

## Influencia del almidón de cáscara de plátano en bioceldas galvánicas para generación energética

### Influence of banana peel starch on galvanic biocells for energy generation

Mary Luz Apaza Zamata <sup>1</sup> • Williams Sergio Almanza Quispe <sup>2</sup> ✉

Recibido: 15 de enero 2026 / Revisado: 22 de abril 2026 / Aceptado: 30 de abril 2026 / Publicado: 16 de junio 2026

#### Resumen

La investigación tuvo como objetivo general evaluar el potencial electroquímico del almidón extraído de la cáscara de plátano como electrolito en una biocelda galvánica para generación energética. La metodología se desarrolló en tres etapas: (1) recolección, secado y trituración de cáscaras de plátano provenientes de juguerías locales; (2) extracción del almidón mediante técnicas de maceración, filtración y decantación, garantizando la obtención de un sustrato homogéneo; y (3) construcción de una biocelda galvánica utilizando electrodos de zinc y cobre, donde se evaluó el comportamiento electroquímico del almidón mediante la medición de voltaje, corriente y estabilidad temporal del sistema. Las mediciones fueron registradas durante intervalos controlados para determinar diferencias significativas. Los resultados demostraron que el almidón de cáscara de plátano actuó como electrolito viable, generando valores de voltaje promedio superior a 0,7 V por celda y corrientes estables en miliamperios. La biocelda mostró una respuesta electroquímica consistente durante el periodo de prueba, destacando que mayores concentraciones de almidón incrementaron la conductividad iónica y, por tanto, la eficiencia del sistema. Asimismo, se evidenció que la variación del pH y el contenido de sólidos influyeron directamente en la estabilidad de la generación eléctrica. Aunque la potencia obtenida no es suficiente para aplicaciones de gran escala, resulta adecuada para fines experimentales, educativos y para el diseño de prototipos autosostenibles de baja demanda energética. Se concluye que el almidón de cáscara de plátano presenta un potencial significativo como electrolito natural en bioceldas galvánicas, ofreciendo una alternativa sostenible para el aprovechamiento energético de residuos agroindustriales.

---

Mary Luz Apaza Zamata / maryluz\_AZ@hotmail.com  
<https://orcid.org/0000-0001-9166-0239>

✉ Williams Sergio Almanza Quispe / walmanzaq@unjbg.edu.pe  
<https://orcid.org/0000-0003-0812-7834>

<sup>1</sup> Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental  
Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann Tacna - Perú

<sup>2</sup> Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica  
Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann Tacna - Perú

**Palabras clave:** bioelectricidad, sistema electroquímico, electrolito natural, residuos orgánicos

#### Abstract

The general objective of this research was to evaluate the electrochemical potential of starch extracted from banana peels as an electrolyte

in a galvanic biocell for energy generation. The methodology was developed in three stages: (1) collection, drying, and crushing of banana peels from local juice bars; (2) starch extraction using maceration, filtration, and decantation techniques, ensuring a homogeneous substrate; and (3) construction of a galvanic biocell using zinc and copper electrodes, where the electrochemical behavior of the starch was evaluated by measuring voltage, current, and the temporal stability of the system. Measurements were recorded at controlled intervals to determine significant differences. The results demonstrated that banana peel starch acted as a viable electrolyte, generating average voltage values above 0.7 V per cell and stable currents in milliamperes. The biocell showed a consistent electrochemical response during the testing period, with higher starch concentrations increasing ionic conductivity and, therefore, the system efficiency. Furthermore, it was observed that variations in pH and solids content directly influenced the stability of electricity generation. Although the power output was not sufficient for large-scale applications, it was adequate for experimental and educational purposes, as well as for the design of self-sustaining, low-energy-demand prototypes. These findings suggest that banana peel starch has significant potential as a natural electrolyte in galvanic biocells, offering a sustainable alternative for the energy recovery of agro-industrial waste.

Keywords: bioelectricity, electrochemical system, natural electrolyte, organic waste

## Introducción

La demanda creciente de energía eléctrica a nivel global, junto con la preocupación por el cambio climático y la contaminación ambiental, impulsa la búsqueda de fuentes alternativas de energía renovable. En este contexto, la valorización energética de residuos orgánicos se perfila como

una estrategia sostenible doblemente beneficiosa: reduce el volumen de desechos y aporta nueva energía limpia. Según estadísticas internacionales, los residuos agrícolas podrían llegar a satisfacer aproximadamente entre el 3 y el 14 % de la demanda energética mundial, lo que evidencia el considerable potencial energético que yace en la biomasa residual.

La generación masiva de residuos orgánicos es otro desafío ambiental: se estima que miles de toneladas de restos vegetales y desechos alimenticios terminan en vertederos cada año, disminuyendo la vida útil de estos rellenos y generando efectos negativos en el medio ambiente, (García & Gómez 2022). Frente a esta problemática, han surgido tecnologías bioelectroquímicas innovadoras como las bioceldas galvánicas (o celdas de combustible microbianas, CCM) que aprovechan la materia orgánica para producir electricidad de forma simultánea a su degradación, Bolson et al. (2022). En una biocelda, microorganismos especializados oxidan compuestos orgánicos en el ánodo y transfieren electrones a un circuito externo, generando corriente eléctrica mientras el cátodo reduce un oxidante (usualmente oxígeno). Este proceso permite valorizar residuos convirtiendo su energía química en energía eléctrica útil, Sánchez et al. (2021), a la vez que se remueven contaminantes del medio. En un estudio con agua residual industrial se logró remover el 77% de la demanda química de oxígeno (DQO) en 43 horas mientras se generaba electricidad en la biocelda, demostrando el doble beneficio de estos sistemas.

Diversas investigaciones respaldan la viabilidad de generar bioelectricidad a partir de residuos orgánicos mediante bioceldas. Baltazar (2013), por ejemplo, demostró la producción de electricidad utilizando aguas residuales domiciliarias como sustrato en celdas microbianas de una y dos cámaras, alcanzando voltajes de circuito abierto cercanos a 1,0 V. Bajo condiciones optimizadas de temperatura (35 °C) y pH controlado, se han reportado densidades de potencia del orden de

640 mW/m<sup>2</sup> con voltajes alrededor de 1 V en celdas de laboratorio, lo que resalta el potencial de estas tecnologías. Incluso con residuos vegetales de descarte se obtienen resultados prometedores: una biocelda alimentada con cáscaras de papa generó un voltaje máximo de 0,80 V y una potencia de 0,08 W en pruebas experimentales. De modo similar, la cáscara de plátano ha sido evaluada como sustrato eficaz en celdas bioelectroquímicas; Yoshimura et al. informaron la generación de 237 mV de voltaje y 23,75 mW/m<sup>2</sup> de densidad de potencia empleando cáscara de banano como combustible biodegradable. Asimismo, Castillo et al. (2021), diseñaron una planta de biogás que utiliza cachaza como sustrato, lo que le da un valor agregado a un residuo poco valorado.

Tales antecedentes indican que los desechos agroindustriales pueden convertirse en fuentes de energía eléctrica a pequeña escala, con miras a optimizar su rendimiento a futuro.

El plátano (*Musa paradisiaca*) es un cultivo de gran importancia mundial, con más de 76 millones de toneladas producidas anualmente. Solo una fracción (20 – 30 %) de la biomasa del racimo de plátano corresponde a la porción comestible; el restante 70 – 80% son residuos agrícolas, entre ellos la cáscara, el pseudotallo y otros subproductos. La cáscara de plátano se compone de amilosa y amilopectina, que tienen unidades de glucosa unidas a  $\alpha$ -1,4 y  $\alpha$ -1,6 (Apriyanto et al., 2022), y representa aproximadamente el 35 – 40 % del peso del fruto, constituyéndose en un residuo orgánico abundante (Kumari et al., 2023; Yasin et al., 2025; Zou et al., 2022). Este subproducto tiene un alto contenido de polisacáridos como el almidón, y ha sido identificado como materia prima potencial para diversos usos industriales (por ejemplo, producción de biopolímeros, alimentación animal, fertilizantes e incluso extracción de almidón). No obstante, la disposición inadecuada de las cantidades de cáscaras generadas plantea problemas ambientales, ya que a menudo terminan en vertederos o cuerpos de agua, propiciando malos

olores, proliferación de vectores y contaminación del suelo y del agua.

Dada la alta disponibilidad de cáscaras de plátano y su contenido aprovechable de almidón, resulta pertinente evaluar su aplicación en sistemas de bioceldas para generación eléctrica. La utilización del almidón extraído de cáscara de plátano en una biocelda galvánica podría ofrecer una vía de valorización energética para este residuo, contribuyendo tanto a la producción de energía renovable como a la mitigación del impacto ambiental de los desechos orgánicos. Estudios recientes sugieren que, a escala mayor, los residuos de la agroindustria bananera tienen un enorme potencial energético; por ejemplo, en México se estimó que el aprovechamiento de los desechos de banano mediante tecnologías bioelectroquímicas (digestión anaerobia acoplada a celdas microbianas) podría generar del orden de  $4,15 \times 10^7$  kWh al año, suficiente para abastecer unas 13 mil viviendas. Si bien a nivel de laboratorio las bioceldas producen potencias modestas, estas cifras ilustran la viabilidad a largo plazo de escalar el aprovechamiento de residuos como la cáscara de plátano para contribuir a una matriz energética más sostenible. En este marco, el presente estudio se enfoca en evaluar el uso del almidón de cáscara de plátano en bioceldas galvánicas, analizando su rendimiento electroquímico y las implicancias ambientales de su implementación; además, se centra en evaluar el uso del almidón extraído de la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) como componente del sistema electrolítico en una biocelda galvánica para la generación de energía eléctrica, bajo condiciones controladas de laboratorio. El objetivo fue analizar el desempeño eléctrico del sistema en función de la energía generada y del tiempo de operación, considerando además la caracterización fisicoquímica del residuo orgánico y la determinación de una dosis óptima de almidón. Este enfoque experimental permitió valorar la viabilidad técnica del uso de residuos agroindustriales como insumo energético,

promoviendo así alternativas sostenibles, viables y replicables.

## Material y métodos

### Área de estudio

Se recolectaron 10 kilogramos de cáscaras de plátano obtenidas del mercado mayorista Miguel Grau ubicado en la ciudad de Tacna, a partir de las cuales se extrajo el almidón de cáscara de plátano.

### Extracción y análisis de las características fisicoquímicas de la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) y su contenido de almidón

Para la extracción del almidón de la cáscara de plátano por vía seca, se siguió la metodología adaptada de Correa et al. (2017), la cual consistió en el lavado, trituración, filtración y decantación del material vegetal. La cáscara fue previamente seleccionada, lavada y secada a temperatura ambiente antes de ser sometida al procesamiento para la obtención del almidón.

Posteriormente, se realizaron análisis fisicoquímicos tanto a la cáscara como al almidón extraído, aplicando procedimientos estandarizados de acuerdo con los métodos oficiales de la AOAC (Association of Official Analytical Chemists, 1997). Las determinaciones incluyeron:

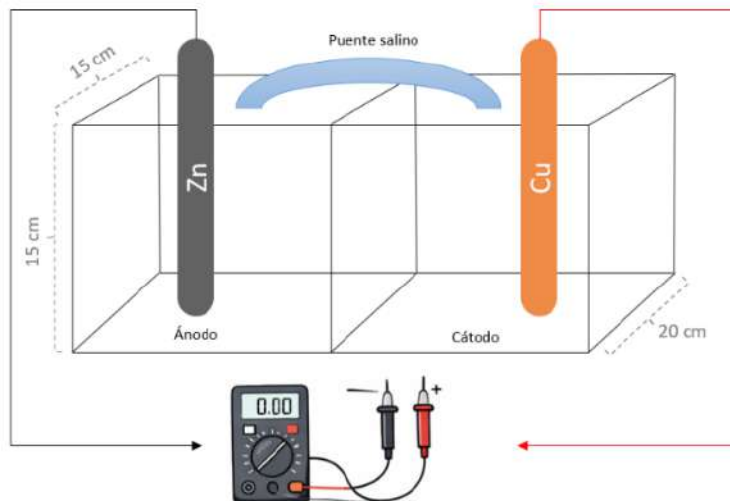
- Determinación de humedad mediante secado en estufa, según el método AOAC 925.09.
- Determinación de cenizas totales por incineración en mufla a 550 °C, siguiendo el método AOAC 923.03.
- Determinación del pH mediante medición directa con potenciómetro (pHmetro calibrado).
- Determinación de la temperatura de gelatinización del almidón mediante observación visual en baño térmico controlado, según el método descrito por Grace (1977).

### Determinación de la dosis y las condiciones operativas óptimas del sistema de biocelda galvánica para la generación de energía eléctrica a partir de almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*)

Se prepararon soluciones electrolíticas para cada semicelda utilizando distintas concentraciones de almidón de cáscara de plátano disuelto previamente en agua destilada a temperatura controlada (70–80 °C). Las concentraciones evaluadas fueron de 10 g/L a 20 g/L, a fin de determinar la dosis óptima para maximizar la generación eléctrica.

Las bioceldas fueron construidas en configuración de doble cámara: ánodo y cátodo separadas por un puente salino. El sistema se acondicionó colocando el almidón como electrolito en la cámara anódica y agua de mar como electrolito en la cámara catódica. En cada tratamiento se evaluó la influencia de dos factores adicionales: la presencia o ausencia de catalizador de carbono activado y el nivel de oxigenación en el cátodo (con y sin burbujeo de aire), siguiendo criterios de eficiencia electroquímica propuestos en investigaciones previas (Picioareanu et al., 2010).

**Figura 1. Esquema de montaje del sistema de bioceldas galvánicas**



Para fabricar el puente salino o membrana de intercambio protónico, se disolvieron 75 gramos de cloruro de sodio (NaCl) en 1 litro de agua destilada y se añadieron 100 gramos de gelatina sin azúcar como agente gelificante. La mezcla se calentó durante 15 minutos con agitación constante hasta homogeneizarse y luego se vertió en tubos de PVC de 0,5 pulgadas, donde se dejó solidificar a temperatura ambiente (Segura et al., 2022).

Se emplearon pares de electrodos metálicos (cobre) de igual superficie (5 cm<sup>2</sup>), conectados en serie mediante cables conductores y aislados en las uniones para evitar interferencias externas (Nabi et al., 2026). El montaje de las bioceldas se realizó en condiciones de laboratorio, registrando temperatura ambiente (-25 °C) y presión barométrica constante (Yang et al., 2022).

Una vez iniciado el ensayo, se midió la corriente eléctrica generada utilizando un multímetro digital modelo UNI-T UT33D, y se calculó la densidad de corriente (mA/cm<sup>2</sup>) a partir de los valores registrados y el área efectiva de los electrodos, según la ecuación:

$$J = \frac{I}{A}$$

donde J es la densidad de corriente (mA/cm<sup>2</sup>), I la corriente medida (mA) y A el área del electrodo (cm<sup>2</sup>).

**Evaluación del desempeño eléctrico de una biocelda galvánica en función de la energía generada y del tiempo de operación empleando el almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*)**

Una vez configurado el sistema de bioceldas con las condiciones seleccionadas (concentración de almidón, uso de catalizador y nivel de oxigenación), se procedió a realizar el monitoreo eléctrico durante un periodo continuo de 24 horas. Se realizaron lecturas de voltaje (V) y corriente (I) cada hora utilizando el multímetro digital para establecer la evolución del sistema en el tiempo. Además, se calculó la energía total generada (en milivatios-hora, mWh) integrando el área bajo la curva de potencia respecto al tiempo mediante el método trapezoidal. El objetivo fue identificar el perfil de desempeño eléctrico del sistema, su estabilidad operativa y el punto de decaimiento energético.

**Diseño experimental**

Se empleó un experimento factorial que constó de tres criterios de clasificación con dos niveles cada uno. En la tabla 1 se muestran los factores considerados, sus respectivas unidades de medida y los niveles establecidos para el análisis

experimental.

**Tabla 1. Niveles de parámetros de control**

<i>Parámetro de control</i>	<i>Niveles</i>	
<i>Factor A: Dosis de almidón</i>	- 10 g/L	- 20 g/L
<i>Factor B: Catalizador</i>	- Con carbón	- Sin carbón
<i>Factor C: Oxigenación</i>	- Con oxigenación	- Sin oxigenación

### **Análisis estadístico**

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA), seguido de la prueba de comparación múltiple de Tukey, considerando un nivel de significancia de  $p < 0,05$ , con el fin de identificar diferencias significativas entre tratamientos. El procesamiento estadístico se realizó utilizando el software RStudio.

### **Resultados**

En la tabla 2 se muestran los análisis fisicoquímicos realizados en muestras representativas de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) y del almidón extraído, a fin de caracterizar sus propiedades y determinar su idoneidad. Para cada parámetro se calculó el promedio, la desviación estándar y se aplicó una prueba t de Student para una muestra, comparando los valores obtenidos con referencias bibliográficas.

**Tabla 2. Características fisicoquímicas de la cáscara de plátano y el almidón**

<i>Parámetro</i>	<i>Promedio</i>	<i>Valor teórico</i>	<i>T calculado</i>	<i>P valor</i>
<i>Contenido de almidón (%)</i>	7,1 ± 1,4	7	0,2258	0,8263
<i>Humedad (%)</i>	78,4 ± 2,1	75	5,1198	0,0000
<i>Cenizas (%)</i>	8,2 ± 0,9	7,5	2,4595	0,0361
<i>pH</i>	6,31 ± 0,3	5,5	1,054	0,3193
<i>Gelatinización (°C)</i>	69,2 ± 1,8	70	-1,4054	0,1934

La prueba t de Student permitió determinar si las diferencias entre los promedios experimentales y los valores teóricos obtenidos de Correa et al. (2017), Umoh (2024) y Bishnoi et al. (2023) eran estadísticamente significativas ( $\alpha = 0,05$ ). Se encontró que el contenido de almidón (7,1 %)

no presentó diferencia significativa respecto al valor teórico. La humedad (78,4 %) fue significativamente mayor ( $p < 0,001$ ), posiblemente asociado con la etapa fisiológica del fruto y al tiempo de almacenamiento previo. Las cenizas (8,2 %) también mostraron diferencia significativa,

lo que indica una mayor presencia de compuestos minerales. El pH y la temperatura de gelatinización no presentaron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ).

Se evaluó el efecto de tres factores sobre el desempeño eléctrico de la biocelda galvánica: la dosis de almidón (10 y 20 g/L), el uso de catalizador de carbón activado con y sin adición, y la condición de oxigenación con y sin burbujeo. El diseño experimental correspondió a un arreglo factorial  $2 \times 2 \times 2$  con tres repeticiones por tratamiento. Las variables de respuesta analizadas fueron el voltaje

máximo (V) y la densidad de corriente ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ).

En la Tabla 3 se muestran los valores promedio obtenidos para cada tratamiento. El tratamiento que combinó 20 g/L de almidón, catalizador y oxigenación (T8) presentó el mayor voltaje promedio (0,435 V) y la mayor densidad de corriente ( $1,345 \text{ mA}/\text{cm}^2$ ), superando significativamente a los tratamientos sin catalizador o sin oxigenación. En contraste, el tratamiento con 10 g/L sin catalizador ni oxigenación (T1) mostró el menor desempeño eléctrico (0,243 V y  $0,791 \text{ mA}/\text{cm}^2$ ).

**Tabla 3. Resultados de generación de electricidad**

Tratamiento	Dosis (g/L)	Catalizador	Oxigenación	Repetición	Voltaje máximo (V)	Densidad de corriente ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )
1	10	Sin	Sin	1	0.255	0.797
	10	Sin	Sin	2	0.256	0.83
	10	Sin	Sin	3	0.248	0.795
2	10	Sin	Con	1	0.296	0.915
	10	Sin	Con	2	0.275	0.911
	10	Sin	Con	3	0.275	0.891
3	10	Con	Sin	1	0.302	0.912
	10	Con	Sin	2	0.283	0.939
	10	Con	Sin	3	0.29	0.956
4	10	Con	Con	1	0.321	1.022
	10	Con	Con	2	0.345	1.045
	10	Con	Con	3	0.331	1.022
5	20	Sin	Sin	1	0.345	1.102
	20	Sin	Sin	2	0.338	1.108
	20	Sin	Sin	3	0.344	1.094
6	20	Sin	Con	1	0.374	1.237
	20	Sin	Con	2	0.38	1.179
	20	Sin	Con	3	0.388	1.176

	20	Con	Sin	1	0.402	1.211
7	20	Con	Sin	2	0.387	1.254
	20	Con	Sin	3	0.407	1.253
	20	Con	Con	1	0.429	1.344
8	20	Con	Con	2	0.415	1.336
	20	Con	Con	3	0.425	1.371

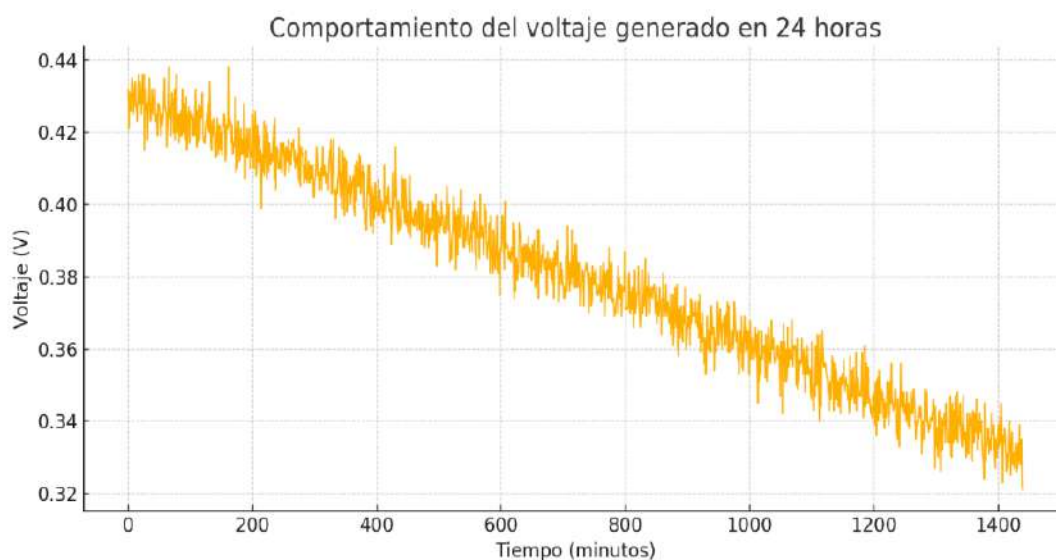
Estos resultados evidencian un efecto sinérgico entre los tres factores. El aumento de la dosis incrementó la disponibilidad de materia orgánica, mientras que el catalizador y la oxigenación favorecieron la transferencia electrónica y la actividad redox en el cátodo, respectivamente.

Asimismo, se monitoreó el comportamiento eléctrico de una biocelda galvánica durante 24 horas continuas, utilizando como insumo una dosis de 20 g/L de almidón de cáscara de plátano, en condiciones óptimas previamente determinadas: con adición de catalizador (carbón activado) y oxigenación forzada. La variable de respuesta

analizada fue el voltaje, medido cada minuto mediante un multímetro digital.

En la Figura 2 se observa la curva de voltaje a lo largo del tiempo. Durante las primeras 8 horas, el voltaje se mantuvo estable en torno a 0,43 V, y posteriormente presentó una disminución gradual. A partir de la hora 10, se identificó una leve caída sostenida hasta alcanzar un valor final de aproximadamente 0,33 V al cabo de 24 horas. Este comportamiento es característico en sistemas de bioceldas, donde la actividad y el consumo del sustrato disminuyen con el tiempo.

**Figura 2. Comportamiento del voltaje generado en 24 horas**



## Discusión

El almidón es un polisacárido que representa una fuente potencial de energía química en sistemas bioelectroquímicos. Estudios como los de Correa et al. (2017) y Umoh (2024) han mostrado que la cáscara de plátano contiene almidón en proporciones variables (5–10 %), dependiendo de la variedad, madurez y condiciones de extracción. La caracterización fisicoquímica permite determinar la viabilidad de este subproducto como insumo en bioceldas, ya que propiedades como el pH, la presencia de cenizas o la temperatura de gelatinización influyen en la conductividad y estabilidad del medio electrolítico.

Según investigaciones, el rendimiento promedio de almidón de cáscara de plátano fue del 10 al 12 %, los gránulos tenían una forma irregular y el tamaño variaba de 10 a 50  $\mu\text{m}$ . La composición química promedio (% de materia seca) del almidón fue la siguiente: grasa bruta 0,09; fibra bruta 0,26; ceniza 0,02 y azúcar total 0,03 (como azúcar no reductor), similar a la obtenida por Hikal et al. (2022). Excluyendo el contenido de fibra cruda, todas estas características fueron menores que las del almidón de maíz comercial. El pH de ambos almidones osciló entre 5,6 y 6,7, mientras que los contenidos de acidez fueron de 0,010 y 0,012 para el almidón de maíz y plátano, respectivamente.

Los resultados experimentales confirmaron que tanto la dosis de almidón como las condiciones operativas de la biocelda influyen significativamente en el desempeño del sistema. Diversos estudios coinciden en que una mayor concentración de sustrato (fuente de carbono) favorece la actividad electrogénica hasta cierto umbral, como lo demostró Chicaiza et al. (2021) en sistemas con almidón y residuos vegetales.

La inclusión de carbón activado como catalizador en la cámara catódica mejoró notablemente el voltaje y la densidad de corriente. Este efecto ha sido ampliamente documentado, ya

que el carbón aumenta el área superficial y mejora la cinética de reducción de oxígeno.

Del mismo modo, la oxigenación forzada permitió un aumento de la eficiencia del cátodo, al evitar la limitación de oxígeno disuelto que es común en sistemas estáticos. Esto coincide con lo reportado por Leropoulos et al. (2010), quienes demostraron mejoras de hasta 30 % en la potencia generada en bioceldas con aireación controlada.

El tratamiento óptimo identificado (20 g/L + catalizador + oxigenación) no solo mostró los valores más altos, sino también la menor variabilidad entre repeticiones, lo cual sugiere una mayor estabilidad operativa del sistema.

El efecto favorable de la dosis de 20 g/L sugiere que, en las condiciones de esta investigación, una mayor concentración de almidón mejoró el comportamiento del medio electrolítico, probablemente al favorecer una matriz más continua y con mayor disponibilidad de especies iónicas móviles. Esta interpretación es coherente con lo descrito para materiales amiláceos y electrolitos poliméricos de base natural, en los que el almidón puede actuar como una matriz funcional capaz de retener agua (Ma et al., 2022; Chiaoprakobkij et al., 2024; Xie, 2024), facilitar interacciones iónicas y contribuir al transporte de carga cuando su formulación y estado físico son adecuados (Chen et al., 2023; Rehman et al., 2025).

El perfil observado sugiere que el sistema presentó una fase inicial de alto rendimiento, denominada fase de estabilización, seguida de una fase de decrecimiento energético atribuible al consumo progresivo del sustrato disponible y a la posible acumulación de metabolitos inhibitorios. A pesar de esta disminución, el sistema mantuvo voltajes funcionales durante todo el periodo, lo cual demuestra su viabilidad para aplicaciones de baja demanda energética o intermitentes.

Comparativamente, estudios similares han reportado curvas de comportamiento análogas en sistemas microbianos y galvánicos que

emplean sustratos orgánicos como biomasa vegetal o almidones. En particular, se observó una disminución del 20 % al 30 % del voltaje en bioceldas operadas por más de 20 horas, resultado consistente con la caída del 23 % reportada en esta investigación.

## Conclusiones

Se concluye que el uso del almidón de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) permitió generar energía eléctrica en bioceldas galvánicas bajo condiciones controladas de laboratorio. Su influencia se evidenció tanto en la respuesta eléctrica inicial como en el desempeño temporal del sistema, siendo más favorable cuando se empleó una dosis de 20 g/L, carbón activado como catalizador y oxigenación del cátodo. En consecuencia, el almidón de cáscara de plátano constituye una materia prima viable para aplicaciones experimentales de generación electroquímica de baja potencia y representa una alternativa de valorización de residuos orgánicos con interés científico y tecnológico.

La caracterización fisicoquímica confirmó que la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) utilizada en la investigación presentó condiciones adecuadas para su aprovechamiento experimental como fuente de almidón. Se determinó un contenido de almidón de  $7,1 \pm 1,4$  % en base húmeda, además de una humedad de  $78,4 \pm 2,1$  %, cenizas de  $8,2 \pm 0,9$  %, pH del almidón extraído de  $6,31 \pm 0,3$  y temperatura de gelatinización de  $69,2 \pm 1,8$  °C. En conjunto, estos resultados evidencian que la biomasa evaluada posee una fracción amilácea aprovechable y propiedades fisicoquímicas compatibles con su empleo en sistemas bioelectroquímicos de baja escala.

La dosis de almidón, la presencia de carbón activado y la oxigenación del cátodo influyeron significativamente en el comportamiento eléctrico de la biocelda galvánica. El tratamiento T8 (20 g/L

de almidón, con catalizador y con oxigenación) presentó el mejor desempeño global, al alcanzar el mayor voltaje máximo promedio (0,435 V) y la mayor densidad de corriente (1,345 mA/cm<sup>2</sup>). Por tanto, se determinó que la combinación de mayor dosis de almidón con catalizador y oxigenación constituye la condición operativa más favorable dentro del intervalo experimental evaluado.

Si bien la potencia generada aún no es suficiente para aplicaciones a gran escala, los resultados demuestran que este sistema es viable para usos experimentales y educativos, así como para el desarrollo de prototipos autosostenibles de baja demanda energética.

Por tanto, estos hallazgos constituyen una base importante para futuras investigaciones, orientadas a optimizar la producción de energía y a comprender mejor el comportamiento electroquímico del sistema, lo que permitiría mejorar su eficiencia y ampliar sus posibles aplicaciones.

## Agradecimientos

A Dios por permitirme ser parte de este mundo, disfrutar del privilegio de la vida, y por hacerme entender que a pesar de las adversidades siempre existe un nuevo día para volver a empezar.

A mi asesor quien, gracias a su respaldo, su experiencia, profesionalismo, críticas y recomendaciones, supieron guiar de la mejor manera la elaboración y desarrollo de mi investigación.

A mi madre, Rosa Zamata Vilca, por su esfuerzo y su inmenso sacrificio, por ser el principal motor que me impulsa a salir adelante.

A mis hermanos, en especial a Eva, por estar siempre a mi lado, por ser mi compañera de juegos y por su incondicional apoyo.

## Bibliografía

AOAC (1997) Association of Official Analytical Chemists International Official Methods of Analysis. 16th Edition, AOAC, Arlington.

Apriyanto, A., Compart, J., & Fettke, J. (2022). A review of starch, a unique biopolymer – Structure, metabolism and in planta modifications. *Plant Science*, 318, 111223. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111223>

Bishnoi, S., Sharma, S., & Agrawal, H. (2023). Exploration of the potential application of banana peel for its effective valorization: A review. *Indian Journal of Microbiology*, 63(4), 398–409. <https://doi.org/10.1007/s12088-023-01100-w>

Bolson, N., Prieto, P., & Patzek, T. (2022). Factores de capacidad para la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables y no renovables. *Proc Natl Acad Sci EE.UU A*. <https://doi.org/10.1073/pnas.2205429119>

Castillo Alvarez, Y., Monteagudo Yanes, J. P., Jiménez Borges, R., & Patiño Vidal, C. D. (2021). Propuesta de diseño de un biodigestor industrial de cachaza para la generación de energía eléctrica. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(5), 74-80.

Chen, L., Wang, J., Huang, J., Tu, T., y Li, L. (2023). Cost-trivial material contributes greatly: A review of the application of starch in energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, 73, 109060. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X23024581>

Chiaoprakobkij, N., Okhawilai, M., Kasemsiri, P., & Uyama, H. (2024). Biopolymer electrolyte from banana powder-konjac glucomannan for zinc-ion batteries. *International Journal of Biological Macromolecules*, 273(Part 2), 133204. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133204>

Chicaiza Ortiz, C., Salazar García, K., Diéguez Santana, K., Chicaiza Ortiz, Á., Navarrete Villa, V., & Zhang, J. (2021). Aplicaciones de los catalizadores y su evaluación a través de análisis de ciclo de vida. *Revista Ciencia UNEMI*, 14(37), 60- 72. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol14iss37.2021pp60-72p>

Correa G, D., Castaño, M., & Montoya L, J. (2017). Influencia del método de extracción en las propiedades funcionales de almidón de plátano dominico hartón (*Musa paradisiaca* l.). *UGCiencia*, 23, 88-91. <https://revistas.ugca.edu.co/index.php/ugciencia/article/view/792/1178>

García, M., Galvis Villamizar, D. N., & Gómez Monsalve, P. A.. (2022). Revisión bibliográfica: Biogenerador, generación de energía eléctrica por biomasa a partir del estiércol de cerdos. *Conciencia y técnica*, 4(1), 96–100. Recuperado a partir de <https://revistas.sena.edu.co/index.php/conciencia/article/view/4589>

Grace, M. H. (1977). Thermal properties of starch. In *Starch: Chemistry and Technology* (Vol. 2). Academic Press.

Hikal, W. M., Said-Al Ahl, H. A. H., Bratovcic, A., Tkachenko, K. G., Sharifi-Rad, J., & Kačániová, M. (2022). Banana peels: A waste treasure for human being. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2022, Article 7616452. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/7616452>

Kumari, P., Gaur, S. S., & Tiwari, R. K. (2023). Banana and its by-products: A comprehensive review on nutritional composition and pharmacological benefits. *eFood*, 4(5), e110. <https://doi.org/10.1002/efd2.110>

Leropoulos, I., Greenman, J., Melhuish, C. (2010). Improved energy output levels from small-scale microbial fuel cells. *Bioelectrochemistry*, 78(1), 44–50.

Ma, C., Xie, F., Wei, L., Zheng, C., Liu, X., Wang, L., & Liu, P. (2022). All-starch-based hydrogel for flexible electronics: Strain-sensitive batteries and self-powered sensors. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(20), 6724–6735. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c00872>

Nabi, G., Rafique, M., Khalil, A., Nabi, G., Irshad, M., Anwar, M. A., Nawaz, M. A., & Shaheen, S. M. (2026). Types and applications of electrochemical cells. In M. Rafique, M. Zendehtel, M. Irshad, & N. Yaghoobi Nia (Eds.), *Functional nanostructures for energy conversion and advanced*

applications. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1013532>

Piciooreanu, C., Head, I. M., Katuri, K. P., van Loosdrecht, M. C., & Scott, K. (2010). A computational model for biofilm-based microbial fuel cells. *Water Research*, 44(9), 2971–2980.

Rehman, S. U., Khan, K. H., Shah, A., Shah, S. M., Haleem, A., & Hussain, H. (2025). A review on starch-based solid electrolytes and their composites for sustainable Li-ion batteries: A green pathway to energy storage. *International Journal of Biological Macromolecules*, 331(Part 1), 148352. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.148352>

Sánchez, Mireya, Fernández, Lenys, & Espinoza-Montero, Patricio. (2021). Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales mediante celdas de combustible microbianas. *Revista Digital Novasinergia*, 4(1), 164-180. Epub 01 de junio de 2021.

Segura, E., López, R., & Ríos, M. (2022). Fabricación de una celda galvánica casera a partir de residuos orgánicos. *Revista Colombiana de Ciencia Aplicada*, 14(2), 55–64.

Umoh, E. O. (2024). Evaluation of physico-chemical properties of unripe plantain peels as affected by different drying temperature regimes. *Agriculture and Food Sciences Research*, 11(2), 104–109. <https://doi.org/10.20448/aesr.v11i2.6178>

Xie, F. (2024). Natural polymer starch-based materials for flexible electronic sensor development: A review of recent progress. *Carbohydrate Polymers*, 337, 122116. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122116>

Yang, M., Chang, L., Jiang, F., Zhao, N., Zheng, P., Simbo, J., Yu, X., y Du, S.-k. (2022). Structural, physicochemical and rheological properties of starches isolated from banana varieties (*Musa* spp.). *Food Chemistry: X*, 16, 100473. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36277869/>

Yasin, M., Gangan, S., & Panchal, S. K. (2025). Banana peels: A genuine waste or a wonderful opportunity? *Applied Sciences*, 15(6), 3195. <https://doi.org/10.3390/app15063195>

Zou, F., Tan, C., Zhang, B., Wu, W., & Shang, N.

(2022). The valorization of banana by-products: Nutritional composition, bioactivities, applications, and future development. *Foods*, 11(20), 3170. <https://doi.org/10.3390/foods11203170>