13 de noviembre de 2022]. Disponible en <http://200.121.226.32:8080/handle/20.500.12840/3789>

MALEKMOHAMMADI, Sima; AHMAD MIRBAGHERI, Seyed. A review of the operating parameters on the microbial fuel cell for wastewater treatment and electricity generation. Water Science and Technology [en línea]. 2021, vol. 84, no 6, p. 1309-1323. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.2166/wst.2021.333>

NEALSON, Kenneth H. Bioelectricity (electromicrobiology) and sustainability. Microbial biotechnology [en línea]. 2017, vol. 10, no 5, p. 1114-1119. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12834>

NICARAGUA, Estelí. Metodología de la investigación e investigación aplicada para Ciencias Económicas y Administrativas. Revista de La Universidad Autónoma [en línea]. 2018, p. 1-89. [Fecha de consulta: 15 de octubre de 2022]. Disponible en <https://opomania.net/wp-content/uploads/2021/05/Metadologia-de-la-investigacion-basica-e-investigacion-aplicada.pdf>

ODAR, Juan. Electrificación rural fotovoltaica para suministrar energía eléctrica al caserío paredones, distrito de Chongoyape. [en línea]. 2016. p.33. [Fecha de consulta: 09 de diciembre de 2022]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/9129>.

ORBEGOZO, Jeanette, et al. Identificación molecular de *Pichia guillermondii* aislada de aguas ácidas de minas en el Perú y su resistencia a metales pesados. Revista peruana de biología [en línea]. 2018, vol. 15, no 1, p. 91-95. [Fecha de consulta: 15 de octubre de 2022]. Disponible en

<https://doi.org/10.15381/rpb.v15i1.1681>

PALANISAMY, Gowthami, et al. A comprehensive review on microbial fuel cell technologies: Processes, utilization, and advanced developments in electrodes and membranes. *Journal of cleaner production* [en línea]. 2019, vol. 221, p. 598-621. Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.172>

POTRYKUS, Szymon, et al. The influence of external load on the performance of microbial fuel cells. *Energies* [en línea]. 2021, vol. 14, no 3, p. 612. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.3390/en14030612>

RENU, M., AGARWAL, y SINGH, K. Heavy Metal Removal from Wastewater Using Various Adsorbents: A Review. *Review, Journal of Water Reuse and Desalination* 7 [en línea]. Diciembre 2017, vol. 7, no. 4, p. 387-419. Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://dx.doi.org/10.2166/wrd.2016.104>

REPUELLO, Braulio Ccora, et al. Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales municipales utilizando celdas de combustible microbiano (CCMs) en la ciudad de Huancavelica. *South Sustainability*, [en línea]. 2020, vol. 1, no 2, p. e018-e018. Fecha de consulta: 13 de noviembre de 2022]. Disponible en <https://revistas.cientifica.edu.pe/index.php/southsustainability/article/view/724>

ROJAS, Segundo, et al. Bioelectricity through microbial fuel cells using avocado waste. *Energy Reports* [en línea]. 2022, vol. 8, p. 376-382. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.06.100>

ROJAS, Segundo, et al. Generation Bioelectricity from wastewater using low-cost microbial fuel cells. *LACCEI* [en línea]. 2021. p. 1 - 6. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.129> ISBN: 978-958-52071-8-9

ROJAS, Segundo, et al. Increase in Electrical Parameters Using Sucrose in

Tomato Waste. Fermentation [en línea]. 2022, vol. 8, no 7, p. 335. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.3390/fermentacion8070335>

ROJAS, Segundo, et al. Use of Onion Waste as Fuel for the Generation of Bioelectricity. *Molecules* [en línea]. 2022, vol. 27, no 3, p. 625. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.3390/molecules27030625>

ROSSI, Ruggero; LOGAN, Bruce E. Impact of external resistance acclimation on charge transfer and diffusion resistance in bench-scale microbial fuel cells. *Bioresource technology* [en línea]. 2020, vol. 318, p. 123921. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123921>

ROY, Shantonu; PANDIT, Soumya. Microbial electrochemical system: Principles and application. En *Microbial electrochemical technology. Chemicals and Remediation* [en línea], 2019. p. 19-48. Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-64052-9.00002-9>

SEDALIB. Diagnóstico hídrico rápido de la cuenca del río moche como fuente de agua y servicios ecosistémicos hídricos para la EPS SEDALIB S.A [en línea]. 2018. [Fecha de consulta: 15 de octubre de 2022]. Disponible en <http://sedalib.com.pe/upload/drive/32019/20190305-5683862528.pdf>

SUMISHA, Anappara; HARIBABU, Krishnan. Energy Generation and Iron Removal in Batch and Continuous Single-Chamber Microbial Fuel Cells. *Chemical Engineering & Technology* [en línea]. 2021, vol. 44, no 2, p. 258-264. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://dx.doi.org/10.1002/ceat.202000144>

SANTANDER, Freddy. Estudio de factibilidad técnico - económico para el cambio de luminarias exteriores en el campus de la Universidad técnica del norte utilizando tecnología solar fotovoltaica. [en línea]. 2020. [Fecha de consulta: 09 de diciembre de 2022]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10883>

TABASSUM, Nishat; ISLAM, Nafisa; AHMED, Shoeb. Progress in microbial fuel cells for sustainable management of industrial effluents. *Process Biochemistry* [en línea]. 2021, vol. 106, p. 20-41. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2021.03.032>

TEE, Pei-Fang, et al. Effects of temperature on wastewater treatment in an affordable microbial fuel cell-adsorption hybrid system. *Journal of environmental chemical engineering* [en línea]. 2017, vol. 5, no 1, p. 178-188. [Fecha de consulta: 15 de octubre de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.11.040>

TESSEMA, Tegen Dagne; YEMATA, Temesgen Atnafu. Experimental dataset on the effect of electron acceptors in energy generation from brewery wastewater via a microbial fuel cell. *Data in Brief* [en línea]. 2021, vol. 37, p. 107272. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107272>

THARALI, Akshay D.; SAIN, Namrata; OSBORNE, W. Jabez. Microbial fuel cells in bioelectricity production. *Frontiers in life science* [en línea]. 2016, vol. 9, no 4, p. 252-266. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://dx.doi.org/10.1080/21553769.2016.1230787>

WANG, Li, et al. Mechanisms and reutilization of modified biochar used for removal of heavy metals from wastewater: a review. *Science of the total environment* [en línea]. 2019, vol. 668, p. 1298-1309. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.011>

WANG, Luguang, et al. Urea removal coupled with enhanced electricity generation in single-chambered microbial fuel cells. *Environmental Science and Pollution Research* [en línea]. 2017, vol. 24, no 25, p. 20401-20408. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9689-7>

WANG, Zhongli, et al. Spontaneous thallium (I) oxidation with electricity generation in single-chamber microbial fuel cells. *Applied Energy* [en línea].

2018, vol. 209, p. 33-42. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.075>

WU, Jane-Yii, et al. Economic potential of bioremediation using immobilized microalgae-based microbial fuel cells. *Clean Technologies and Environmental Policy* [en línea]. 2021, vol. 23, no 8, p. 2251-2264. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02131-x>

WU, Yining, et al. Copper removal and microbial community analysis in single-chamber microbial fuel cell. *Bioresource technology* [en línea]. 2018, vol. 253, p. 372-377. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.046>

YANG, Nuan, et al. Complete nitrogen removal and electricity production in *Thauera*-dominated air-cathode single chambered microbial fuel cell. *Chemical Engineering Journal* [en línea]. 2019, vol. 356, p. 506-515. [Fecha de consulta: 15 de octubre de 2022]. Disponible en <https://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.161>

YAQOOB, Asim Ali, et al. Outlook on the role of microbial fuel cells in remediation of environmental pollutants with electricity generation. *Catalysts* [en línea]. 2020, vol. 10, no 8, p. 819. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.3390/catal10080819>

YAQOOB, Asim Ali; IBRAHIM, Mohamad Nasir Mohamad; GUERRERO-BARAJAS, Claudia. Modern trend of anodes in microbial fuel cells (CCMs): an overview. *Environmental technology & innovation* [en línea]. 2021, vol. 23, p. 101579. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2021.101579>

YEE, Mon Oo, et al. Cultivating electroactive microbes—from field to bench. *Nanotechnology* [en línea]. 2020, vol. 31, no 17, p. 174003. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab6ab5>

ZHAO, Mei, et al. Synthesis, crystal structures and properties of ferrocenyl bis-amide derivatives yielded via the ugi four-component reaction. *Molecules*

[en línea]. 2017, vol. 22, no 5, p. 737. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://dx.doi.org/10.3390/molecules22050737> ISSN: 1420-3049

ZHANG, Y., et al. Microbial fuel cell hybrid systems for wastewater treatment and bioenergy production: Synergistic effects, mechanisms and challenges. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* [en línea]. 2019, 103, 13-29. [Fecha de consulta: 20 de mayo de 2022]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.027>

ANEXOS

Anexo 01: Tabla de Variables y Operacionalización.

VARIABLE DE ESTUDIO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
Variable independiente AGUA ÁCIDA	El agua ácida de mina, generado en actividades mineras de yacimientos de sulfuros metálicos, causa grandes problemas ambientales por su alto potencial de contaminación para los recursos hídricos superficiales y subterráneos. (Yang, 2019, p. 2),	El agua ácida de la Relavera Santa Catalina influye en el rendimiento de la celda de combustible microbiana, debido a los componentes que poseen (metales pesados, materia orgánica) para la transferencia de electrones.	Análisis de metales con espectrofotometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS).	Ordinal

<p>Variable dependiente</p> <p>ENERGÍA ELÉCTRICA</p>	<p>La energía eléctrica dentro de las CCMs es la transformación de energía química por medio de microorganismos electroquímicos a través de la transferencia de electrones generados por su actividad metabólica oxidativa hacia el ánodo (Sánchez, Fernández, et al., 2021, p. 21). Además, el potencial redox de los metales pesados también presenta influencia en la generación de energía eléctrica (Bagchi y Behera, 2020).</p>	<p>La generación de energía eléctrica producida por las celdas de combustible microbianas fue medida mediante el voltaje y corriente generada en cada celda.</p>	Voltaje (v)	Ordinal
			Corriente (A)	
			Potencial de Hidrógeno (pH)	
			Turbidez (NTU)	
			Conductividad (mS/cm)	

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 02: Ficha de registro de recolección de muestra.

Proyecto:	Aprovechamiento de agua ácida de relave minero como sustrato en celdas de combustible microbianas para la generación de energía eléctrica				
N.º muestra:	1	Fecha:	11/09/2022	Hora:	9:16 am.
Sitio de toma:	Relavera Santa Catalina				
Ubicación					
Departamento	La Libertad	Provincia	Santiago de Chuco	Distrito	Quiruvilca
Coordenadas					
Latitud:	8°1'39" S	Longitud:	78°18'36" O	m.s.n.m.:	3 927
Tipo de muestreo:	Simple	Tipo de envase:	Polietileno	Volumen:	2 litros
Responsable:	Angie Salvador Salinas				

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 03: Ficha de registro de datos del blanco.

Proyecto:		Aprovechamiento de agua ácida de relave minero como sustrato en celdas de combustible microbianas para la generación de energía eléctrica									
CCM:		Blanco									
N.º	Fecha	Parámetros									
		Voltaje (V)		Corriente (A)		pH		Turbidez (NTU)		Conductividad (mV)	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	12/09/2022	0.26	0.23	0.62	0.64	2.73	2.73	804.00	804.00	220.00	220.00
2	13/09/2022	0.30	0.31	0.79	0.81	2.85	2.91	806.00	803.00	220.00	219.00
3	14/09/2022	0.41	0.45	0.93	0.93	2.92	3.12	806.00	784.00	219.00	208.00
4	15/09/2022	0.54	0.60	0.98	0.93	3.81	3.58	809.00	779.00	218.00	203.00
5	16/09/2022	0.63	0.65	1.27	1.24	3.88	3.76	810.00	767.00	218.00	200.00
6	17/09/2022	0.63	0.62	1.25	1.11	4.00	4.15	812.00	760.00	200.00	185.00
7	18/09/2022	0.63	0.60	1.23	1.12	4.20	4.30	818.00	755.00	183.00	173.00
8	19/09/2022	0.63	0.59	1.21	1.19	4.31	4.40	818.00	754.00	165.00	161.00
9	20/09/2022	0.63	0.60	1.14	1.01	4.39	4.45	815.00	760.00	160.00	159.00
10	21/09/2022	0.61	0.60	1.01	0.92	4.45	4.49	811.00	765.00	155.00	159.00
11	22/09/2022	0.60	0.61	0.91	0.81	4.49	4.50	809.00	771.00	148.00	159.00
12	23/09/2022	0.60	0.61	0.91	0.88	4.53	4.55	806.00	878.00	148.00	158.00
13	24/09/2022	0.60	0.60	0.91	0.86	4.59	4.60	827.00	895.00	145.00	158.00
14	25/09/2022	0.60	0.59	0.90	0.84	4.53	4.65	852.00	900.00	143.00	158.00
15	26/09/2022	0.60	0.58	0.90	0.82	4.68	4.67	860.00	903.00	143.00	158.00
16	27/09/2022	0.58	0.57	0.84	0.81	4.67	4.60	860.00	862.00	142.00	158.00
17	28/09/2022	0.55	0.57	0.79	0.81	4.67	4.70	860.00	904.00	142.00	158.00
18	29/09/2022	0.55	0.57	0.78	0.81	4.67	4.80	995.00	925.00	142.00	158.00
19	30/09/2022	0.52	0.56	0.77	0.80	4.67	4.90	990.00	937.00	142.00	158.00

20	1/10/2022	0.54	0.57	0.77	0.78	4.74	4.25	955.00	941.00	138.00	157.00
21	2/10/2022	0.55	0.58	0.76	0.77	4.79	4.80	950.00	946.00	135.00	155.00
22	3/10/2022	0.57	0.58	0.76	0.76	4.81	4.89	958.00	947.00	134.00	153.00
23	4/10/2022	0.57	0.58	0.78	0.76	4.79	4.84	956.00	947.00	134.00	152.00
24	5/10/2022	0.57	0.56	0.81	0.77	4.75	4.81	951.00	946.00	134.00	150.00
25	6/10/2022	0.58	0.56	0.84	0.78	4.75	4.78	949.00	946.00	134.00	148.00
26	7/10/2022	0.58	0.55	0.85	0.78	4.73	4.75	944.00	943.00	134.00	143.00
27	8/10/2022	0.58	0.55	0.86	0.78	4.73	4.80	945.00	940.00	134.00	142.00
28	9/10/2022	0.59	0.55	0.87	0.78	4.73	4.88	945.00	940.00	134.00	141.00
29	10/10/2022	0.59	0.55	0.87	0.78	4.73	4.74	944.00	939.00	134.00	140.00
30	11/10/2022	0.59	0.54	0.88	0.78	4.73	4.75	943.00	947.00	134.00	150.00

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 04: Valores de voltaje del blanco.

N.º	Fecha	Voltaje (v)		Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación
		1	2			
1	12/09/2022	0.26	0.23	0.25	0.02	9%
2	13/09/2022	0.30	0.31	0.31	0.01	2%
3	14/09/2022	0.41	0.45	0.43	0.03	7%
4	15/09/2022	0.54	0.60	0.57	0.04	7%
5	16/09/2022	0.63	0.65	0.64	0.01	2%
6	17/09/2022	0.63	0.62	0.63	0.01	1%
7	18/09/2022	0.63	0.60	0.62	0.02	3%
8	19/09/2022	0.63	0.59	0.61	0.03	5%
9	20/09/2022	0.63	0.60	0.62	0.02	3%
10	21/09/2022	0.61	0.60	0.61	0.01	1%
11	22/09/2022	0.60	0.61	0.61	0.01	1%
12	23/09/2022	0.60	0.61	0.61	0.01	1%
13	24/09/2022	0.60	0.60	0.60	0.00	0%
14	25/09/2022	0.60	0.59	0.60	0.01	1%
15	26/09/2022	0.60	0.58	0.59	0.01	2%
16	27/09/2022	0.58	0.57	0.58	0.01	1%
17	28/09/2022	0.55	0.57	0.56	0.01	3%
18	29/09/2022	0.55	0.57	0.56	0.01	3%
19	30/09/2022	0.52	0.56	0.54	0.03	5%
20	1/10/2022	0.54	0.57	0.56	0.02	4%
21	2/10/2022	0.55	0.58	0.57	0.02	4%
22	3/10/2022	0.57	0.58	0.58	0.01	1%
23	4/10/2022	0.57	0.58	0.58	0.01	1%
24	5/10/2022	0.57	0.56	0.57	0.01	1%
25	6/10/2022	0.58	0.56	0.57	0.01	2%
26	7/10/2022	0.58	0.55	0.57	0.02	4%
27	8/10/2022	0.58	0.55	0.57	0.02	4%
28	9/10/2022	0.59	0.55	0.57	0.03	5%
29	10/10/2022	0.59	0.55	0.57	0.03	5%
30	11/10/2022	0.59	0.54	0.57	0.04	6%

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 05: Valores de corriente del blanco.

N.º	Fecha	Corriente (A)		Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
		1	2	X	S	CV
1	12/09/2022	0.62	0.64	0.63	0.01	2%
2	13/09/2022	0.79	0.81	0.80	0.01	2%
3	14/09/2022	0.93	0.93	0.93	0.00	0%
4	15/09/2022	0.98	0.93	0.96	0.04	4%
5	16/09/2022	1.27	1.24	1.26	0.02	2%
6	17/09/2022	1.25	1.11	1.18	0.10	8%
7	18/09/2022	1.23	1.12	1.18	0.08	7%
8	19/09/2022	1.21	1.19	1.20	0.01	1%
9	20/09/2022	1.14	1.01	1.08	0.09	9%
10	21/09/2022	1.01	0.92	0.97	0.06	7%
11	22/09/2022	0.91	0.81	0.86	0.07	8%
12	23/09/2022	0.91	0.88	0.90	0.02	2%
13	24/09/2022	0.91	0.86	0.89	0.04	4%
14	25/09/2022	0.90	0.84	0.87	0.04	5%
15	26/09/2022	0.90	0.82	0.86	0.06	7%
16	27/09/2022	0.84	0.81	0.83	0.02	3%
17	28/09/2022	0.79	0.81	0.80	0.01	2%
18	29/09/2022	0.78	0.81	0.80	0.02	3%
19	30/09/2022	0.77	0.80	0.79	0.02	3%
20	1/10/2022	0.77	0.78	0.78	0.01	1%
21	2/10/2022	0.76	0.77	0.77	0.01	1%
22	3/10/2022	0.76	0.76	0.76	0.00	0%
23	4/10/2022	0.78	0.76	0.77	0.01	2%
24	5/10/2022	0.81	0.77	0.79	0.03	4%
25	6/10/2022	0.84	0.78	0.81	0.04	5%
26	7/10/2022	0.85	0.78	0.82	0.05	6%
27	8/10/2022	0.86	0.78	0.82	0.06	7%
28	9/10/2022	0.87	0.78	0.83	0.06	8%
29	10/10/2022	0.87	0.78	0.83	0.06	8%
30	11/10/2022	0.88	0.78	0.83	0.07	9%

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 06: Valores de pH del blanco.

N.º	Fecha	pH		Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación
		1	2			
1	12/09/2022	2.73	2.73	2.73	0.00	0%
2	13/09/2022	2.85	2.91	2.88	0.04	1%
3	14/09/2022	2.92	3.12	3.02	0.14	5%
4	15/09/2022	3.81	3.58	3.70	0.16	4%
5	16/09/2022	3.88	3.76	3.82	0.08	2%
6	17/09/2022	4.00	4.15	4.08	0.11	3%
7	18/09/2022	4.20	4.30	4.25	0.07	2%
8	19/09/2022	4.31	4.40	4.36	0.06	1%
9	20/09/2022	4.39	4.45	4.42	0.04	1%
10	21/09/2022	4.45	4.49	4.47	0.03	1%
11	22/09/2022	4.49	4.50	4.50	0.01	0%
12	23/09/2022	4.53	4.55	4.54	0.01	0%
13	24/09/2022	4.59	4.60	4.60	0.01	0%
14	25/09/2022	4.53	4.65	4.59	0.08	2%
15	26/09/2022	4.68	4.67	4.68	0.01	0%
16	27/09/2022	4.67	4.60	4.64	0.05	1%
17	28/09/2022	4.67	4.70	4.69	0.02	0%
18	29/09/2022	4.67	4.80	4.74	0.09	2%
19	30/09/2022	4.67	4.90	4.79	0.16	3%
20	1/10/2022	4.74	4.25	4.50	0.35	8%
21	2/10/2022	4.79	4.80	4.80	0.01	0%
22	3/10/2022	4.81	4.89	4.85	0.06	1%
23	4/10/2022	4.79	4.84	4.82	0.04	1%
24	5/10/2022	4.75	4.81	4.78	0.04	1%
25	6/10/2022	4.75	4.78	4.77	0.02	0%
26	7/10/2022	4.73	4.75	4.74	0.01	0%
27	8/10/2022	4.73	4.80	4.77	0.05	1%
28	9/10/2022	4.73	4.88	4.81	0.11	2%
29	10/10/2022	4.73	4.74	4.74	0.01	0%
30	11/10/2022	4.73	4.75	4.74	0.01	0%

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 07: Valores de Turbidez del blanco.

N.º	Fecha	Turbidez (NTU)		Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación
		1	2			
1	12/09/2022	804.00	804.00	804.00	0.00	0%
2	13/09/2022	806.00	803.00	804.50	2.12	0%
3	14/09/2022	806.00	784.00	795.00	15.56	2%
4	15/09/2022	809.00	779.00	794.00	21.21	3%
5	16/09/2022	810.00	767.00	788.50	30.41	4%
6	17/09/2022	812.00	760.00	786.00	36.77	5%
7	18/09/2022	818.00	755.00	786.50	44.55	6%
8	19/09/2022	818.00	754.00	786.00	45.25	6%
9	20/09/2022	815.00	760.00	787.50	38.89	5%
10	21/09/2022	811.00	765.00	788.00	32.53	4%
11	22/09/2022	809.00	771.00	790.00	26.87	3%
12	23/09/2022	806.00	878.00	842.00	50.91	6%
13	24/09/2022	827.00	895.00	861.00	48.08	6%
14	25/09/2022	852.00	900.00	876.00	33.94	4%
15	26/09/2022	860.00	903.00	881.50	30.41	3%
16	27/09/2022	860.00	862.00	861.00	1.41	0%
17	28/09/2022	860.00	904.00	882.00	31.11	4%
18	29/09/2022	995.00	925.00	960.00	49.50	5%
19	30/09/2022	990.00	937.00	963.50	37.48	4%
20	1/10/2022	955.00	941.00	948.00	9.90	1%
21	2/10/2022	950.00	946.00	948.00	2.83	0%
22	3/10/2022	958.00	947.00	952.50	7.78	1%
23	4/10/2022	956.00	947.00	951.50	6.36	1%
24	5/10/2022	951.00	946.00	948.50	3.54	0%
25	6/10/2022	949.00	946.00	947.50	2.12	0%
26	7/10/2022	944.00	943.00	943.50	0.71	0%
27	8/10/2022	945.00	940.00	942.50	3.54	0%
28	9/10/2022	945.00	940.00	942.50	3.54	0%
29	10/10/2022	944.00	939.00	941.50	3.54	0%
30	11/10/2022	943.00	947.00	945.00	2.83	0%

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 08: Valores de conductividad del blanco.

N.º	Fecha	Conductividad (mV)		Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
		1	2	X	S	CV
1	12/09/2022	220.00	220.00	220.00	0.00	0%
2	13/09/2022	220.00	219.00	219.50	0.71	0%
3	14/09/2022	219.00	208.00	213.50	7.78	4%
4	15/09/2022	218.00	203.00	210.50	10.61	5%
5	16/09/2022	218.00	200.00	209.00	12.73	6%
6	17/09/2022	200.00	185.00	192.50	10.61	6%
7	18/09/2022	183.00	173.00	178.00	7.07	4%
8	19/09/2022	165.00	161.00	163.00	2.83	2%
9	20/09/2022	160.00	159.00	159.50	0.71	0%
10	21/09/2022	155.00	159.00	157.00	2.83	2%
11	22/09/2022	148.00	159.00	153.50	7.78	5%
12	23/09/2022	148.00	158.00	153.00	7.07	5%
13	24/09/2022	145.00	158.00	151.50	9.19	6%
14	25/09/2022	143.00	158.00	150.50	10.61	7%
15	26/09/2022	143.00	158.00	150.50	10.61	7%
16	27/09/2022	142.00	158.00	150.00	11.31	8%
17	28/09/2022	142.00	158.00	150.00	11.31	8%
18	29/09/2022	142.00	158.00	150.00	11.31	8%
19	30/09/2022	142.00	158.00	150.00	11.31	8%
20	1/10/2022	138.00	157.00	147.50	13.44	9%
21	2/10/2022	135.00	155.00	145.00	14.14	10%
22	3/10/2022	134.00	153.00	143.50	13.44	9%
23	4/10/2022	134.00	152.00	143.00	12.73	9%
24	5/10/2022	134.00	150.00	142.00	11.31	8%
25	6/10/2022	134.00	148.00	141.00	9.90	7%
26	7/10/2022	134.00	143.00	138.50	6.36	5%
27	8/10/2022	134.00	142.00	138.00	5.66	4%
28	9/10/2022	134.00	141.00	137.50	4.95	4%
29	10/10/2022	134.00	140.00	137.00	4.24	3%
30	11/10/2022	134.00	150.00	142.00	11.31	8%

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 09: Ficha de registro de datos de las CCMs con agua ácida.

Proyecto:		Aprovechamiento de agua ácida de relave minero como sustrato en celdas de combustible microbianas para la generación de energía eléctrica									
CCM:		Agua ácida de relave minero									
Nº	Fecha	Parámetros									
		Voltaje (v)		Corriente (A)		pH		Turbidez (NTU)		Conductividad (mV)	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	12/09/2022	0.56	0.53	1.80	1.85	2.95	2.95	228.00	228.00	148.00	150.00
2	13/09/2022	0.60	0.59	1.73	1.84	3.13	3.15	227.00	225.00	150.00	152.00
3	14/09/2022	0.63	0.63	1.64	1.80	3.41	3.56	227.00	208.00	152.00	155.00
4	15/09/2022	0.66	0.64	1.12	1.20	3.64	3.86	221.00	226.00	154.00	150.00
5	16/09/2022	0.66	0.63	1.00	1.10	4.16	4.29	326.00	342.00	150.00	151.00
6	17/09/2022	0.66	0.63	1.00	1.09	4.18	4.33	345.00	372.00	152.00	152.00
7	18/09/2022	0.65	0.63	1.00	1.09	4.21	4.40	475.00	462.00	157.00	155.00
8	19/09/2022	0.65	0.63	1.00	1.09	4.22	4.42	485.00	475.00	160.00	161.00
9	20/09/2022	0.64	0.63	1.00	1.09	4.30	4.47	522.00	564.00	158.00	158.00
10	21/09/2022	0.64	0.63	1.44	1.31	4.41	4.52	571.00	632.00	157.00	152.00
11	22/09/2022	0.61	0.60	1.40	1.31	4.49	4.59	710.20	728.00	155.00	150.00
12	23/09/2022	0.60	0.60	1.45	1.28	4.74	4.70	721.30	812.00	154.00	150.00
13	24/09/2022	0.61	0.60	1.10	1.25	4.65	4.61	724.10	814.00	156.00	148.00
14	25/09/2022	0.62	0.60	1.09	1.10	4.44	4.45	725.00	815.00	157.00	147.00
15	26/09/2022	0.60	0.60	1.05	0.95	4.39	4.39	778.00	817.00	159.00	146.00
16	27/09/2022	0.61	0.60	1.02	0.95	4.65	4.34	795.00	861.00	156.00	151.00
17	28/09/2022	0.62	0.60	0.97	0.90	4.73	4.32	813.00	906.00	152.00	152.00
18	29/09/2022	0.62	0.60	0.95	0.90	4.59	4.63	908.00	915.00	151.00	150.00
19	30/09/2022	0.60	0.59	0.95	0.93	4.40	4.47	912.00	919.00	149.00	150.00

20	1/10/2022	0.60	0.60	0.95	0.94	4.35	4.55	915.00	921.00	147.00	148.00
21	2/10/2022	0.59	0.60	0.95	0.95	4.30	4.59	919.00	923.00	146.00	146.00
22	3/10/2022	0.59	0.59	0.95	0.96	4.33	4.60	923.00	924.00	145.00	145.00
23	4/10/2022	0.60	0.59	0.94	0.89	4.55	4.60	925.00	924.00	150.00	150.00
24	5/10/2022	0.61	0.58	0.87	0.85	4.69	4.45	928.00	924.00	155.00	155.00
25	6/10/2022	0.61	0.58	0.86	0.79	4.57	4.46	957.00	924.00	160.00	158.00
26	7/10/2022	0.60	0.58	0.83	0.77	4.50	4.50	964.00	987.00	155.00	160.00
27	8/10/2022	0.55	0.58	0.82	0.77	4.52	4.52	968.00	989.00	145.00	148.00
28	9/10/2022	0.59	0.58	0.81	0.77	4.53	4.53	970.00	990.00	150.00	155.00
29	10/10/2022	0.59	0.58	0.80	0.77	4.54	4.54	972.00	991.00	148.00	149.00
30	11/10/2022	0.58	0.58	0.80	0.77	4.54	4.54	971.00	991.00	148.00	149.00

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 10: Valores de voltaje de las CCMs con agua ácida.

N.º	Fecha	Voltaje (v)		Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación
		1	2			
1	12/09/2022	0.56	0.53	0.55	0.02	4%
2	13/09/2022	0.60	0.59	0.60	0.01	1%
3	14/09/2022	0.63	0.63	0.63	0.00	0%
4	15/09/2022	0.66	0.64	0.65	0.01	2%
5	16/09/2022	0.66	0.63	0.65	0.02	3%
6	17/09/2022	0.66	0.63	0.65	0.02	3%
7	18/09/2022	0.65	0.63	0.64	0.01	2%
8	19/09/2022	0.65	0.63	0.64	0.01	2%
9	20/09/2022	0.64	0.63	0.64	0.01	1%
10	21/09/2022	0.64	0.63	0.64	0.01	1%
11	22/09/2022	0.61	0.60	0.61	0.01	1%
12	23/09/2022	0.60	0.60	0.60	0.00	0%
13	24/09/2022	0.61	0.60	0.61	0.01	1%
14	25/09/2022	0.62	0.60	0.61	0.01	2%
15	26/09/2022	0.60	0.60	0.60	0.00	0%
16	27/09/2022	0.61	0.60	0.61	0.01	1%
17	28/09/2022	0.62	0.60	0.61	0.01	2%
18	29/09/2022	0.62	0.60	0.61	0.01	2%
19	30/09/2022	0.60	0.59	0.60	0.01	1%
20	1/10/2022	0.60	0.60	0.60	0.00	0%
21	2/10/2022	0.59	0.60	0.60	0.01	1%
22	3/10/2022	0.59	0.59	0.59	0.00	0%
23	4/10/2022	0.60	0.59	0.60	0.01	1%
24	5/10/2022	0.61	0.58	0.60	0.02	4%
25	6/10/2022	0.61	0.58	0.60	0.02	4%
26	7/10/2022	0.60	0.58	0.59	0.01	2%
27	8/10/2022	0.55	0.58	0.57	0.02	4%
28	9/10/2022	0.59	0.58	0.59	0.01	1%
29	10/10/2022	0.59	0.58	0.59	0.01	1%
30	11/10/2022	0.58	0.58	0.58	0.00	0%

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 11: Valores de corriente de las CCMs con agua ácida.

N.º	Fecha	Corriente (A)		Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
		1	2	X	S	CV
1	12/09/2022	1.80	1.85	1.83	0.04	2%
2	13/09/2022	1.73	1.84	1.79	0.08	4%
3	14/09/2022	1.64	1.80	1.72	0.11	7%
4	15/09/2022	1.12	1.20	1.16	0.06	5%
5	16/09/2022	1.00	1.10	1.05	0.07	7%
6	17/09/2022	1.00	1.09	1.05	0.06	6%
7	18/09/2022	1.00	1.09	1.05	0.06	6%
8	19/09/2022	1.00	1.09	1.05	0.06	6%
9	20/09/2022	1.00	1.09	1.05	0.06	6%
10	21/09/2022	1.44	1.31	1.38	0.09	7%
11	22/09/2022	1.40	1.31	1.36	0.06	5%
12	23/09/2022	1.45	1.28	1.37	0.12	9%
13	24/09/2022	1.10	1.25	1.18	0.11	9%
14	25/09/2022	1.09	1.10	1.10	0.01	1%
15	26/09/2022	1.05	0.95	1.00	0.07	7%
16	27/09/2022	1.02	0.95	0.99	0.05	5%
17	28/09/2022	0.97	0.90	0.94	0.05	5%
18	29/09/2022	0.95	0.90	0.93	0.04	4%
19	30/09/2022	0.95	0.93	0.94	0.01	2%
20	1/10/2022	0.95	0.94	0.95	0.01	1%
21	2/10/2022	0.95	0.95	0.95	0.00	0%
22	3/10/2022	0.95	0.96	0.96	0.01	1%
23	4/10/2022	0.94	0.89	0.92	0.04	4%
24	5/10/2022	0.87	0.85	0.86	0.01	2%
25	6/10/2022	0.86	0.79	0.83	0.05	6%
26	7/10/2022	0.83	0.77	0.80	0.04	5%
27	8/10/2022	0.82	0.77	0.80	0.04	4%
28	9/10/2022	0.81	0.77	0.79	0.03	4%
29	10/10/2022	0.80	0.77	0.79	0.02	3%
30	11/10/2022	0.80	0.77	0.79	0.02	3%

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 12: Valores de pH de las CCMs con agua ácida.

N.º	Fecha	pH		Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
		1	2	X	S	CV
1	12/09/2022	2.95	2.95	2.95	0.00	0%
2	13/09/2022	3.13	3.15	3.14	0.01	0%
3	14/09/2022	3.41	3.56	3.49	0.11	3%
4	15/09/2022	3.64	3.86	3.75	0.16	4%
5	16/09/2022	4.16	4.29	4.23	0.09	2%
6	17/09/2022	4.18	4.33	4.26	0.11	2%
7	18/09/2022	4.21	4.40	4.31	0.13	3%
8	19/09/2022	4.22	4.42	4.32	0.14	3%
9	20/09/2022	4.30	4.47	4.39	0.12	3%
10	21/09/2022	4.41	4.52	4.47	0.08	2%
11	22/09/2022	4.49	4.59	4.54	0.07	2%
12	23/09/2022	4.74	4.70	4.72	0.03	1%
13	24/09/2022	4.65	4.61	4.63	0.03	1%
14	25/09/2022	4.44	4.45	4.45	0.01	0%
15	26/09/2022	4.39	4.39	4.39	0.00	0%
16	27/09/2022	4.65	4.34	4.50	0.22	5%
17	28/09/2022	4.73	4.32	4.53	0.29	6%
18	29/09/2022	4.59	4.63	4.61	0.03	1%
19	30/09/2022	4.40	4.47	4.44	0.05	1%
20	1/10/2022	4.35	4.55	4.45	0.14	3%
21	2/10/2022	4.30	4.59	4.45	0.21	5%
22	3/10/2022	4.33	4.60	4.47	0.19	4%
23	4/10/2022	4.55	4.60	4.58	0.04	1%
24	5/10/2022	4.69	4.45	4.57	0.17	4%
25	6/10/2022	4.57	4.46	4.52	0.08	2%
26	7/10/2022	4.50	4.50	4.50	0.00	0%
27	8/10/2022	4.52	4.52	4.52	0.00	0%
28	9/10/2022	4.53	4.53	4.53	0.00	0%
29	10/10/2022	4.54	4.54	4.54	0.00	0%
30	11/10/2022	4.54	4.54	4.54	0.00	0%

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 13: Valores de turbidez de las CCMs con agua ácida.

N.º	Fecha	Turbidez (NTU)		Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación
		1	2			
1	12/09/2022	228.00	228.00	228.00	0.00	0%
2	13/09/2022	227.00	225.00	226.00	1.41	1%
3	14/09/2022	227.00	208.00	217.50	13.44	6%
4	15/09/2022	221.00	226.00	223.50	3.54	2%
5	16/09/2022	326.00	342.00	334.00	11.31	3%
6	17/09/2022	345.00	372.00	358.50	19.09	5%
7	18/09/2022	475.00	462.00	468.50	9.19	2%
8	19/09/2022	485.00	475.00	480.00	7.07	1%
9	20/09/2022	522.00	564.00	543.00	29.70	5%
10	21/09/2022	571.00	632.00	601.50	43.13	7%
11	22/09/2022	710.20	728.00	719.10	12.59	2%
12	23/09/2022	721.30	812.00	766.65	64.13	8%
13	24/09/2022	724.10	814.00	769.05	63.57	8%
14	25/09/2022	725.00	815.00	770.00	63.64	8%
15	26/09/2022	778.00	817.00	797.50	27.58	3%
16	27/09/2022	795.00	861.00	828.00	46.67	6%
17	28/09/2022	813.00	906.00	859.50	65.76	8%
18	29/09/2022	908.00	915.00	911.50	4.95	1%
19	30/09/2022	912.00	919.00	915.50	4.95	1%
20	1/10/2022	915.00	921.00	918.00	4.24	0%
21	2/10/2022	919.00	923.00	921.00	2.83	0%
22	3/10/2022	923.00	924.00	923.50	0.71	0%
23	4/10/2022	925.00	924.00	924.50	0.71	0%
24	5/10/2022	928.00	924.00	926.00	2.83	0%
25	6/10/2022	957.00	924.00	940.50	23.33	2%
26	7/10/2022	964.00	987.00	975.50	16.26	2%
27	8/10/2022	968.00	989.00	978.50	14.85	2%
28	9/10/2022	970.00	990.00	980.00	14.14	1%
29	10/10/2022	972.00	991.00	981.50	13.44	1%
30	11/10/2022	971.00	991.00	981.00	14.14	1%

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 14: Valores de turbidez de las CCMs con agua ácida.

N.º	Fecha	Conductividad (mV)		Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación
		1	2			
1	12/09/2022	148.00	150.00	149.00	1.41	1%
2	13/09/2022	150.00	152.00	151.00	1.41	1%
3	14/09/2022	152.00	155.00	153.50	2.12	1%
4	15/09/2022	154.00	150.00	152.00	2.83	2%
5	16/09/2022	150.00	151.00	150.50	0.71	0%
6	17/09/2022	152.00	152.00	152.00	0.00	0%
7	18/09/2022	157.00	155.00	156.00	1.41	1%
8	19/09/2022	160.00	161.00	160.50	0.71	0%
9	20/09/2022	158.00	158.00	158.00	0.00	0%
10	21/09/2022	157.00	152.00	154.50	3.54	2%
11	22/09/2022	155.00	150.00	152.50	3.54	2%
12	23/09/2022	154.00	150.00	152.00	2.83	2%
13	24/09/2022	156.00	148.00	152.00	5.66	4%
14	25/09/2022	157.00	147.00	152.00	7.07	5%
15	26/09/2022	159.00	146.00	152.50	9.19	6%
16	27/09/2022	156.00	151.00	153.50	3.54	2%
17	28/09/2022	152.00	152.00	152.00	0.00	0%
18	29/09/2022	151.00	150.00	150.50	0.71	0%
19	30/09/2022	149.00	150.00	149.50	0.71	0%
20	1/10/2022	147.00	148.00	147.50	0.71	0%
21	2/10/2022	146.00	146.00	146.00	0.00	0%
22	3/10/2022	145.00	145.00	145.00	0.00	0%
23	4/10/2022	150.00	150.00	150.00	0.00	0%
24	5/10/2022	155.00	155.00	155.00	0.00	0%
25	6/10/2022	160.00	158.00	159.00	1.41	1%
26	7/10/2022	155.00	160.00	157.50	3.54	2%
27	8/10/2022	145.00	148.00	146.50	2.12	1%
28	9/10/2022	150.00	155.00	152.50	3.54	2%
29	10/10/2022	148.00	149.00	148.50	0.71	0%
30	11/10/2022	148.00	149.00	148.50	0.71	0%

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 15: Ficha de registro de datos de las CCMs con Bacteria *Serratia fonticola*.

Proyecto:		Aprovechamiento de agua ácida de relave minero como sustrato en celdas de combustible microbianas para la generación de energía eléctrica							
CCM con:		Bacteria <i>Serratia fonticola</i>							
Nº	Fecha	Parámetros							
		Voltaje (v)		Corriente (A)		pH		Conductividad (mV)	
		1	2	1	2	1	2	1	2
1	18/10/2022	0.41	0.38	0.67	0.72	2.98	2.98	239.30	245.10
2	19/10/2022	0.45	0.50	1.20	1.26	2.98	2.98	239.30	245.10
3	20/10/2022	0.49	0.50	1.63	1.60	3.62	3.63	205.60	208.20
4	21/10/2022	0.52	0.53	1.64	1.87	3.96	3.94	193.80	195.00
5	22/10/2022	0.52	0.53	0.95	0.91	4.61	4.52	176.40	179.00
6	23/10/2022	0.52	0.53	0.86	0.89	4.50	4.46	173.00	169.20
7	24/10/2022	0.52	0.54	0.83	0.85	4.34	4.35	169.90	164.60
8	25/10/2022	0.51	0.54	0.84	0.85	4.31	4.30	169.50	164.60
9	26/10/2022	0.50	0.54	0.76	0.74	4.36	4.31	168.00	164.40
10	27/10/2022	0.50	0.54	0.71	0.68	4.38	4.35	159.00	157.20
11	28/10/2022	0.50	0.54	0.68	0.64	4.46	4.48	147.40	146.50
12	29/10/2022	0.50	0.53	0.63	0.63	4.68	4.72	134.10	137.20
13	30/10/2022	0.50	0.52	0.59	0.56	5.15	5.10	123.70	130.80
14	31/10/2022	0.49	0.50	0.54	0.55	5.26	5.32	119.00	125.20
15	1/11/2022	0.45	0.47	0.54	0.53	5.30	5.32	115.00	116.10
16	2/11/2022	0.43	0.47	0.55	0.53	5.44	5.42	103.20	100.00
17	3/11/2022	0.49	0.46	0.55	0.51	5.53	5.48	97.00	95.00
18	4/11/2022	0.49	0.46	0.55	0.51	5.45	5.62	92.80	89.50
19	5/11/2022	0.45	0.45	0.55	0.51	5.58	5.66	87.00	88.10

20	6/11/2022	0.43	0.40	0.55	0.49	5.58	5.77	85.40	87.00
21	7/11/2022	0.42	0.38	0.53	0.49	5.76	5.82	83.90	86.80
22	8/11/2022	0.44	0.38	0.50	0.46	5.93	5.90	82.00	83.30
23	9/11/2022	0.44	0.38	0.48	0.43	5.93	5.93	83.00	80.70
24	10/11/2022	0.40	0.37	0.44	0.42	6.13	6.12	74.00	71.50
25	11/11/2022	0.40	0.37	0.43	0.40	6.19	6.17	73.80	71.00
26	12/11/2022	0.40	0.37	0.42	0.40	6.24	6.23	73.40	71.00
27	13/11/2022	0.40	0.37	0.42	0.40	6.24	6.23	72.80	70.30
28	14/11/2022	0.39	0.36	0.36	0.38	6.24	6.23	71.40	69.20
29	15/11/2022	0.38	0.36	0.34	0.35	6.23	6.21	69.00	67.40
30	16/11/2022	0.38	0.36	0.28	0.31	6.16	6.21	68.60	63.30

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 16: Valores de voltaje de las CCMs con Bacteria *Serratia fonticola*.

N.º	Fecha	Voltaje (V)		Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación
		1	2	X	S	CV
1	18/10/2022	0.41	0.38	0.40	0.02	5%
2	19/10/2022	0.45	0.50	0.48	0.04	7%
3	20/10/2022	0.49	0.50	0.50	0.01	1%
4	21/10/2022	0.52	0.53	0.53	0.01	1%
5	22/10/2022	0.52	0.53	0.53	0.01	1%
6	23/10/2022	0.52	0.53	0.53	0.01	1%
7	24/10/2022	0.52	0.54	0.53	0.01	3%
8	25/10/2022	0.51	0.54	0.53	0.02	4%
9	26/10/2022	0.50	0.54	0.52	0.03	5%
10	27/10/2022	0.50	0.54	0.52	0.03	5%
11	28/10/2022	0.50	0.54	0.52	0.03	5%
12	29/10/2022	0.50	0.53	0.52	0.02	4%
13	30/10/2022	0.50	0.52	0.51	0.01	3%
14	31/10/2022	0.49	0.50	0.50	0.01	1%
15	1/11/2022	0.45	0.47	0.46	0.01	3%
16	2/11/2022	0.43	0.47	0.45	0.03	6%
17	3/11/2022	0.49	0.46	0.48	0.02	4%
18	4/11/2022	0.49	0.46	0.48	0.02	4%
19	5/11/2022	0.45	0.45	0.45	0.00	0%
20	6/11/2022	0.43	0.40	0.42	0.02	5%
21	7/11/2022	0.42	0.38	0.40	0.03	7%
22	8/11/2022	0.44	0.38	0.41	0.04	10%
23	9/11/2022	0.44	0.38	0.41	0.04	10%
24	10/11/2022	0.40	0.37	0.39	0.02	6%
25	11/11/2022	0.40	0.37	0.39	0.02	6%
26	12/11/2022	0.40	0.37	0.39	0.02	6%
27	13/11/2022	0.40	0.37	0.39	0.02	6%
28	14/11/2022	0.39	0.36	0.38	0.02	6%
29	15/11/2022	0.38	0.36	0.37	0.01	4%
30	16/11/2022	0.38	0.36	0.37	0.01	4%

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 17: Valores de corriente de las CCMs con Bacteria *Serratia fonticola*.

N.º	Fecha	Corriente (A)		Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
		1	3	X	S	CV
1	18/10/2022	0.67	0.72	0.70	0.04	5%
2	19/10/2022	1.20	1.26	1.23	0.04	3%
3	20/10/2022	1.63	1.60	1.62	0.02	1%
4	21/10/2022	1.64	1.87	1.76	0.16	9%
5	22/10/2022	0.95	0.91	0.93	0.03	3%
6	23/10/2022	0.86	0.89	0.88	0.02	2%
7	24/10/2022	0.83	0.85	0.84	0.01	2%
8	25/10/2022	0.84	0.85	0.85	0.01	1%
9	26/10/2022	0.76	0.74	0.75	0.01	2%
10	27/10/2022	0.71	0.68	0.70	0.02	3%
11	28/10/2022	0.68	0.64	0.66	0.03	4%
12	29/10/2022	0.63	0.63	0.63	0.00	0%
13	30/10/2022	0.59	0.56	0.58	0.02	4%
14	31/10/2022	0.54	0.55	0.55	0.01	1%
15	1/11/2022	0.54	0.53	0.54	0.01	1%
16	2/11/2022	0.55	0.53	0.54	0.01	3%
17	3/11/2022	0.55	0.51	0.53	0.03	5%
18	4/11/2022	0.55	0.51	0.53	0.03	5%
19	5/11/2022	0.55	0.51	0.53	0.03	5%
20	6/11/2022	0.55	0.49	0.52	0.04	8%
21	7/11/2022	0.53	0.49	0.51	0.03	6%
22	8/11/2022	0.50	0.46	0.48	0.03	6%
23	9/11/2022	0.48	0.43	0.46	0.04	8%
24	10/11/2022	0.44	0.42	0.43	0.01	3%
25	11/11/2022	0.43	0.40	0.42	0.02	5%
26	12/11/2022	0.42	0.40	0.41	0.01	3%
27	13/11/2022	0.42	0.40	0.41	0.01	3%
28	14/11/2022	0.36	0.38	0.37	0.01	4%
29	15/11/2022	0.34	0.35	0.35	0.01	2%
30	16/11/2022	0.28	0.31	0.30	0.02	7%

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 18: Valores de pH corriente de las CCMs con Bacteria *Serratia fonticola*.

N.º	Fecha	pH		Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
		1	2	X	S	CV
1	18/10/2022	2.98	2.98	2.98	0.00	0%
2	19/10/2022	2.98	2.98	2.98	0.00	0%
3	20/10/2022	3.62	3.63	3.63	0.01	0%
4	21/10/2022	3.96	3.94	3.95	0.01	0%
5	22/10/2022	4.61	4.52	4.57	0.06	1%
6	23/10/2022	4.50	4.46	4.48	0.03	1%
7	24/10/2022	4.34	4.35	4.35	0.01	0%
8	25/10/2022	4.31	4.30	4.31	0.01	0%
9	26/10/2022	4.36	4.31	4.34	0.04	1%
10	27/10/2022	4.38	4.35	4.37	0.02	0%
11	28/10/2022	4.46	4.48	4.47	0.01	0%
12	29/10/2022	4.68	4.72	4.70	0.03	1%
13	30/10/2022	5.15	5.10	5.13	0.04	1%
14	31/10/2022	5.26	5.32	5.29	0.04	1%
15	1/11/2022	5.30	5.32	5.31	0.01	0%
16	2/11/2022	5.44	5.42	5.43	0.01	0%
17	3/11/2022	5.53	5.48	5.51	0.04	1%
18	4/11/2022	5.45	5.62	5.54	0.12	2%
19	5/11/2022	5.58	5.66	5.62	0.06	1%
20	6/11/2022	5.58	5.77	5.68	0.13	2%
21	7/11/2022	5.76	5.82	5.79	0.04	1%
22	8/11/2022	5.93	5.90	5.92	0.02	0%
23	9/11/2022	5.93	5.93	5.93	0.00	0%
24	10/11/2022	6.13	6.12	6.13	0.01	0%
25	11/11/2022	6.19	6.17	6.18	0.01	0%
26	12/11/2022	6.24	6.23	6.24	0.01	0%
27	13/11/2022	6.24	6.23	6.24	0.01	0%
28	14/11/2022	6.24	6.23	6.24	0.01	0%
29	15/11/2022	6.23	6.21	6.22	0.01	0%
30	16/11/2022	6.16	6.21	6.19	0.04	1%

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 19: Valores de pH conductividad de las CCMs con Bacteria *Serratia fonticola*.

N.º	Fecha	Conductividad (mV)		Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
		1	2	X	S	CV
1	18/10/2022	239.30	245.10	242.20	4.10	2%
2	19/10/2022	239.30	245.10	242.20	4.10	2%
3	20/10/2022	205.60	208.20	206.90	1.84	1%
4	21/10/2022	193.80	195.00	194.40	0.85	0%
5	22/10/2022	176.40	179.00	177.70	1.84	1%
6	23/10/2022	173.00	169.20	171.10	2.69	2%
7	24/10/2022	169.90	164.60	167.25	3.75	2%
8	25/10/2022	169.50	164.60	167.05	3.46	2%
9	26/10/2022	168.00	164.40	166.20	2.55	2%
10	27/10/2022	159.00	157.20	158.10	1.27	1%
11	28/10/2022	147.40	146.50	146.95	0.64	0%
12	29/10/2022	134.10	137.20	135.65	2.19	2%
13	30/10/2022	123.70	130.80	127.25	5.02	4%
14	31/10/2022	119.00	125.20	122.10	4.38	4%
15	1/11/2022	115.00	116.10	115.55	0.78	1%
16	2/11/2022	103.20	100.00	101.60	2.26	2%
17	3/11/2022	97.00	95.00	96.00	1.41	1%
18	4/11/2022	92.80	89.50	91.15	2.33	3%
19	5/11/2022	87.00	88.10	87.55	0.78	1%
20	6/11/2022	85.40	87.00	86.20	1.13	1%
21	7/11/2022	83.90	86.80	85.35	2.05	2%
22	8/11/2022	82.00	83.30	82.65	0.92	1%
23	9/11/2022	83.00	80.70	81.85	1.63	2%
24	10/11/2022	74.00	71.50	72.75	1.77	2%
25	11/11/2022	73.80	71.00	72.40	1.98	3%
26	12/11/2022	73.40	71.00	72.20	1.70	2%
27	13/11/2022	72.80	70.30	71.55	1.77	2%
28	14/11/2022	71.40	69.20	70.30	1.56	2%
29	15/11/2022	69.00	67.40	68.20	1.13	2%
30	16/11/2022	68.60	63.30	65.95	3.75	6%

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 20: Ficha de registro de datos de las CCM con Levadura *Rhodotorula mucilaginosa*.

Proyecto:		Aprovechamiento de agua ácida de relave minero como sustrato en celdas de combustible microbianas para la generación de energía eléctrica							
CCM con:		Levadura <i>Rhodotorula mucilaginosa</i>							
N.º	Fecha	Parámetros							
		Voltaje (v)		Corriente (A)		pH		Conductividad (mV)	
		1	2	1	2	1	2	1	2
1	18/10/2022	0.38	0.38	0.68	0.67	2.97	2.97	241.10	241.00
2	19/10/2022	0.45	0.50	0.88	0.78	3.07	3.01	241.10	241.00
3	20/10/2022	0.54	0.50	1.30	1.48	3.69	3.72	207.20	207.00
4	21/10/2022	0.54	0.53	1.50	1.53	3.96	3.98	193.30	193.10
5	22/10/2022	0.54	0.53	1.43	1.46	3.99	4.00	181.00	181.00
6	23/10/2022	0.54	0.53	0.89	0.87	4.30	4.45	170.50	175.60
7	24/10/2022	0.54	0.54	0.72	0.78	4.46	4.48	161.10	161.10
8	25/10/2022	0.54	0.54	0.72	0.78	4.78	4.77	159.00	158.90
9	26/10/2022	0.53	0.54	0.72	0.78	4.86	4.89	147.30	146.00
10	27/10/2022	0.51	0.54	0.71	0.78	4.91	4.95	143.20	142.80
11	28/10/2022	0.50	0.54	0.71	0.78	4.96	4.98	136.50	138.00
12	29/10/2022	0.50	0.53	0.68	0.74	5.05	5.07	124.90	125.10
13	30/10/2022	0.49	0.52	0.57	0.51	5.19	5.17	121.20	120.00
14	31/10/2022	0.48	0.50	0.46	0.51	5.20	5.18	118.00	118.60
15	1/11/2022	0.47	0.47	0.53	0.50	5.36	5.38	112.50	110.30
16	2/11/2022	0.46	0.47	0.47	0.47	5.51	5.44	110.00	109.60
17	3/11/2022	0.42	0.46	0.46	0.44	5.60	5.55	108.70	106.60
18	4/11/2022	0.42	0.46	0.44	0.40	5.68	5.59	99.30	96.60
19	5/11/2022	0.42	0.45	0.44	0.40	5.69	5.75	97.00	94.30

20	6/11/2022	0.42	0.40	0.43	0.39	5.73	5.77	94.90	92.00
21	7/11/2022	0.42	0.38	0.43	0.39	5.73	5.77	92.80	86.80
22	8/11/2022	0.40	0.37	0.40	0.39	5.76	5.82	91.20	89.50
23	9/11/2022	0.37	0.37	0.41	0.40	5.91	5.90	82.60	79.80
24	10/11/2022	0.35	0.37	0.41	0.40	5.93	5.95	80.60	82.00
25	11/11/2022	0.33	0.37	0.41	0.40	5.95	5.98	69.00	75.90
26	12/11/2022	0.33	0.37	0.41	0.40	6.07	6.07	76.00	75.40
27	13/11/2022	0.33	0.37	0.41	0.40	6.12	6.15	76.20	75.00
28	14/11/2022	0.33	0.36	0.40	0.40	6.16	6.17	77.70	74.60
29	15/11/2022	0.33	0.36	0.38	0.39	6.11	6.10	74.00	74.60
30	16/11/2022	0.33	0.36	0.38	0.38	6.06	6.06	73.40	73.80

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 21: Valores de voltaje de las CCMs con Levadura *Rhodotorula mucilaginosa*.

N.º	Fecha	Voltaje (v)		Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
		1	2	X	S	CV
1	18/10/2022	0.32	0.35	0.34	0.02	6%
2	19/10/2022	0.49	0.47	0.48	0.01	3%
3	20/10/2022	0.56	0.49	0.53	0.05	9%
4	21/10/2022	0.56	0.53	0.55	0.02	4%
5	22/10/2022	0.55	0.53	0.54	0.01	3%
6	23/10/2022	0.55	0.53	0.54	0.01	3%
7	24/10/2022	0.55	0.53	0.54	0.01	3%
8	25/10/2022	0.55	0.53	0.54	0.01	3%
9	26/10/2022	0.54	0.50	0.52	0.03	5%
10	27/10/2022	0.53	0.50	0.52	0.02	4%
11	28/10/2022	0.53	0.50	0.52	0.02	4%
12	29/10/2022	0.51	0.49	0.50	0.01	3%
13	30/10/2022	0.51	0.47	0.49	0.03	6%
14	31/10/2022	0.51	0.47	0.49	0.03	6%
15	1/11/2022	0.51	0.44	0.48	0.05	10%
16	2/11/2022	0.51	0.44	0.48	0.05	10%
17	3/11/2022	0.51	0.44	0.48	0.05	10%
18	4/11/2022	0.45	0.40	0.43	0.04	8%
19	5/11/2022	0.45	0.40	0.43	0.04	8%
20	6/11/2022	0.45	0.40	0.43	0.04	8%
21	7/11/2022	0.40	0.36	0.38	0.03	7%
22	8/11/2022	0.45	0.41	0.43	0.03	7%
23	9/11/2022	0.38	0.41	0.40	0.02	5%
24	10/11/2022	0.34	0.44	0.39	0.07	18%
25	11/11/2022	0.34	0.43	0.39	0.06	17%
26	12/11/2022	0.34	0.42	0.38	0.06	15%
27	13/11/2022	0.34	0.40	0.37	0.04	11%
28	14/11/2022	0.34	0.37	0.36	0.02	6%
29	15/11/2022	0.33	0.34	0.34	0.01	2%
30	16/11/2022	0.33	0.28	0.31	0.04	12%

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 22: Valores de corriente de las CCMs con Levadura *Rhodotorula mucilaginosa*.

N.º	Fecha	Corriente (A)		Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
		1	2	X	S	CV
1	18/10/2022	0.68	0.67	0.68	0.01	1%
2	19/10/2022	0.88	0.78	0.83	0.07	9%
3	20/10/2022	1.30	1.48	1.39	0.13	9%
4	21/10/2022	1.50	1.53	1.52	0.02	1%
5	22/10/2022	1.43	1.46	1.45	0.02	1%
6	23/10/2022	0.89	0.87	0.88	0.01	2%
7	24/10/2022	0.72	0.78	0.75	0.04	6%
8	25/10/2022	0.72	0.78	0.75	0.04	6%
9	26/10/2022	0.72	0.78	0.75	0.04	6%
10	27/10/2022	0.71	0.78	0.75	0.05	7%
11	28/10/2022	0.71	0.78	0.75	0.05	7%
12	29/10/2022	0.68	0.74	0.71	0.04	6%
13	30/10/2022	0.57	0.51	0.54	0.04	8%
14	31/10/2022	0.46	0.51	0.49	0.04	7%
15	1/11/2022	0.53	0.50	0.52	0.02	4%
16	2/11/2022	0.47	0.47	0.47	0.00	0%
17	3/11/2022	0.46	0.44	0.45	0.01	3%
18	4/11/2022	0.44	0.40	0.42	0.03	7%
19	5/11/2022	0.44	0.40	0.42	0.03	7%
20	6/11/2022	0.43	0.39	0.41	0.03	7%
21	7/11/2022	0.43	0.39	0.41	0.03	7%
22	8/11/2022	0.40	0.39	0.40	0.01	2%
23	9/11/2022	0.41	0.40	0.41	0.01	2%
24	10/11/2022	0.41	0.40	0.41	0.01	2%
25	11/11/2022	0.41	0.40	0.41	0.01	2%
26	12/11/2022	0.41	0.40	0.41	0.01	2%
27	13/11/2022	0.41	0.40	0.41	0.01	2%
28	14/11/2022	0.40	0.40	0.40	0.00	0%
29	15/11/2022	0.38	0.39	0.39	0.01	2%
30	16/11/2022	0.38	0.38	0.38	0.00	0%

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 23: Valores de pH de las CCMs con Levadura *Rhodotorula mucilaginosa*.

N.º	Fecha	pH		Promedio	Desviación estándar	Coeficiente de variación
		1	2			
1	18/10/2022	2.97	2.97	2.97	0.00	0%
2	19/10/2022	3.07	3.01	3.04	0.04	1%
3	20/10/2022	3.69	3.72	3.71	0.02	1%
4	21/10/2022	3.96	3.98	3.97	0.01	0%
5	22/10/2022	3.99	4.00	4.00	0.01	0%
6	23/10/2022	4.30	4.45	4.38	0.11	2%
7	24/10/2022	4.46	4.48	4.47	0.01	0%
8	25/10/2022	4.78	4.77	4.78	0.01	0%
9	26/10/2022	4.86	4.89	4.88	0.02	0%
10	27/10/2022	4.91	4.95	4.93	0.03	1%
11	28/10/2022	4.96	4.98	4.97	0.01	0%
12	29/10/2022	5.05	5.07	5.06	0.01	0%
13	30/10/2022	5.19	5.17	5.18	0.01	0%
14	31/10/2022	5.20	5.18	5.19	0.01	0%
15	1/11/2022	5.36	5.38	5.37	0.01	0%
16	2/11/2022	5.51	5.44	5.48	0.05	1%
17	3/11/2022	5.60	5.55	5.58	0.04	1%
18	4/11/2022	5.68	5.59	5.64	0.06	1%
19	5/11/2022	5.69	5.75	5.72	0.04	1%
20	6/11/2022	5.73	5.77	5.75	0.03	0%
21	7/11/2022	5.73	5.77	5.75	0.03	0%
22	8/11/2022	5.76	5.82	5.79	0.04	1%
23	9/11/2022	5.91	5.90	5.91	0.01	0%
24	10/11/2022	5.93	5.95	5.94	0.01	0%
25	11/11/2022	5.95	5.98	5.97	0.02	0%
26	12/11/2022	6.07	6.07	6.07	0.00	0%
27	13/11/2022	6.12	6.15	6.14	0.02	0%
28	14/11/2022	6.16	6.17	6.17	0.01	0%
29	15/11/2022	6.11	6.10	6.11	0.01	0%
30	16/11/2022	6.06	6.06	6.06	0.00	0%

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 23: Valores de conductividad de las CCMs con Levadura *Rhodotorula mucilaginosa*.

N.º	Fecha	Conductividad		Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
		1	2	X	S	CV
1	18/10/2022	241.10	241.00	241.05	0.07	0%
2	19/10/2022	241.10	241.00	241.05	0.07	0%
3	20/10/2022	207.20	207.00	207.10	0.14	0%
4	21/10/2022	193.30	193.10	193.20	0.14	0%
5	22/10/2022	181.00	181.00	181.00	0.00	0%
6	23/10/2022	170.50	175.60	173.05	3.61	2%
7	24/10/2022	161.10	161.10	161.10	0.00	0%
8	25/10/2022	159.00	158.90	158.95	0.07	0%
9	26/10/2022	147.30	146.00	146.65	0.92	1%
10	27/10/2022	143.20	142.80	143.00	0.28	0%
11	28/10/2022	136.50	138.00	137.25	1.06	1%
12	29/10/2022	124.90	125.10	125.00	0.14	0%
13	30/10/2022	121.20	120.00	120.60	0.85	1%
14	31/10/2022	118.00	118.60	118.30	0.42	0%
15	1/11/2022	112.50	110.30	111.40	1.56	1%
16	2/11/2022	110.00	109.60	109.80	0.28	0%
17	3/11/2022	108.70	106.60	107.65	1.48	1%
18	4/11/2022	99.30	96.60	97.95	1.91	2%
19	5/11/2022	97.00	94.30	95.65	1.91	2%
20	6/11/2022	94.90	92.00	93.45	2.05	2%
21	7/11/2022	92.80	86.80	89.80	4.24	5%
22	8/11/2022	91.20	89.50	90.35	1.20	1%
23	9/11/2022	82.60	79.80	81.20	1.98	2%
24	10/11/2022	80.60	82.00	81.30	0.99	1%
25	11/11/2022	69.00	75.90	72.45	4.88	7%
26	12/11/2022	76.00	75.40	75.70	0.42	1%
27	13/11/2022	76.20	75.00	75.60	0.85	1%
28	14/11/2022	77.70	74.60	76.15	2.19	3%
29	15/11/2022	74.00	74.60	74.30	0.42	1%
30	16/11/2022	73.40	73.80	73.60	0.28	0%

FUENTE: Elaboración propia.

Anexo 24

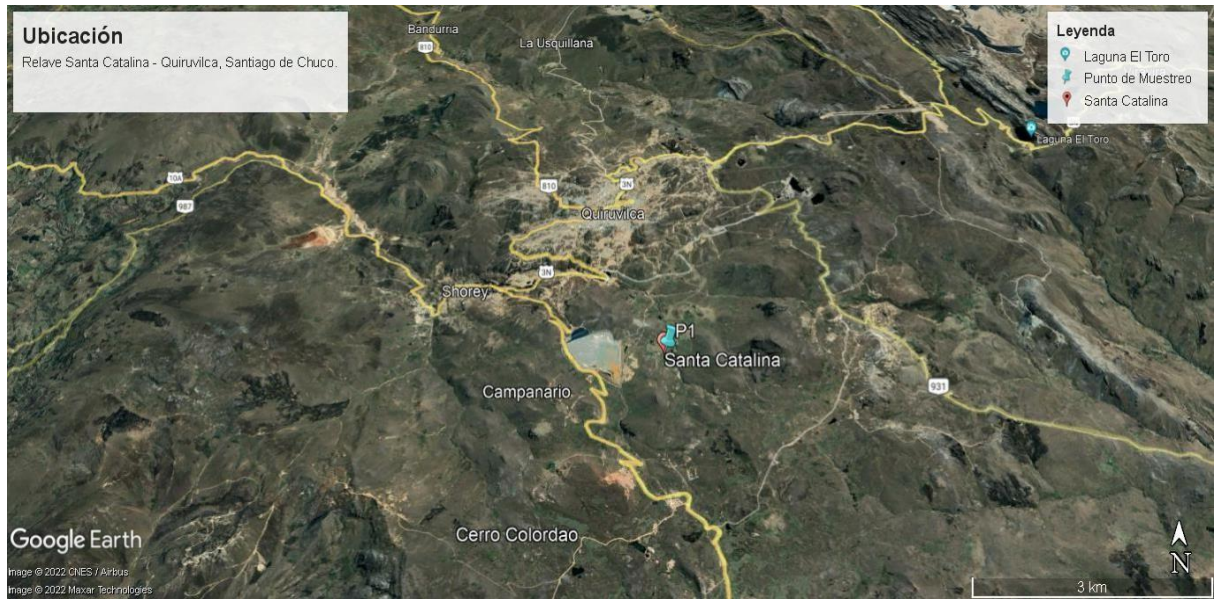


Figura a1: Ubicación de punto de muestreo.

Anexo 25



Figura a2: Toma de muestra en Relavera Santa Catalina.

Anexo 26

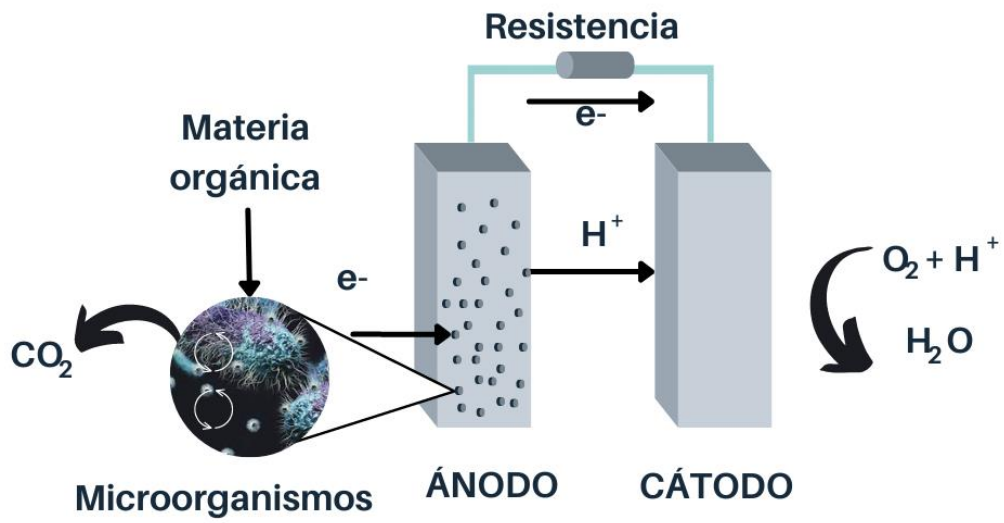


Figura a3: Funcionamiento de una celda de combustible microbiana.

Anexo 27

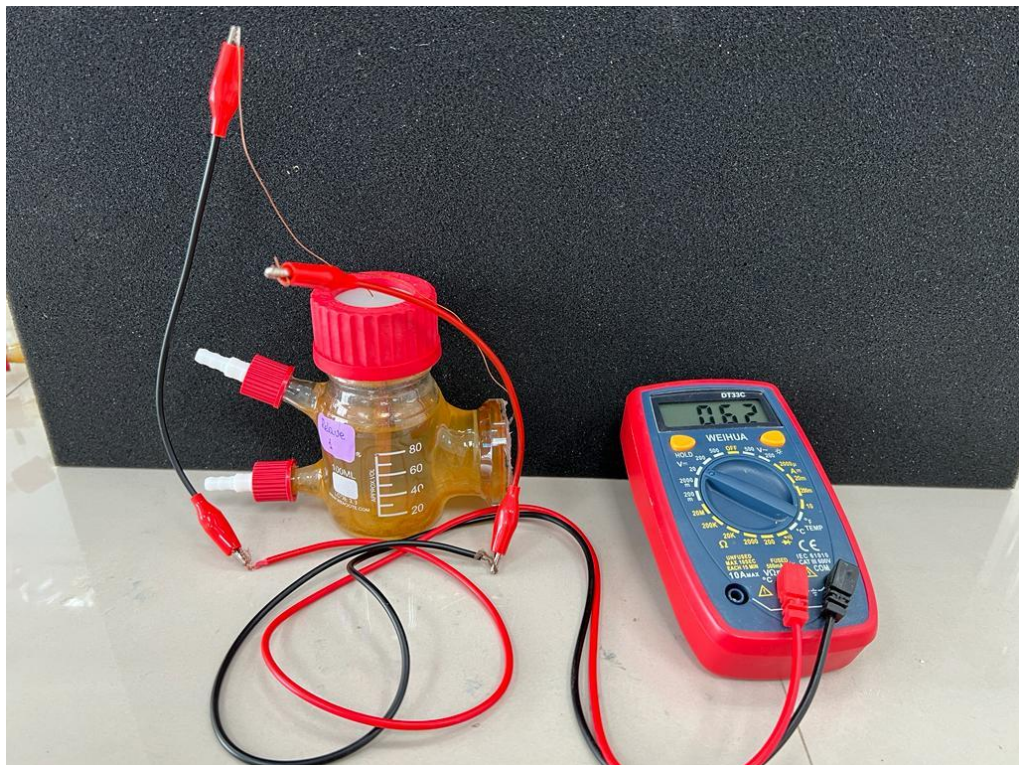


Figura a4: Celdas de combustible microbiana de una cámara alimentadas con agua ácida de relave minero.

Anexo 28

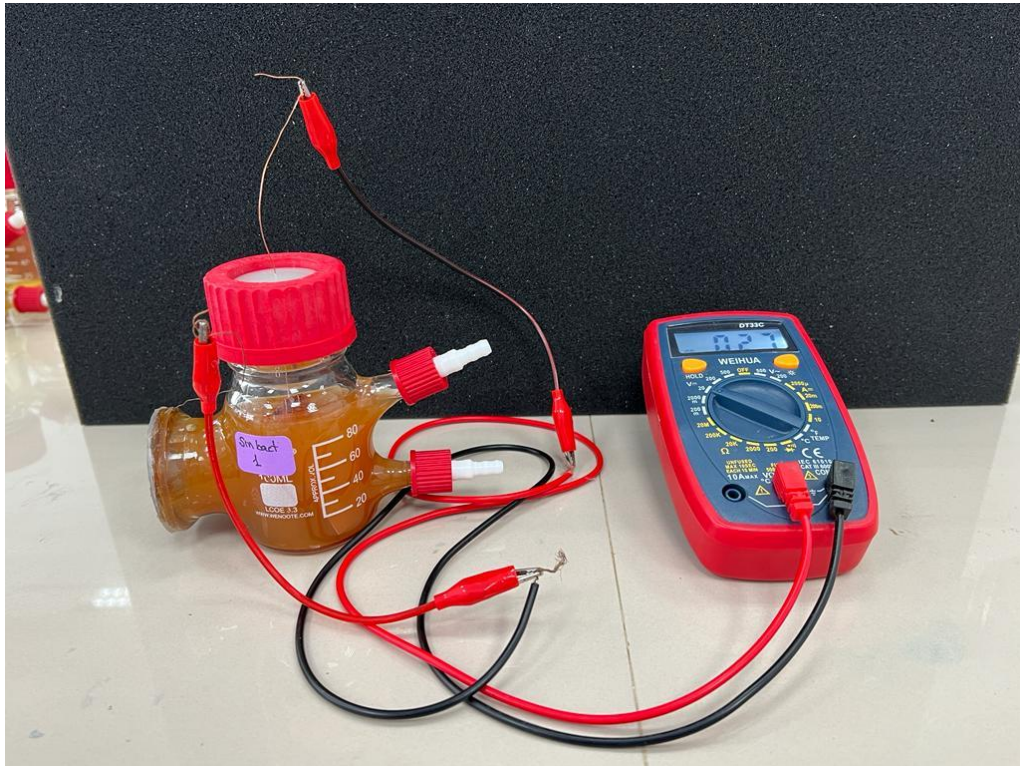


Figura a5: Celdas de combustible microbiana del blanco.

Anexo 29



Figura a6: CCMs alimentadas con medio mínimo de sales.

Anexo 30



Figura a7: Celda de combustible microbiana de una cámara inoculada con microorganismos.

Anexo 31



INFORME DE ENSAYO



Nº de Referencia: A-22/118546	Tipo Muestra: Agua de Lixiviación
Descripción(*): Relavera Santa Catalina - Shorey	Fecha Fin: 30/09/2022

RESULTADOS ANALITICOS				
Parámetro	Resultado	Unidades	Incert	CMA
Metales Totales				
Aluminio Total	23,3	mg/L	±3,026	
Antimonio Total	0,00842	mg/L	±0,001010	
Arsénico Total	0,58174	mg/L	±0,075627	
Bario Total	0,0770	mg/L	±0,0108	
Berilio Total	0,00178	mg/L	±0,000232	
Bismuto Total	0,00197	mg/L	±0,000355	
Boro Total	0,014	mg/L	±0,0027	
Cadmio Total	0,22564	mg/L	±0,029333	
Calcio Total	153	mg/L	±27,5	
Cerio Total	0,04148	mg/L	±0,003318	
Cobalto Total	0,12103	mg/L	±0,012103	
Cobre Total	2,463	mg/L	±0,27090	
Cromo Total	0,002	mg/L	±0,0003	
Estaño Total	< 0,00004	mg/L	-	
Estroncio Total	0,55233	mg/L	±0,093896	
Fósforo Total	0,775	mg/L	±0,1317	
Hierro Total	276,2	mg/L	±27,617	
Litio Total	0,0185	mg/L	±0,00093	
Magnesio Total	58,8	mg/L	±2,938	
Manganeso Total	54,954	mg/L	±7,14404	
Mercurio Total	0,000976	mg/L	±0,0001757	
Molibdeno Total	0,00058	mg/L	±0,000099	
Niquel Total	0,0241	mg/L	±0,00289	
Plata Total	< 0,00006	mg/L	-	
Plomo Total	0,18629	mg/L	±0,033531	
Potasio Total	1,3	mg/L	±0,175	
Selenio Total	0,00608	mg/L	±0,000852	
Sodio Total	5,1	mg/L	±0,764	
Talio Total	0,00045	mg/L	±0,000076	
Titanio Total	0,0217	mg/L	±0,00174	
Torio Total	0,00240	mg/L	±0,000335	
Uranio Total	0,00148	mg/L	±0,000251	
Vanadio Total	0,014	mg/L	±0,0016	
Wolframio Total	< 0,00002	mg/L	-	
Zinc Total	49,4	mg/L	±8,391	

Figura a8: Resultados de análisis de metales por medio de espectrofotometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo.

Anexo 32



LABORATORIO DE ENSAYO

Informe de ensayo N° 53-2022

Página 1 de 1

1. DATOS DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA

Solicitante : Universidad César Vallejo
Domicilio legal : AV. Victor Larco No. 1770 Urb. San Andrés -5ta Etapa, Victor Larco Trujillo LA LIBERTAD
RUC N° : 20164113532
Tipo de muestra : Cepas bacterianas viables.
Cantidad de muestra para el ensayo : 2 muestras.
Identificación de la muestra : 1, 2
Forma de presentación : Cepas bacterianas y levaduras en cultivo puro.
Fecha de recepción : 07/10/2022.
Fecha de inicio del ensayo : 07/10/2022.
Fecha de término del ensayo : 12/10/2022.
Fecha de entrega del informe de ensayo : 20/10/2022.
Ensayo realizado en : Área de Biología Molecular.
Código de registro : 1, 2
Validez del documento : Este documento es válido solo para la muestra descrita.
Referencia : UCVPO-0000209618

2. TIPO DE ANÁLISIS REQUERIDO

*Identificación molecular de cepas bacterianas mediante el gen 16S ARN y levaduras mediante región ITS: Método de secuenciación Sanger.

3. RESULTADO DEL ANÁLISIS

Código	Identificación de la muestra	Especie identificada	pb	BLAST	
				Identidad (%)	Número de accesoión
1	1	<i>Serratia fonticola</i>	1387	99.57%	NR_025339.1
2	2	<i>Rhodotorula mucilaginosa</i>	611	99.50%	NR_073296.1

BIOLOGO. HANTONY MARTELLO (PUN)
GERENTE GENERAL
ECOBIOLOGIA Y TECNOLOGIA LABORATORIO S.A.C

Ecobiotechnology Laboratorio S.A.C. Dirección en Urb. San Judas Tadeo Mz. Ch Lt. 2 - Trujillo - La Libertad (Entre Av. Colibrí y Antenor Orrego, al costado del Hostal Coliseo). Celular 978729233. Correo electrónico ecobiotechnologylab@gmail.com

Figura a9: Resultados de identificación de microorganismos por medio de identificación molecular.



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, QUEZADA ALVAREZ MEDARDO ALBERTO, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, asesor de Tesis titulada: "Aprovechamiento de agua ácida de relave minero como sustrato en celdas de combustible microbianas para la generación de energía eléctrica", cuyos autores son SALVADOR SALINAS ANGIE VANESSA, SILVA PALACIOS FERNANDA ANAIS, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 15.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

TRUJILLO, 21 de Noviembre del 2022

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
QUEZADA ALVAREZ MEDARDO ALBERTO DNI: 18110481 ORCID: 0000000202155175	Firmado electrónicamente por: MAQUEZADAA el 20- 12-2022 20:02:05

Código documento Trilce: TRI - 0449072