



**UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA**  
**INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA**

**ANÁLISIS DE VIABILIDAD EN LA PRODUCCIÓN DE  
BIOHIDRÓGENO A BAJO COSTO A PARTIR DE EFLUENTES  
DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS**

**Proyecto de investigación previo a la obtención del  
título de:**

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

**AUTOR: ANGEL ANDRES OÑA QUILLUPANGUI**

**TUTOR: PhD. JAIME MARTÍ**

**COTUTOR: MSc. GALO CERDA**

**Napo – Ecuador**

**2024**

## DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo, Angel Andres Oña Quillupangui, con documento de identidad 1724644057, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título Ingeniero en Biotecnología, son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

En virtud de lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y todos los demás aspectos vertidos en el presente documento son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

Tena, 26 de febrero de 2024



Nombres y apellidos:

Angel Andres Oña Quillupangui

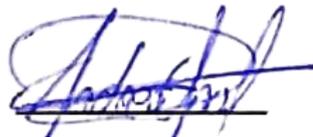
CI: 1724644057

## AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Angel Andres Oña Quillupangui, con documento de identidad 1724644057, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: “Análisis de viabilidad en la producción de biohidrógeno a bajo costo a partir de efluentes de aguas residuales domésticas” de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, reconozco a favor de la Universidad Regional Amazónica Ikiam una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Así mismo autorizo a la Universidad Regional Amazónica Ikiam para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Tena, 26 de febrero de 2024



Nombres y apellidos:

Angel Andres Oña Quillupangui

CI: 1724644057

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Certifico que el Trabajo de Integración Curricular Titulado: “Análisis de viabilidad en la producción de biohidrógeno a bajo costo a partir de efluentes de aguas residuales domésticas” en la modalidad: tesis, fue realizado por: Angel Andres Oña Quillupangui, bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiam, para su entrega y defensa.

Tena, 26 de febrero de 2024



.....  
Jaime Emilio Martí Herrero  
C.I: 1757205651



.....  
Galo Leonardo Cerda  
C.I: 1804628871

## DEDICATORIA

*Este trabajo está dedicado con mucho cariño a mis padres Angel Oña y Anita Quillupangui gracias a su sacrificio y su ternura he terminado algo que les fue negado por diversas circunstancias de la vida, pero que a sus hijos siempre han inculcado, el más grande acto de amor*

***El estudio***

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mis padres, mis hermanas Cristina, Paulina, mis sobrinos, Sebastian, Inti y Nina por su preocupación, cuidado, amor, atención, apoyo en cada momento, va por ustedes con mucho cariño, mis logros son el de ustedes también.

Agradezco a la linda Amazonia, que me vio venir cuando apenas tenía 18 años, me vio, amar, aprender, disfrutar, sonreír etc. Este trabajo siempre es en mira de mejorar la calidad de vida de cada uno de sus habitantes y su entorno.

Agradezco a la universidad publica, por permitirme estudiar, desarrollar mis habilidades y ampliar mis conocimientos. Ikiam es un verdadero agente de cambio que impulsa la investigación y la ciencia. A cada uno de mis amigos, muchas gracias por el apoyo y los momentos compartidos, a cada uno de ustedes los llevo en mi corazón.

Por último quiero mandar un especial agradecimientos a mi cuñado Silvio Alvarado, gracias por todo, este y todos mis logros son para ti. Nunca me olvides.

## ÍNDICE GENERAL

CARATULA	
DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD ....	ii
AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL .....	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN	
CURRICULAR.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vi
ÍNDICE GENERAL .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
ÍNDICES DE FIGURAS .....	x
RESUMEN .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.1.1 Uso de hidrógeno para la mejora de biogás en la digestión anaerobia .....	1
1.1.2 Formas de producción de hidrógeno mediante energías renovables .....	3
1.1.2.1 Producción de hidrógeno a partir de electrólisis fotovoltaica .....	3
1.1.2.2 Fundamentos y parámetros que influyen en la electrólisis del agua .....	5
1.1.3 Electrólisis a partir de tecnologías a bajo costo .....	7
1.1.3.1 Producción de hidrógeno a partir de efluentes de biodigestores .....	7
1.1.3.2 Incorporación de biochar como electrolito para la síntesis de hidrógeno .....	8
1.2 Planteamiento del problema .....	9
1.3 Justificación .....	10
1.4 Objetivos .....	11
CAPÍTULO II: MARCO METODOLÓGICO .....	12
2.5 Muestreo y caracterización de aguas residuales .....	12
2.6 Parámetros de caracterización de aguas residuales .....	13
2.7 Síntesis de biochar de <i>Guadua angustifolia</i> y su uso como electrolito .....	13
2.8 Parámetros de caracterización de biochar .....	14
2.9 Diseño experimental .....	15
2.10 Análisis estadístico .....	17
2.11 Ensayos con fuente de tensión de corriente continua .....	17
2.12 Diseño de la celda electrolítica .....	18
2.13 Producción de hidrógeno con el uso de una placa fotovoltaica .....	19

CAPÍTULO III: PRESENTACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS .....	21
3.1 Caracterización de efluentes del sistema de tratamientos de aguas residuales domésticas de la Universidad Regional Amazónica IKIAM .....	21
3.2 Estudio del primer análisis: Efecto del amperaje y voltaje en la producción de hidrógeno fijando una concentración de biochar 0 g/L .....	22
3.2.1 Caracterización de los efluentes EFL1 después del primer análisis. ....	23
3.3 Caracterización de biochar sintetizado para su uso como electrolito. ....	24
3.4 Estudio del segundo análisis: Efecto de las distintas concentraciones de biochar y voltaje para un amperaje constante de (1A) .....	25
3.4.1 Caracterización de los efluentes EFL2 después del segundo análisis. ....	26
3.5 Análisis estadístico .....	27
3.5.1 Análisis de la varianza del diseño factorial completo en la producción de hidrógeno .....	27
3.5.2 Gráficas de superficie de los diferentes parámetros de operación que afectan a la electrólisis .....	28
3.5.3 Análisis de resultados reales y previstos. ....	30
3.5.4 Modelo de regresión matemática .....	31
3.5.5 Maximización en la producción de hidrógeno .....	31
3.6 Estado físico de los electrodos después del proceso de electrólisis. ....	32
3.7 Producción de hidrógeno mediante electrólisis fotovoltaica .....	32
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	34
4.1 Producción de hidrógeno mediante tecnologías a bajo costo .....	34
4.2 Influencia de los distintos parámetros de operación en el proceso de electrólisis .....	35
4.2.1 Voltaje y Amperaje .....	35
4.2.2 Uso de biochar como electrolito para la producción de hidrógeno .....	36
4.2.3 Proceso de coagulación .....	37
4.3 Producción de hidrógeno a partir de electrólisis fotovoltaica .....	38
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	39
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
ANEXOS	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Metodologías para caracterización de aguas residuales .....	13
<b>Tabla 2.</b> Metodologías para la caracterización de biochar .....	14
<b>Tabla 3.</b> Variables y sus niveles para el diseño factorial completo de $3^3$ .....	15
<b>Tabla 4.</b> Diseño experimental factorial completo de $3^3$ .....	16
<b>Tabla 5.</b> Parámetros fisicoquímicos de los efluentes de la salida del biodigestor .....	21
<b>Tabla 6.</b> Parámetros fisicoquímicos de los efluentes EFL1 después de la electrolisis. ....	24
<b>Tabla 7.</b> Parámetros fisicoquímicos del biochar de <i>G. angustifolia</i> sintetizado. ....	24
<b>Tabla 8.</b> Caracterización fisicoquímica de efluente EFL2, después de la electrólisis disolución .....	27
<b>Tabla 9.</b> Caracterización fisicoquímica de efluente (EFL2) después de la electrólisis disolución .....	27
<b>Tabla 10.</b> Análisis de la varianza (ANOVA) para la producción de hidrógeno. ....	28
<b>Tabla 11.</b> Resultados de valores reales y predichos por el diseño experimental. ....	30
<b>Tabla 12.</b> Niveles óptimos de producción de hidrógeno .....	32

## ÍNDICES DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Conceptos teóricos de la metanogénesis hidrogenotrófica mejorada mediante inyección de hidrógeno. ....	2
<b>Figura 2.</b> Diseño de la tecnología <i>Power to gas</i> . ....	4
<b>Figura 3.</b> Diseño de un electrolizador básico en el proceso de electrólisis. ....	5
<b>Figura 4.</b> Esquema del sistema de biodigestores de la Universidad Regional .....	12
<b>Figura 5.</b> Equipo voltámetro de Hoffmann para la producción de .....	18
<b>Figura 6.</b> Electrolizador a bajo costo: (a) Esquema de la celda electrolítica diseñada; (b) Vista a escala real de la celda .....	19
<b>Figura 7.</b> Ilustración del dispositivo experimental que utiliza el panel solar: (A) panel fotovoltaico, (B) voltámetro, (C) electrolizador. ....	20
<b>Figura 8.</b> Efecto del voltaje 6 V (8 a), 9 V (8 b) y 12 V (8 c) en relación de los distintos amperajes en la producción de hidrógeno. ....	23
<b>Figura 9.</b> Producción de hidrógeno (ml) respecto al tiempo (min) con un amperaje de 0,4 A y concentraciones de biochar 0 g/L (a), 50 g/L (b), 150 g/L (c) .....	26
<b>Figura 10.</b> Análisis de la superficie de respuesta para la síntesis de hidrógeno respecto al amperaje y voltaje (A), voltaje y biochar (B), amperaje y biochar (C). ....	29
<b>Figura 11.</b> Estado físico de los electrodos ánodo (lado izquierdo) y cátodo (lado derecho) después del proceso de electrólisis .....	32
<b>Figura 12.</b> Producción de hidrógeno mediante el uso de un panel fotovoltaico. Las condiciones fueron las mismas 150 g/L de biochar, 17 V y 1A para los dos valores. ....	33

## ANEXOS

**Anexo 1.** El gráfico de Pareto muestra cada uno de los efectos estimados en orden decreciente de importancia.

**Anexo 2.** Esta gráfica muestra los estimados de Hidrogeno como una función de cada factor experimental.

## RESUMEN

Para optimizar el desempeño de los biodigestores anaerobios, se plantea una alternativa innovadora: potenciar la generación de metano a través de la reacción entre el hidrógeno y el CO<sub>2</sub> presentes en estos sistemas. La obtención de este hidrógeno se puede llevar a cabo mediante un proceso electroquímico conocido como electrólisis. El objetivo central de esta investigación es sintetizar hidrogeno, con miras a implementar esta mejora, haciendo uso de tecnologías de bajo costo en los efluentes de biodigestores. Para alcanzar este propósito, se ejecutó un diseño experimental factorial completo con tres niveles y tres factores, abordando diversos parámetros operativos que inciden en el proceso de electrólisis. Entre estos parámetros se incluyen el voltaje (9 V, 6 V, 12 V) y el amperaje (0,4 A, 1 A, 2 A), junto con la introducción de nuevos criterios, como el uso de biochar como electrolito (0 g/l, 50 g/l, 150 g/L). Los resultados clave revelaron que la producción de hidrógeno (ml/h) aumenta de manera lineal en función exclusiva al incremento de los voltajes y concentración de biochar aplicados, siendo la máxima producción de 2,76ml/h a 12 V, 150 g/L de biochar y 1 A. Por otro lado, se observó que el incremento en el amperaje no ejerce ninguna influencia en el aumento de la producción de hidrógeno, ya que esta se mantiene constante. Al final, se diseñó un electrolizador de bajo costo, aprovechando un panel fotovoltaico para la síntesis eficiente de hidrógeno, basándonos en los hallazgos obtenidos en el laboratorio.

**Palabras clave:** Electrólisis, aguas residuales, biodigestores, metanogénesis, hidrogeno.

## ABSTRACT

To optimize the performance of anaerobic biodigesters, an innovative alternative is proposed: enhancing the generation of methane through the reaction between hydrogen and CO<sub>2</sub> present in these systems. Obtaining this hydrogen can be carried out through an electrochemical process known as electrolysis. The central objective of this research is to synthesize hydrogen, with a view to implementing this improvement, making use of low-cost technologies in biodigester effluents. To achieve this purpose, a full factorial experimental design was executed with three levels and three factors, addressing various operational parameters that affect the electrolysis process. These parameters include voltage (9 V, 6 V, 12 V) and amperage (0.4 A, 1 A, 2 A), along with the introduction of new criteria such as the use of biochar as an electrolyte (0 g/L, 50g/L, 150g/L). The key results revealed that hydrogen production (ml/h) increases linearly depending exclusively on the increase in the voltages and concentration of biochar applied, with the maximum production being 2.76 ml/h at 12 V, 150 g/L of biochar and 1 A. On the other hand, it was observed that the increase in amperage does not exert any influence on the increase in hydrogen production, since it remains constant. In the end, a low-cost electrolyzer was designed, taking advantage of a photovoltaic panel for the efficient synthesis of hydrogen, based on the findings obtained in the laboratory.

**Keywords:** Electrolysis, wastewater, biodigesters, methanogenesis, hydrogen.

## CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 Antecedentes

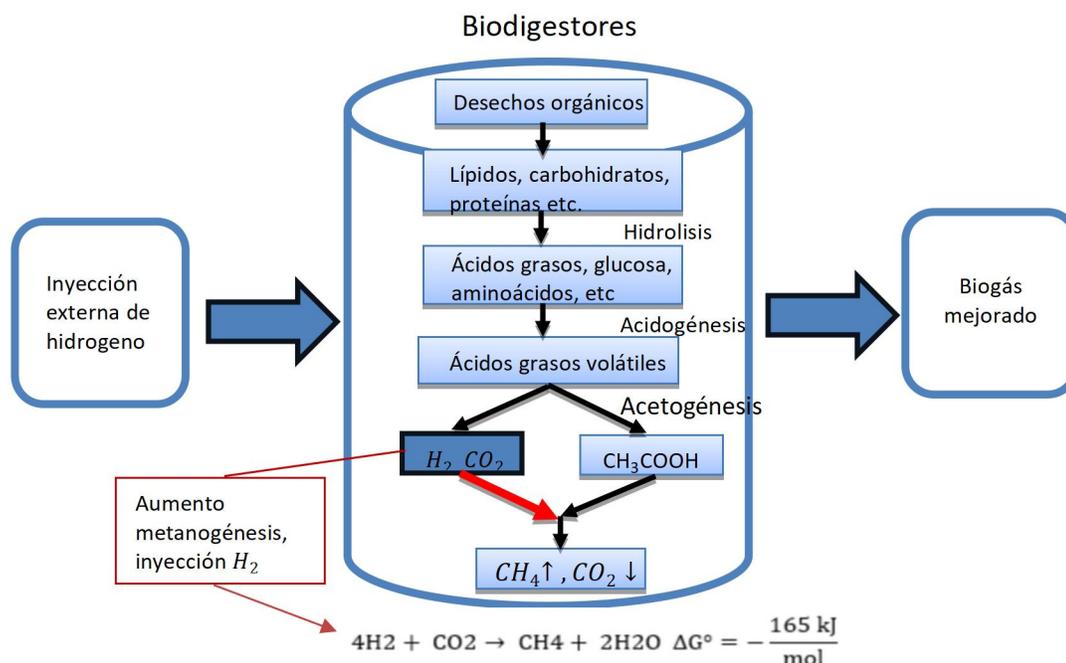
#### *1.1.1 Uso de hidrógeno para la mejora de biogás en la digestión anaerobia*

La rápida expansión de la población mundial, el inminente desarrollo industrial en sectores como el transporte, la agricultura y otros ámbitos, ha resultado en un aumento sostenido de la demanda de energía en los últimos años [1]. Aproximadamente el 80% de esta demanda es cubierta mediante el uso de combustibles fósiles, como el petróleo, el gas natural y el carbón. Estos recursos, sin embargo, conllevan implicaciones negativas para el medio ambiente, el ecosistema y la salud humana, ya que emiten gases de efecto invernadero, tales como el dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  y el metano  $\text{CH}_4$  [2]. En este contexto se ha desencadenado un proceso para cambiar el modelo existente del sistema energético mundial a un nuevo paradigma, con el fin de lograr reducciones significativas en las emisiones de carbono [3]. Para ello, se consideran diversos aspectos, que abarcan desde recursos hasta políticas y fuentes de energía renovables capaces de satisfacer las necesidades energéticas sin generar repercusiones ambientales [4].

Dentro de estas fuentes de energía renovables, durante las últimas dos décadas, la industria de la bioenergía ha ganado importancia, especialmente en el uso y producción de biogás. Es por esta razón que el número de biodigestores, que producen biogás mediante tecnologías de digestión anaeróbica (DA), ha aumentado constantemente en varios países de Europa y Asia; sin embargo, a pesar de este incremento, las aplicaciones del biogás se ven restringidas por la baja proporción de metano producido [5]. Usualmente, el biogás se compone de metano ( $\text{CH}_4$ ) en el rango del 50-70% y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en el rango del 30-50%, junto con trazas de otras sustancias, como nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y siloxanos [6]. Sin embargo, todos los gases presentes en el biogás, excepto el metano, se consideran contaminantes indeseados.

En la actualidad, la eliminación de estos compuestos tóxicos se realiza mediante diversos métodos fisicoquímicos, como la absorción química, el lavado con agua, la separación criogénica y la separación por membrana. Estas técnicas buscan optimizar las propiedades del biogás y ampliar sus posibles aplicaciones [7]. Otra alternativa de interés consiste en aprovechar el CO<sub>2</sub> en lugar de eliminarlo, mediante su reacción con H<sub>2</sub> externo con el objetivo de convertirlo, idealmente, en una mayor cantidad de CH<sub>4</sub>. Este enfoque no solo busca purificar el biogás, sino también mejorar su contenido de metano, incrementando su valor como fuente de energía [6,8].

La reacción entre CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> tiene lugar normalmente durante el proceso de digestión anaerobia, mediada por microorganismos conocidos como metanógenos hidrogenotróficos. Este proceso, denominado metanogénesis hidrogenotrófica, conduce a la síntesis de metano. Sin embargo, al final del proceso, el CO<sub>2</sub> no reacciona por completo. En este punto, se implementa la mejora biológica del biogás, centrándose en las poblaciones microbianas de metanógenos hidrogenotróficos, mediante la inyección directa de H<sub>2</sub> en el biodigestor, como se ilustra en la figura (1). Esto posibilita alcanzar una concentración de CH<sub>4</sub> de hasta un 95% [9].



**Figura 1.** Conceptos teóricos de la metanogénesis hidrogenotrófica mejorada mediante inyección de hidrógeno.

**Realizado por:** Oña, Andres, 2024.

El diseño donde se inyecta el  $H_2$  directamente dentro del biodigestor para reaccionar con el  $CO_2$  producido por la digestión anaerobia se denomina proceso in situ; por otra parte, cuando el suministro de  $H_2$  y de  $CO_2$  son de fuentes externas y se inyectan a un reactor anaerobio con un cultivo hidrogenotrófico, se lo conoce como proceso ex situ [6,10]. Hasta el momento, ambos procedimientos se han demostrado experimentalmente, por ejemplo, en un estudio realizado por Bassani et al [7], antes de la adición de  $H_2$  el contenido de  $CH_4$  del reactor era ~70%. Después de la adición ex situ de  $H_2$  la tasa de producción de  $CH_4$  aumentó en un 53%, lo que resultó en un contenido promedio de  $CH_4$  de ~89% (con un máximo de 92%). En la actualidad, las tecnologías de mejora biológica de biogás tienen prometedores resultados a escala de laboratorio; sin embargo, se están tomando en consideración diversos desafíos tecnológicos para llevarlo a escala industrial.

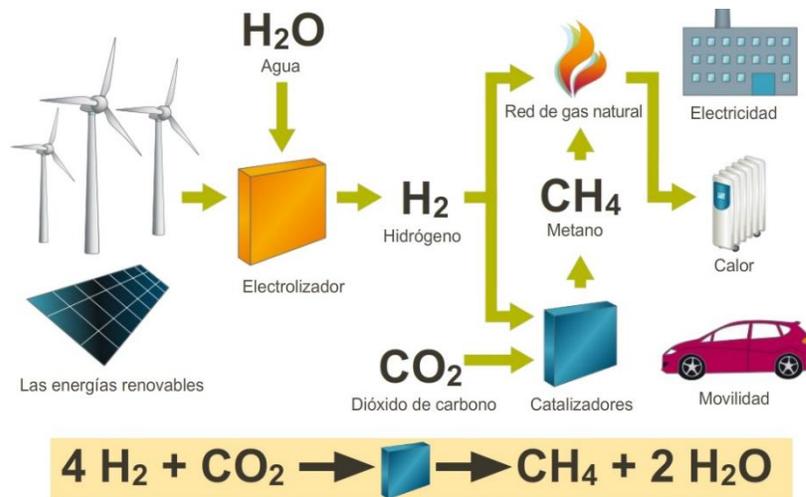
### **1.1.2 Formas de producción de hidrógeno mediante energías renovables**

#### *1.1.2.1 Producción de hidrógeno a partir de electrólisis fotovoltaica*

La generación de hidrógeno necesario para reaccionar con el  $CO_2$  y mejorar el biogás debe provenir de recursos renovables [11]. Hay diversas formas de producir hidrógeno enfocadas en fuentes de energía renovable, tales como procesos biológicos, electrolíticos, fotolíticos y termoquímicos. Cada uno se encuentra en un nivel distinto de desarrollo, con su propio conjunto de posibilidades, ventajas y obstáculos [12]. Una tecnología destacada es la electrólisis, que se basa en la división electroquímica del agua [11,13]. Esta elección se debe a que no emite gases de efecto invernadero y cumple con las restricciones de emisiones de la RED IL (Directiva de Energías Renovables), que establece menos de 3 toneladas de  $CO_2$  por tonelada de hidrógeno [11]. A pesar de esto, solo el 4 % del hidrógeno (65 millones de toneladas) se produce a partir de la electrólisis del agua [14]. Sin embargo, se prevé que la generación de hidrógeno electrolítico crezca significativamente en los próximos años, representando el 22% de todo el hidrógeno producido a nivel mundial en 2050 [11,14].

A esta tecnología se pueden incorporar paneles solares como fuentes de energía para el proceso de electrolisis. Este sistema, que aprovecha la energía solar para sintetizar hidrógeno, puede utilizarse directamente para reaccionar con el  $CO_2$  y así aumentar la

cantidad de metano producido. Todo este conjunto de procesos ha dado lugar a una tecnología denominada "Power-to-Gas" (P2G) [8]. Esta tecnología se está desarrollando en Europa, especialmente en países como Alemania. El concepto principal es utilizar el exceso de electricidad de los paneles solares para almacenarlo en forma de gas mediante un proceso de dos pasos, como se observa en la figura (2). En la primera etapa, se genera H<sub>2</sub> mediante el uso de electrolizadores y paneles solares que realizan el proceso de electrólisis. Posteriormente, en la segunda etapa, se lleva a cabo la conversión de H<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> mediante el proceso de metanización utilizando una fuente externa de CO<sub>2</sub> [15,16]. El CH<sub>4</sub> resultante, conocido como gas natural sustituto (GNS), puede ser inyectado en la red de distribución de gas existente o almacenado en depósitos de gas [16].



**Figura 2.** Diseño de la tecnología *Power to gas*.  
**Imagen extraída de:** Renewable energy [16]

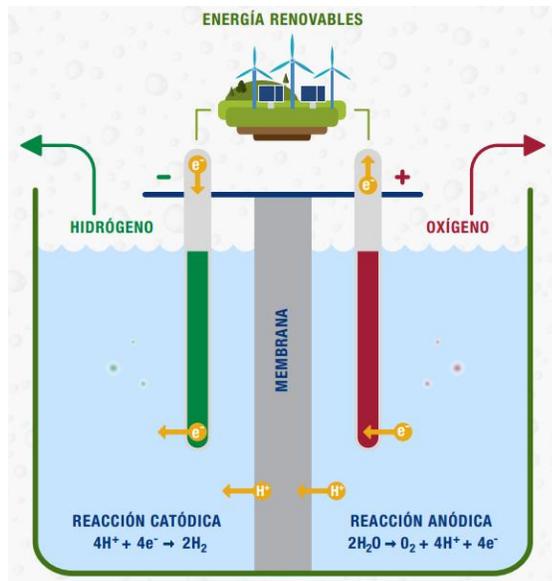
Esta tecnología aún se encuentra en desarrollo y enfrenta varios desafíos, entre ellos, los altos costos de operación. Este aspecto resulta especialmente significativo para países en desarrollo, dado que la mayoría de las tecnologías de digestión anaerobia son de bajo costo y están enfocadas hacia medianos y pequeños agricultores [17]. En el contexto actual, la tecnología Power-to-Gas podría ser adaptada para estos biodigestores mediante el uso de electrolizadores alimentados por fuentes de energía renovable, como los paneles fotovoltaicos.

### 1.1.2.2 Fundamentos y parámetros que influyen en la electrólisis del agua

De manera general, la electrólisis del agua es un proceso no espontáneo que utiliza electricidad para descomponer la molécula del agua en sus componentes hidrógeno y oxígeno, como se muestra en la siguiente reacción:



Este proceso electroquímico se lo realiza a través de un sistema denominado electrolizador, cuya representación se aprecia en detalle en la figura (3). Este sistema está compuesto por dos electrodos, uno positivo (ánodo) y otro negativo (cátodo), sumergidos en una solución electrolítica. Su funcionamiento se activa al conectarse a una fuente de energía que suministra un voltaje y amperaje específicos [18].



**Figura 3.** Diseño de un electrolizador básico en el proceso de electrólisis.

**Fuente:** International Journal of Hydrogen Energy [19]

En cada uno de los electrodos se generan distintos gases: el electrodo positivo libera gas oxígeno mediante la reacción de evolución de oxígeno (OER), mientras el electrodo negativo libera gas hidrógeno, siguiendo la reacción de evolución de hidrógeno (HER), conforme a estas semirreacciones:

- Reacción de evolución de oxígeno (OER)



- Reacción de evolución de hidrógeno (HER)



Para lograr una mayor eficiencia en la producción de hidrógeno, es esencial tener en cuenta diversos factores que influyen en el proceso de electrólisis. Entre estos factores se incluyen el tipo y las dimensiones del electrodo, la capacidad de conductividad proporcionada por el electrolito, la distancia entre electrodos y la resistencia generada por las burbujas que recubren la superficie del electrodo. Además, se deben considerar configuraciones operacionales específicas, como el rango óptimo de voltaje y amperaje, que posibiliten la máxima producción de hidrógeno.

Existen diversos tipos de electrolizadores, los cuales varían según el material con el que se diseñan. En general, la tecnología de electrólisis de agua alcalina (AEC) se destaca como la mejor caracterizada, gracias a su mayor tasa de producción y menor costo. Los AEC presentan múltiples ventajas en comparación con otros sistemas, ya que los materiales de los electrodos, como el acero inoxidable o níquel, tienen un costo relativamente bajo. Además, utilizan electrolitos como el KOH y/o NaOH en concentraciones de aproximadamente 20 % al 30 % en peso, lo cual ha demostrado ofrecer resultados óptimos de manera consistente [20,21].

Existen diversos tipos de electrolizadores, los cuales varían según el material con el que se diseñan. En general, la tecnología de electrólisis de agua alcalina (AEC) se destaca como la mejor caracterizada, gracias a su mayor tasa de producción y menor costo. Los AEC presentan múltiples ventajas en comparación con otros sistemas, ya que los materiales de los electrodos, como el acero inoxidable o níquel, tienen un costo relativamente bajo. Además, utilizan electrolitos como el KOH y/o NaOH en concentraciones de aproximadamente 20 % al 30 % en peso, lo cual ha demostrado ofrecer resultados óptimos de manera consistente [20,21].

### **1.1.3 Electrólisis a partir de tecnologías a bajo costo**

#### **1.1.3.1 Producción de hidrógeno a partir de efluentes de biodigestores**

La producción de hidrógeno mediante electrólisis es una tecnología en desarrollo que requiere de varios materiales y configuraciones sofisticadas, por lo que en los últimos tiempos se ha buscado diversas maneras de producir hidrógeno de una manera más sustentable [22]. Uno de los enfoques ha sido sustituir el agua por otros medios como el agua de mar o el uso de aguas residuales, ya que estos medios poseen una gran cantidad de iones disueltos que aumentan la conductividad del medio y permiten un mejor rendimiento de las celdas eléctricas [23].

Diversos estudios han explorado el aprovechamiento de aguas residuales en la producción de hidrógeno. Pathak et al. [20], por ejemplo, lograron una producción de 16.4 mL/h de hidrógeno a 12 voltios mediante un enfoque integrado que involucra aguas residuales de una industria textil y el uso de paneles solares. De manera similar, en una investigación conducida por Ayman Oz N [24], se obtuvieron 158.5 ml/h de hidrógeno a 10 V utilizando aguas residuales generadas en el proceso de producción de aceite de oliva, mediante el diseño de un electrolizador con electrodos de aluminio. La variación en la producción de hidrógeno entre ambos estudios depende del tipo específico de agua residual utilizado en el proceso de electrólisis y de la cantidad de materia orgánica presente en dicha agua residual [25].

Los efluentes generados después del tratamiento de aguas residuales mediante digestión anaerobia son otra fuente potencial que puede ser aprovechada [26]. Estos efluentes poseen una alta concentración de minerales, nutrientes y materia orgánica, que comúnmente se utilizan como abono y biofertilizante [27]. Hasta la fecha, no se han realizado investigaciones que exploren el uso de estos efluentes como un medio para la producción de hidrógeno mediante electrólisis. Sin embargo, existen estudios, como el realizado por Schievano A et al. [28], que indican que los efluentes pueden presentar una mayor concentración de iones y minerales después del proceso de digestión anaerobia, lo que podría beneficiar el rendimiento del proceso de electrólisis.

### *1.1.3.2 Incorporación de biochar como electrolito para la síntesis de hidrógeno*

Otro desafío significativo de los electrolizadores convencionales es el uso considerable de electrolitos durante el proceso de electrólisis. En los electrolizadores de agua alcalina (AEC), los electrolitos como el KOH o el NaOH aportan una cantidad específica de iones, mejorando la conductividad del medio a aproximadamente 95 S/m y 65 S/m a 50 °C, respectivamente [25]. No obstante, esta práctica puede resultar perjudicial para los electrodos ya que, puede reducir su rendimiento catalítico y aumentar los costos operativos del proceso [29]. Ante estos desafíos, se han explorado diversas alternativas como, por ejemplo, la inclusión de aditivos en el electrolito, como el cloruro metálico a base de etilendiamina, con el fin de mejorar la actividad catalítica de la producción de hidrógeno [29].

Otra alternativa mucho más sustentable es la incorporación de biochar como electrolito en el proceso de electrólisis. Normalmente, se lo utiliza como absorbente de contaminantes de agua y también como complemento del suelo para mejorar la fertilidad, mediante el incremento de la actividad microbiana [30]. Sin embargo, se han investigado otros usos del biochar en diferentes aplicaciones electroquímicas gracias a su capacidad para aceptar o transferir electrones [31]. Ha sido empleado como material de electrodo para supercondensadores, baterías recargables, celdas de combustible microbianas (MFC) etc.[32].

Estas aplicaciones electroquímicas también pueden ser empleadas en el proceso de electrólisis del agua. Existe un estudio realizado por Amikam G et al.[33], donde utilizan 150 g/L de biochar derivado de desechos agrícolas junto con otros electrolitos como HCl y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para aumentar la densidad de corriente (mA/cm<sup>2</sup>) la cual guarda una relación directa con la eficiencia en la producción de hidrógeno. Al final del estudio, la densidad de corriente aumento a 50 mA/cm<sup>2</sup>, lo que resulto en una eficiencia del 97.8 % en la producción de H<sub>2</sub>.

Ahora, para emplear el biochar como electrolito, es crucial evaluar su capacidad de conducción en función de los iones presentes en el medio. La presencia de una alta concentración de iones implica una mayor conductividad, lo que incrementa la producción de hidrógeno. En el caso específico del biochar según lo indicado por Yuan et al. [31], la conductividad varía en función de la materia prima y las condiciones de pirólisis, especialmente a las temperaturas de tratamiento (HTT) y la temperatura de residencia (HTT). Esto se debe a que el biochar se vuelve conductor cuando se somete a temperaturas mayores a 600 °C [31,32].

Basándonos en estos antecedentes, se puede utilizar el biochar como electrolito, aumentando la temperatura de tratamiento para obtener una mayor conductividad. Este nuevo sistema puede emplearse en conjunto con los efluentes que salen del sistema de tratamiento de aguas residuales, para sintetizar hidrógeno de manera más sostenible. Experimentalmente, esto puede llevarse a cabo en equipos electroquímicos, como un voltámetro de Hoffmann. Allí se pueden estudiar cada una de las interacciones entre los efluentes y el biochar, además de entender cómo afectan los distintos parámetros de operación, como el voltaje y amperaje, en la producción de hidrógeno.

## **1.2 Planteamiento del problema**

Uno de los desafíos fundamentales para la integración del hidrógeno en el panorama energético global radica en su método de producción. Este gas no se genera de manera natural en la Tierra y, por lo tanto, debe ser creado o descomponerse a partir de moléculas químicas específicas, como el agua (H<sub>2</sub>O) o los hidrocarburos [33]. La mayor parte de la producción de hidrógeno en la actualidad se genera por la combustión de hidrocarburos, los cuales liberan emisiones de carbono que son las principales responsables de la contaminación del medio ambiente [34].

Con el objetivo de transformar este panorama, se han desarrollado diversas tecnologías, entre las cuales destaca la electrólisis. Esta técnica posibilita la obtención de hidrógeno sin emisiones de carbono, convirtiéndolo en una fuente de energía más limpia. El hidrógeno producido puede ser empleado como combustible, generador de calor y electricidad, y también puede contribuir al mejoramiento de otras tecnologías, como la

digestión anaerobia mediante biodigestores. Normalmente la mayoría de los biodigestores son de bajo costo y tienen una serie de limitaciones como una menor producción de metano, presencia de compuestos contaminantes como  $H_2S$  y  $NH_3$  y además una lenta hidrólisis de la materia orgánica compleja [35]. La introducción de la electrólisis en los biodigestores puede mitigar estas limitaciones, ya que el hidrógeno producido tiene el potencial de reducir el  $CO_2$  mediante una reacción química para una mayor producción de  $CH_4$  mientras que el  $O_2$  puede contribuir a precipitar el  $H_2S$  [7,26].

### **1.3 Justificación**

La construcción de electrolizadores a bajo costo y la implementación de nuevos enfoques, como la utilización de biochar como electrolito y la integración de fuentes de energía renovable como los paneles solares, permiten desarrollar un sistema autónomo descentralizado para la producción sostenible de hidrógeno sin la necesidad de baterías externas ni el uso de electrolitos químicos. Este sistema podría incorporarse fácilmente a los biodigestores para mejorar el tratamiento del biogás mediante la reacción biológica de  $H_2$  y  $CO_2$  [36]. Esto podría aumentar el porcentaje de  $CH_4$  lo que implica que podría llegar a cumplir con la calidad legislativa exigida para ser inyectada directamente a la red de almacenamiento de gas natural. Actualmente, las especificaciones de la composición del gas natural dependen de las regulaciones nacionales y en algunos países se requiere un contenido de metano  $> 95\%$  [6,27].

La construcción de electrolizadores a bajo costo y la implementación de nuevos enfoques, como la utilización de biochar como electrolito y la integración de fuentes de energía renovable como los paneles solares, permiten desarrollar un sistema autónomo descentralizado para la producción sostenible de hidrógeno sin la necesidad de baterías externas ni el uso de electrolitos químicos. Este sistema podría incorporarse fácilmente a los biodigestores para mejorar el tratamiento del biogás mediante la reacción biológica de  $H_2$  y  $CO_2$  [36]. Esto podría aumentar el porcentaje de  $CH_4$ , lo que implicaría cumplir con la calidad legislativa requerida para ser inyectado directamente en la red de almacenamiento de gas natural. En la actualidad, las especificaciones de la composición del gas natural están sujetas a regulaciones nacionales, y en algunos países se exige un contenido de metano superior al  $95\%$  [6,27].

## **1.4 Objetivos**

### General

Estudiar la viabilidad técnica de producción de hidrógeno a través de la electrólisis de los efluentes del sistema de tratamiento de aguas residuales mediante biodigestores de la Universidad Regional Amazónica Ikiam

### Específicos

Determinar la influencia de los parámetros de operación, como el voltaje y amperaje en la producción de biohidrógeno mediante el uso de un voltámetro de Hoffman

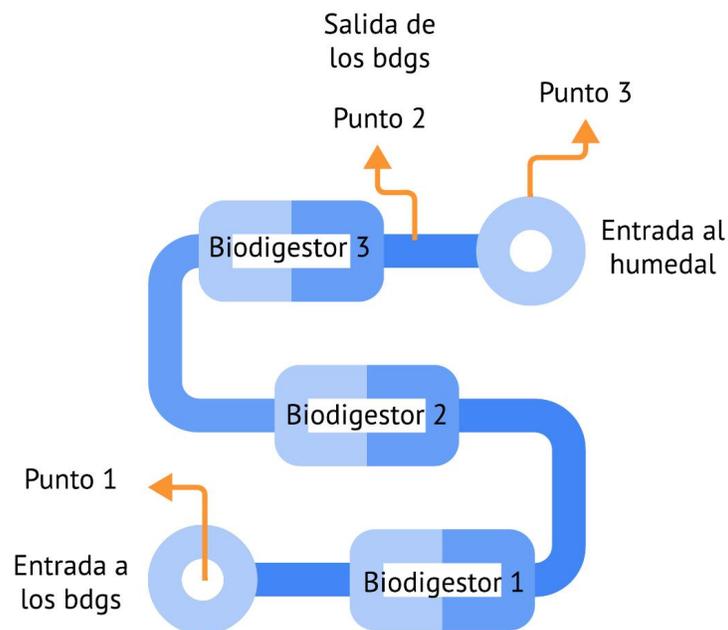
Estudiar el comportamiento del biochar como electrolito para la producción de biohidrógeno mediante electrólisis de los efluentes del sistema de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Regional Amazónica Ikiam

Diseñar y elaborar un prototipo electrolizador- panel fotovoltaico mediante tecnologías a bajo costo para la producción de hidrógeno a partir de los efluentes del sistema de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Regional Amazónica

## CAPÍTULO I: MARCO METODOLÓGICO

### 2.5 Muestreo y caracterización de aguas residuales

Los efluentes fueron recolectados en la salida de los biodigestores (bdgs) de la Universidad Regional Amazónica Ikiam, identificada como el punto 2 en el esquema de los biodigestores de la Figura 4. Se recogieron 3 litros por cada análisis, alcanzando así un total de 9 litros para el conjunto de 3 análisis. En el primer análisis, los efluentes se etiquetaron como EFL1 y se utilizaron para analizar la interacción entre el amperaje y el voltaje, manteniendo una concentración constante de biochar de 0 g/L. En el segundo análisis, los efluentes se marcaron como EFL2 y se emplearon para analizar la interacción entre el voltaje y el biochar con un amperaje constante de 1 A. El último análisis se llevó a cabo en el electrolizador conectado al panel solar y se etiquetó como EFL3. Cada uno de los efluentes (EFL1, EFL2 y EFL3) se recolectó cada 2 meses, ya que cada análisis y sus réplicas requerían ese período de tiempo.



**Figura 4.** Esquema del sistema de biodigestores de la Universidad Regional Amazónica Ikiam.  
**Realizado por:** Oña, Andres, 2024

## 2.6 Parámetros de caracterización de aguas residuales

La caracterización de los efluentes se realizó antes y después del proceso de electrólisis con base en los métodos estándar para el análisis de agua y aguas residuales APHA (2017). Cada una de las técnicas y equipos que se han utilizado se detallan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Metodologías para caracterización de aguas residuales

Muestra	Parámetro	Método Normalizado	Técnica	Equipo
Efluente	Sólidos Totales	2540	gravimétrico	Estufa Thermo Scientific HERATHERM OGS60
	Sólidos Volátiles	2450-E	gravimétrico	Mufla JP Selecta 2200854
	pH	4500-B	potenciométrico	Medidor multímetro Thermo Scientific Orion Star A325
	Conductividad	2510		

Realizado por: Oña, Andres 2024.

## 2.7 Síntesis de biochar de *Guadua angustifolia* y su uso como electrolito

Para la síntesis de biochar, se utilizó *Guadua angustifolia* previamente cortada en trozos de 2x2cm y llevadas a una Mufla modelo JP Selecta 2200854 en crisoles de 50 ml de capacidad. El proceso se realizó a una temperatura de 800 °C durante una hora, con una tasa de calentamiento de 10 °C/min, según la metodología realizada por Amikan et al [33]. Después del proceso de síntesis, se enfriaron los crisoles en un desecador por 2 horas y se trituró de forma manual en un mortero con la ayuda de un pistilo. Posteriormente, se pasó por un tamiz malla N° 60 para tener un tamaño de partícula homogéneo.

Una vez se sintetizó la cantidad necesaria de biochar para los análisis, se llevaron a cabo curvas de concentración con el objetivo de utilizar el biochar como electrolito. Para ello, se tomaron tres puntos: 0g, 1g y 3g de biochar, los cuales se disolvieron en un volumen de 20 ml de efluentes. Esta relación, se basó en un estudio previo realizado por Singh B et al [37]. Las muestras de biochar se disolvieron utilizando una plancha de calentamiento de la marca Fisherbrand, con una velocidad de agitación de 400 rpm, durante una hora [37]. Una vez obtenida la solución biochar-efluente, se filtró mediante una bomba de vacío para eliminar todo el biochar suspendido en la solución. Este procedimiento se llevó a cabo para evitar que el biochar suspendido obstruyera el área superficial de los electrodos donde se generan las burbujas de hidrógeno en el voltámetro de Hoffman. Al finalizar, se obtuvieron las concentraciones respectivas de 0 g/L, 50 g/L y 150 g/L.

## 2.8 Parámetros de caracterización de biochar

La caracterización del biochar se realizó antes y después del proceso de electrólisis con base en los parámetros detallados en la tabla 2 y acorde a lo descrito en los métodos estándar para el análisis de agua y aguas residuales APHA (2017). En el caso de la conductividad se siguió el protocolo propuesto por Singh B et al [37].

**Tabla 2.** Metodologías para la caracterización de biochar

Muestra	Parámetro	Método	Técnica	Equipo
		<b>Normalizado</b>		
	Sólidos Totales	2540	gravimétrico	Estufa Thermo Scientific HERATHERM OGS60
Biochar	Sólidos Volátiles	2450-E	gravimétrico	Mufla JP Selecta 2200854
	Cenizas			
	pH	Singh B et al	potenciométrico	Medidor multímetro Thermo Scientific Orion Star A325
	Conductividad			

Realizado por: Oña, Andres 2024

## 2.9 Diseño experimental

Para determinar la influencia de los distintos parámetros de operación en la producción de hidrógeno durante el proceso de electrólisis se desarrolló un diseño factorial completo de  $3^3$ . Para esto se tomaron tres factores independientes en tres distintos niveles para determinar la influencia combinada de los factores independientes en la respuesta. Los factores evaluados fueron: Voltaje (V), Amperaje (A) y Biochar (g/L). Estos parámetros se estudiaron en tres niveles: bajo (-1), medio (0) y alto (+1) mientras que la producción de hidrógeno (ml/h) se definió como la respuesta, como se muestra en la (Tabla 3). Para el voltaje se tomaron tres niveles de 3 V de incremento (6, 9 y 12 V), debido a que cada celda fotovoltaica aporta 3 V. Para el amperaje y biochar se tomaron rangos no homogéneos de valores, de modo que facilite poder detectar comportamiento exponenciales o logarítmicos en las respuestas.

Se corrieron un total de 27 experimentos por triplicado basado en una matriz de diseño experimental factorial completo de  $3^3$  que se generó usando el software Statgraphics versión de prueba 19.3.03 (Tabla 4). Estos ensayos se analizaron bajo las siguientes condiciones: tiempo por corrida (3 h), volumen de trabajo de 200 ml y temperatura de laboratorio de:  $20^{\circ}\text{C} \pm 5$ . Posterior a esto se realizó un análisis de superficie de respuesta para determinar la interacción óptima entre las variables y el modelo matemático que describe la producción de hidrógeno en función de los tres factores. Este análisis se lo realizó usando el software Statgraphics versión de prueba 19.3.03.

**Tabla 3.** Variables y sus niveles para el diseño factorial completo de  $3^3$

Variable	Nivel codificado de variable		
	-1	0	+1
Voltaje (V)	6	9	12
Amperaje (A)	0.4	1	2
Biochar (g/L)	0	50	150

**Realizado por:** Oña, Andres 2024

**Tabla 4.** Diseño experimental factorial completo de 3<sup>3</sup>

<b>Corrida</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Amperaje (A)</b>	<b>Biochar (g/L)</b>
1	9,0	0,4	0,0
2	6,0	0,4	0,0
3	12,0	0,4	0,0
4	9,0	1	0,0
5	6,0	1	0,0
6	12,0	1	0,0
7	6,0	2,0	0,0
8	12,0	2,0	0,0
9	9,0	2,0	0,0
10	12,0	0,4	50
11	9,0	0,4	50
12	6,0	0,4	50
13	9,0	1	50
14	12,0	1	50
15	6,0	1	50
16	12,0	2,0	50
17	6,0	2,0	50
18	9,0	2,0	50
19	9,0	0,4	150,0
20	12,0	0,4	150,0
21	6,0	0,4	150,0
22	9,0	1	150,0
23	6,0	1	150,0
24	12,0	1	150,0
25	9,0	2,0	150,0
26	6,0	2,0	150,0
27	12,0	2,0	150,0

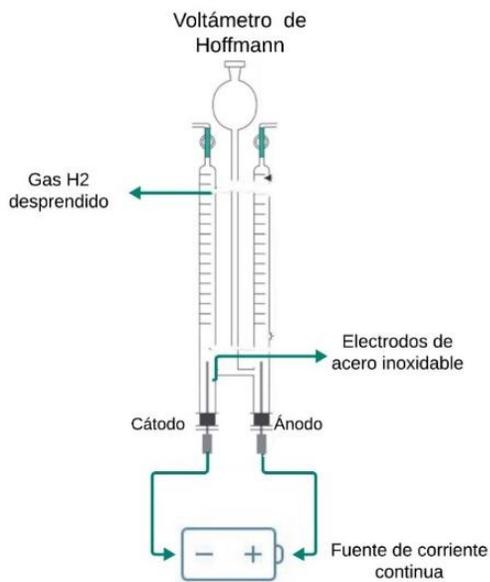
**Realizado por:** Oña, Andres 2024

## **2.10 Análisis estadístico**

Se realizó un ANOVA para el diseño factorial completo de  $3^3$  usando el software Statgraphics versión de prueba 19.3.03. Para todos los análisis, se consideró un p-value de 0,05 de significancia para un intervalo de confianza del 95%. En cuanto a la metodología de superficie de respuesta, se cambiaron los valores de dos elementos, voltaje y amperaje, mientras que el valor de biochar se permaneció constante en el nivel cero para crear los gráficos de superficie.

## **2.11 Ensayos con fuente de tensión de corriente continua**

Cada una de las combinaciones que se detallan en la tabla 4 se corrieron en un voltámetro de Hoffman marca Eisco ECHO137D de 200 ml de capacidad; con dos tubos colectores de gases graduados hacia abajo de 0 a 50 ml en incrementos de 0,2 ml y electrodos de acero inoxidable de 6 cm de largo como se observa en la figura (5). Este equipo se conectó a una fuente de corriente continua marca Manson HCS-3200 con un rango de potencia de 0 a 2 A y de 3 a 12 V. A medida que avanzaba la reacción química, el hidrógeno producido desplazaba el efluente del tubo colector. Al final se midió este desplazamiento como volumen de hidrógeno recolectado cada 30 minutos por tres horas y se determinó el caudal volumétrico promedio de gases en el cátodo combinando el volumen y el tiempo de prueba.



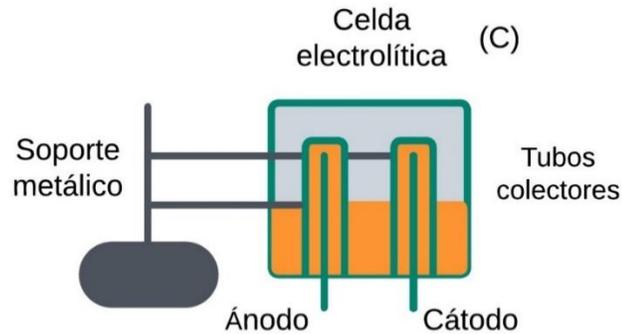
**Figura 5.** Equipo voltámetro de Hoffmann para la producción de hidrógeno mediante electrólisis.  
**Realizado por:** Oña, Andres 2024.

## 2.12 Diseño de la celda electrolítica

Se construyó una celda electrolítica a bajo costo en un contenedor de plástico con un volumen de trabajo de 3 litros para la producción de hidrógeno. Para esto se tomó como referencia la celda electrolítica diseñada por de Fátima Palhares et al [19]. Se utilizaron electrodos de acero inoxidable con una longitud de 6 cm y se insertaron en dos orificios en la base del reactor. Una parte de los electrodos se dejó fuera del reactor en un soporte de plástico hecho de ácido poliláctico en una impresora 3D FDTI para que hicieran contacto con el cableado eléctrico.

Para la recolección de hidrógeno se utilizaron dos jeringas de 50 ml de capacidad que fueron sujetadas con dos pinzas metálicas apoyadas a una base. Para saber la producción de hidrógeno, al igual que en el voltámetro, se midió a través del desplazamiento de los efluentes por las jeringas. La figura (6) muestra el diseño de la celda electrolítica con el uso de materiales a bajo costo.

(a) Diseño celda electrolítica



(b) Vista real celda electrolítica



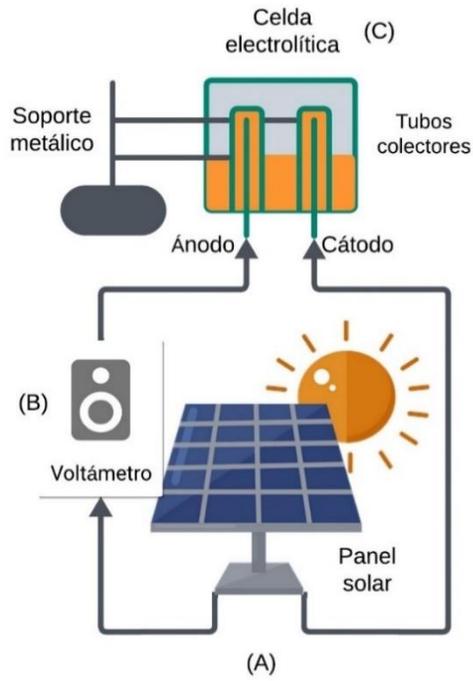
**Figura 6.** Electrolizador a bajo costo: (a) Esquema de la celda electrolítica diseñada; (b) Vista a escala real de la celda

Realizado por: Oña, Andres, 2024.

## 2.13 Producción de hidrógeno con el uso de una placa fotovoltaica

Para el proceso de electrólisis fotovoltaica se utilizó un volumen de dos litros de efluente con una concentración de biochar de 150 g/l y se llenaron en la celda electrolítica según la figura 6 b. Esta celda electrolítica se conectó directamente a un panel fotovoltaico de 50 W. La figura 7 muestra un esquema del sistema electrolizador- panel fotovoltaico que consiste en tres partes: (a) panel fotovoltaico, (b) medidor de amperaje y voltaje (c) electrolizador. Los experimentos se realizaron en la Universidad Regional Amazónica Ikiám en la ciudad de Tena durante dos días el 21 y 22 de diciembre del 2023 y también se tomaron datos de la irradiancia solar mediante el uso de la aplicación Solar Meter. La producción de hidrógeno se analizó exponiendo el panel fotovoltaico al sol de 9 am a 2 pm

con una inclinación con respecto al plano horizontal y una orientación hacia el norte, además se midió el voltaje y corriente eléctrica del sistema con el uso de un multímetro.



**Figura 7.** Ilustración del dispositivo experimental que utiliza el panel solar: (A) panel fotovoltaico, (B) voltámetro, (C) electrolizador.

**Realizado por:** Oña, Andres, 2024

## CAPÍTULO III: PRESENTACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS

### 3.1 Caracterización de efluentes del sistema de tratamientos de aguas residuales domésticas de la Universidad Regional Amazónica IKIAM

A continuación, se presentan los resultados de los diferentes parámetros fisicoquímicos de los efluentes, antes de ser utilizados en cada análisis. Estos análisis se realizaron siguiendo las metodologías especificadas en la Tabla 1. Se observa que el conjunto de muestras (EFL1, EFL2 y EFL3) muestra una notable similitud en cada uno de los parámetros, a pesar de las diferentes fechas de recolección, como se detalla en la Tabla 5. Sin embargo, la muestra EFL1 presenta ligeramente una mayor cantidad de sólidos totales con 483,7 mg/L, a diferencia de EFL3 con 415,3 mg/L. En cuanto a los sólidos volátiles, la muestra EFL2 experimenta un pequeño aumento en comparación con las demás. Otros parámetros, como el pH y la conductividad, muestran cambios mínimos que no son significativos.

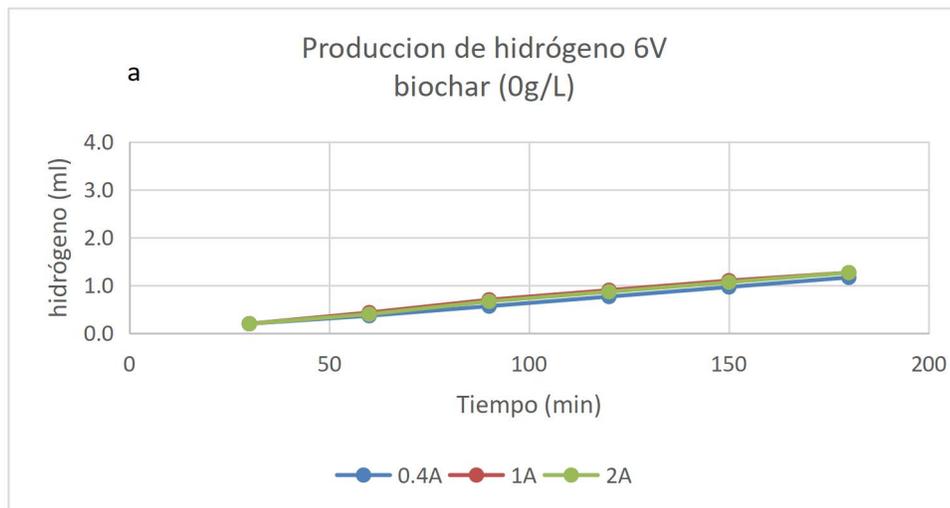
**Tabla 5.** Parámetros fisicoquímicos de los efluentes de la salida del biodigestor

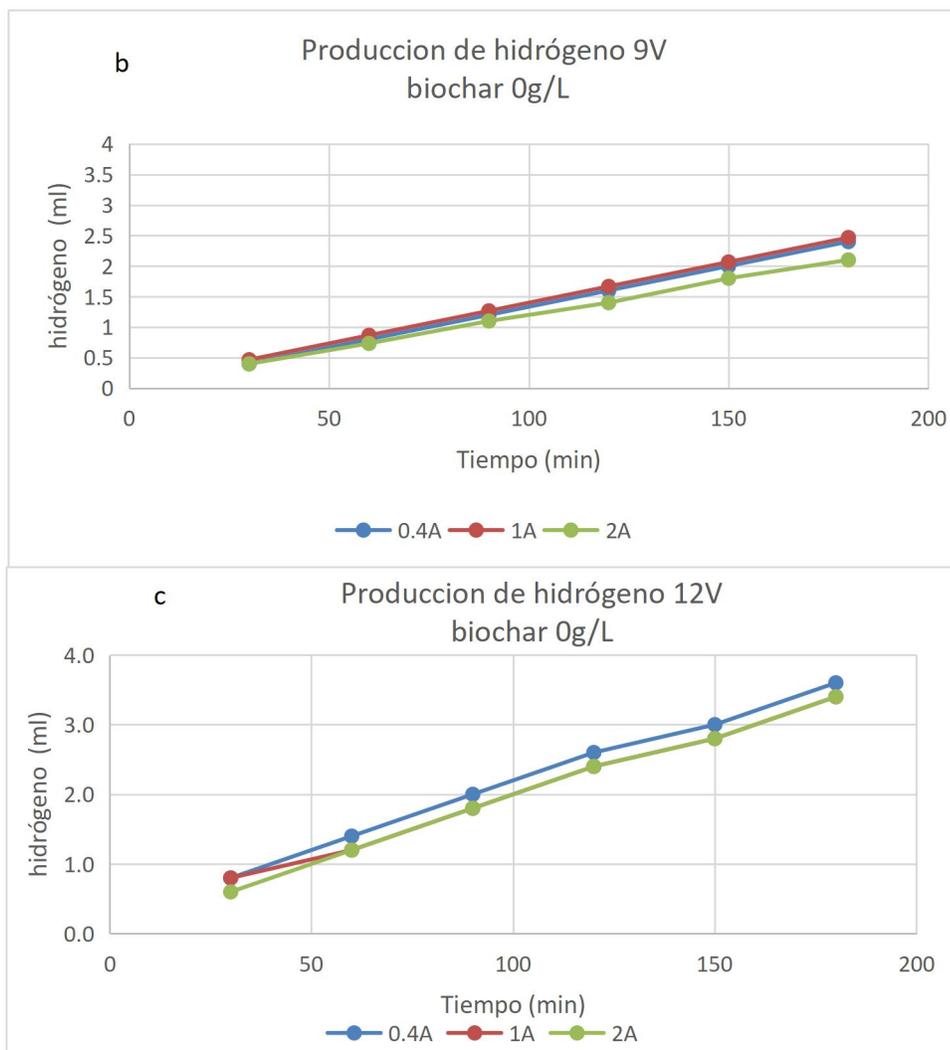
Parámetro	Unidad	Muestra		
		EFL1	EFL2	EFL3
Sólidos totales	mg/l	483,7	467,3	415,3
Sólidos volátiles		230,0	274,7	240,7
pH	-	7,08	7,17	7,02
Conductividad	ms/cm	1,43	1,48	1,44

Realizado por: Oña, Andres 2024

### 3.2 Estudio del primer análisis: Efecto del amperaje y voltaje en la producción de hidrógeno fijando una concentración de biochar 0 g/L

La figura 8 muestra la influencia de los voltajes 6 V, 9 V y 12 V y amperajes 0,4 A, 1 A, 2 A en la producción de hidrógeno. En todas las subfiguras (a, b, c) de la figura 8, se observa una producción lineal de hidrógeno (ml) en relación con el tiempo (min). Se aprecia que la cantidad de hidrógeno producido aumenta con cada uno de los voltajes utilizados, alcanzando la máxima producción de 3,4 ml en 3 horas con el voltaje máximo evaluado de 12 V, como se muestra en la Figura 8C. En la figura 8 a, la máxima producción de hidrógeno es 1,01 ml mientras que la figura 8 b, muestra una máxima cantidad de 2,5 ml de hidrógeno. Por otro lado, el análisis del amperaje no muestra una influencia significativa en la producción de hidrógeno. Cada amperaje de 0,4, 1 y 2 amperios y su interacción con cada uno de los voltajes, no genera un aumento o disminución significativos en la cantidad de hidrógeno producido. Estos resultados indican que el voltaje desempeña un papel más destacado en la producción de hidrógeno en comparación con el amperaje.





**Figura 8.** Efecto del voltaje 6 V (8 a), 9 V (8 b) y 12 V (8 c) en relación de los distintos amperajes en la producción de hidrógeno.  
Realizado por: Oña, Andres, 2024

### 3.2.1 Caracterización de los efluentes EFL1 después del primer análisis.

Después del proceso de electrólisis, se procedió a caracterizar los efluentes EFL1 correspondientes al primer análisis. En cada uno de los voltajes (6 V, 9 V y 12 V), se evidencia una disminución en la cantidad de sólidos totales y volátiles. El voltaje de 12 V exhibe el mayor porcentaje de reducción, con un 21,36% en sólidos totales y de 59,9% en sólidos volátiles. En el caso del voltaje de 9 V, se observa una reducción menor, alcanzando el 9,03% en sólidos totales y el 49,7% en sólidos volátiles. Finalmente, el voltaje de 6 V presenta una disminución de 7,03% en sólidos totales y de 29,71% en sólidos volátiles. Estos resultados indican que el aumento en el voltaje contribuye

significativamente a la reducción de sólidos en los efluentes analizados.

**Tabla 6.** Parámetros fisicoquímicos de los efluentes EFL1 después de la electrolisis.

Voltaje	Sólidos Totales (mg/L)		Sólidos Volátiles (mg/L)		pH	Conductividad (ms/cm)
	después	% remoción	después	% remoción		
6 V	441,3	7,03	159,6	29,71		
9 V	428,2	9,03	110,7	49,7	7,0	1,44
12 V	376,7	21,36	89,6	59,9		

Realizado por: Oña, Andres 2024.

### 3.3 Caracterización de biochar sintetizado para su uso como electrolito.

Los siguientes resultados presentan los análisis de los diversos parámetros fisicoquímicos de la síntesis de biochar, llevada a cabo siguiendo las metodologías detalladas en la Tabla 2. La síntesis de biochar arrojó una cantidad de sólidos totales y volátiles de 917,4 mg/g y 313,6 mg/g, respectivamente, una conductividad de 1,8 mS/cm y un pH de 8, según se detalla en la tabla 7.

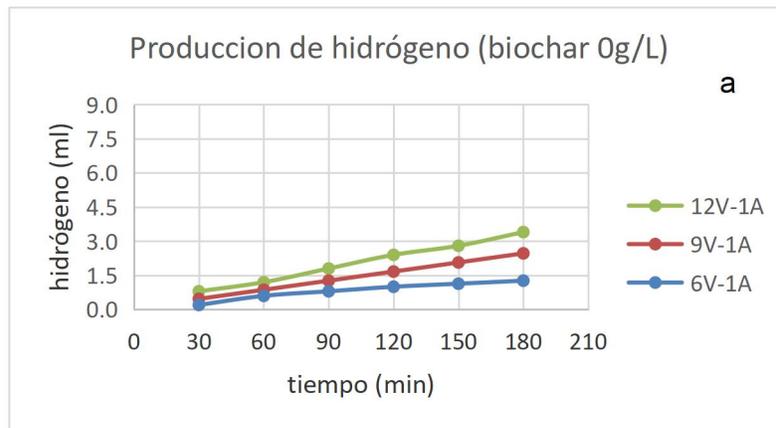
**Tabla 7.** Parámetros fisicoquímicos del biochar de *G. angustifolia* sintetizado.

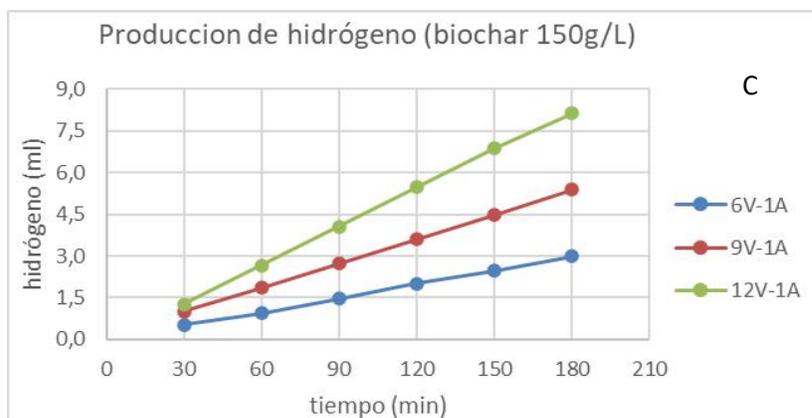
Parámetro	Unidad	Biochar <i>G. Angustifolia</i>
Sólidos Totales	mg/g	917,4
Sólidos Volátiles	mg/g	313,6
pH	-	8
Cenizas	%	6,65
Conductividad	ms/cm	1,8

Realizado por: Oña, Andres 2024

### 3.4 Estudio del segundo análisis: Efecto de las distintas concentraciones de biochar y voltaje para un amperaje constante de (1A)

La Figura 9 detalla la interacción entre los voltajes de 6 V, 9 V y 12 V, y las diversas concentraciones de biochar 0 g/L, 50 g/L y 150 g/L en la producción de hidrógeno, manteniendo un amperaje constante de 1 A. En cada una de las subfiguras (a, b, c) de la Figura 9, se observa una producción lineal de hidrógeno (ml) en relación con el tiempo (min). La producción de hidrógeno experimenta un incremento al suministrar un mayor voltaje y al agregar biochar. Con una concentración de 0 g/L, se registra una cantidad de hidrógeno de 3,4 ml a 12 V. Al aumentar la concentración a 50 g/L, la producción de hidrógeno se eleva a 5,4 ml a 12 V. Finalmente, con la concentración más alta de 150 g/L, se logra la máxima producción de 8,1 ml de hidrógeno con un voltaje de 12 V.





**Figura 9.** Producción de hidrógeno (ml) respecto al tiempo (min) con un amperaje de 0,4 A y concentraciones de biochar 0 g/L (a), 50 g/L (b), 150 g/L (c)  
**Realizado por:** Oña, Andres, 2024

### 3.4.1 Caracterización de los efluentes EFL2 después del segundo análisis.

Después del proceso de electrólisis, se procedió a caracterizar los efluentes EFL2 correspondientes al segundo análisis. Al disolver las concentraciones de biochar de 50 g/L y 150 g/L en los efluentes, se observó un aumento en la cantidad de sólidos totales, pH y conductividad debido a la carga orgánica que aportó el biochar. En la Tabla 8 se presenta la disolución de 50 g/L de biochar, donde se aprecia un incremento de 1454,7 mg/L en la cantidad de sólidos totales, 1,9 ms/cm en la conductividad y 8,9 en el pH. Por otra parte, la Tabla 9 muestra la disolución de 150 g/L de biochar, con un aumento de 1980,0 mg/L en la cantidad de sólidos totales y un incremento de 76,6 mg/L en los sólidos volátiles. En cuanto al pH y conductividad, se registra un incremento de 9,2 y 3,1 ms/cm, respectivamente.

**Tabla 8.** Caracterización fisicoquímica de efluente EFL2, después de la electrólisis disolución de 50 g/L

Voltios	Sólidos Totales (mg/L)			Sólidos Volátiles (mg/L)			pH	Conductividad (ms/cm)
	EFL2	Disolución	Después	EFL2	Disolución	Después		
6 V			1437,0	274,7		161,7		
9 V	467,3	1454,7	1428,0	274,7	218,7	115,7	8,9	1,9
12 V			1398,0	274,7		175,3		

Realizado por: Oña, Andres 2024

**Tabla 9.** Caracterización fisicoquímica de efluente (EFL2) después de la electrólisis disolución de 150 g/L

Voltios	Sólidos Totales (mg/L)			Sólidos Volátiles (mg/L)			pH	Conductividad (ms/cm)
	EFL2	Disolución	Después	EFL2	Disolución	Después		
6 V			1970,3			209,7		
9 V	467,3	1980,0	1954,0	274,7	351,3	297,3	9,2	3,1
12 V			1929,7			255,0		

Realizado por: Oña, Andres 2024

### 3.5 Análisis estadístico

#### 3.5.1 Análisis de la varianza del diseño factorial completo en la producción de hidrógeno

El análisis de la varianza (ANOVA) (Tabla 7) indica la influencia que tienen los distintos parámetros de operación en la producción de hidrógeno mediante los valores de p inferiores a 0,05 que muestran que la variable relacionada es significativa. Los valores del factor voltaje ( $X_1$ ) muestran una gran influencia, ya que tiene un p-value de 0,0000, de la misma manera la variable de biochar ( $X_3$ ) con un p-value de 0,0000. Todo esto muestra que influyen significativamente en el proceso de electrólisis. Todo lo contrario, sucede en el caso del amperaje ( $X_2$ ) que tiene un valor de p de 0,9322, lo cual muestra que no tiene significancia en la síntesis de hidrógeno. Por otro lado, la interacción entre variables  $X_1X_3$  (voltaje y biochar) muestran una alta significancia, ya que tienen un valor de p de 0,0000, mientras que las variables  $X_1X_2$  (voltaje y amperaje) y  $X_2X_3$  (amperaje y biochar) muestran p-values de 0,8989, 0,8584 respectivamente los cuales indican una baja

influencia. Todos los factores son estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95%. Además, se tiene un  $R^2$  del 99,04% donde se puede ver que el modelo tiene una gran capacidad de ajuste.

**Tabla 10.** Análisis de la varianza (ANOVA) para la producción de hidrógeno.

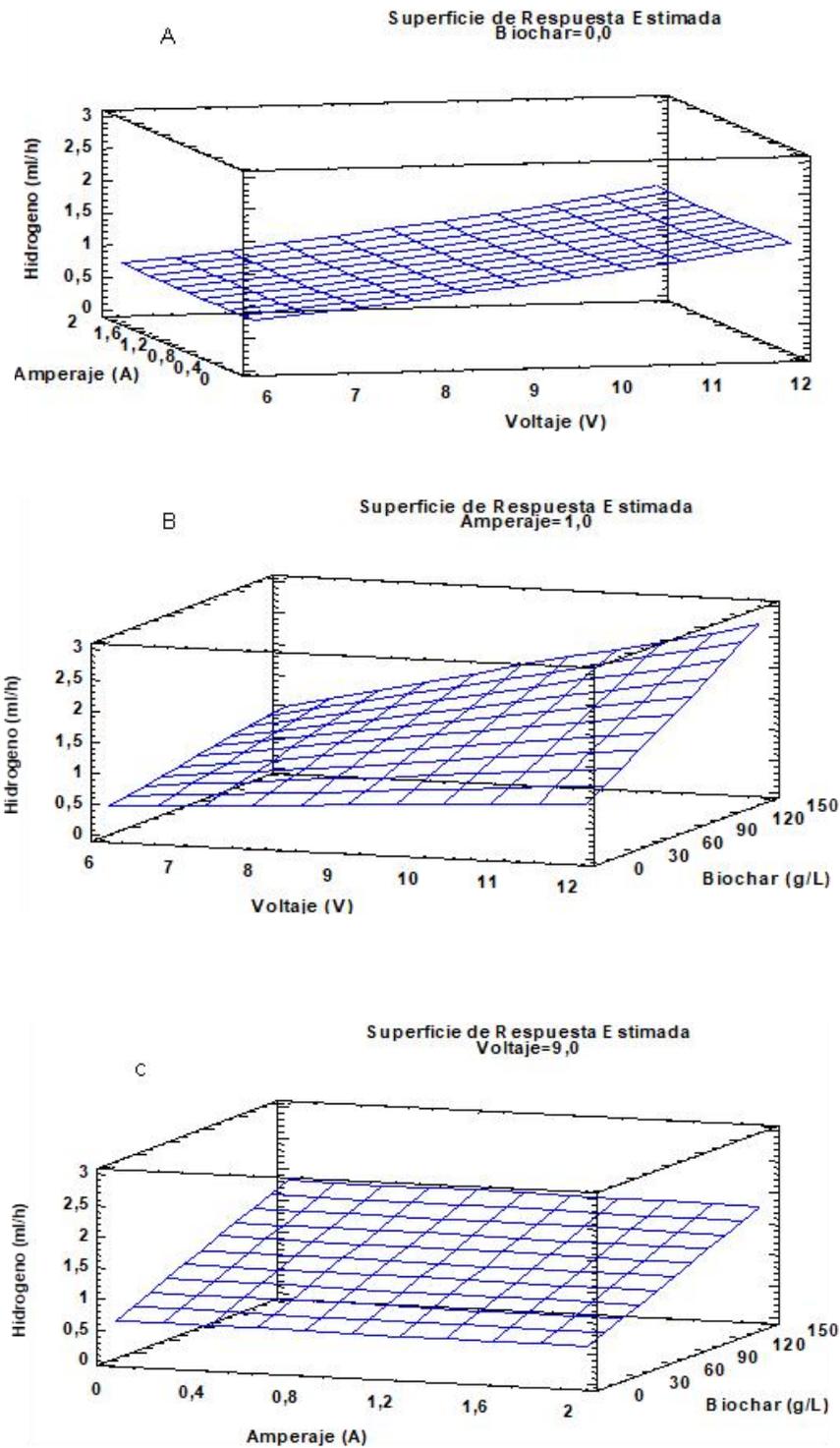
<b>Fuente</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Gl</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Razón-F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>X<sub>1</sub>: Voltaje</b>	4,79591	1	4,79591	664,86	<b>0,0000</b>
<b>X<sub>2</sub>: Amperaje</b>	0,0000537319	1	0,0000537319	0,01	0,9322
<b>X<sub>3</sub>: Biochar</b>	7,0416	1	7,0416	976,18	<b>0,0000</b>
<b>X<sub>1</sub>X<sub>1</sub></b>	0,0303407	1	0,0303407	4,21	0,0560
<b>X<sub>1</sub>X<sub>2</sub></b>	0,000119955	1	0,000119955	0,02	0,8989
<b>X<sub>1</sub>X<sub>3</sub></b>	1,29573	1	1,29573	179,63	<b>0,0000</b>
<b>X<sub>2</sub>X<sub>2</sub></b>	0,00113379	1	0,00113379	0,16	0,6967
<b>X<sub>2</sub>X<sub>3</sub></b>	0,000236519	1	0,000236519	0,03	0,8584
<b>X<sub>3</sub>X<sub>3</sub></b>	0,191334	1	0,191334	26,52	<b>0,0001</b>
<b>Error total</b>	0,122628	17	0,00721343		

Realizado por: statgraphics centurión software

### **3.5.2 Gráficas de superficie de los diferentes parámetros de operación que afectan a la electrólisis**

El gráfico de superficie de respuesta 3D se puede utilizar para calcular el nivel óptimo de cada variable para la máxima síntesis de hidrógeno como se puede observar en Fig. 10. En el gráfico de la superficie de respuesta, se construyó el eje Z (correspondiente a la producción de hidrógeno) frente a dos factores cualesquiera (voltaje amperaje; voltaje biochar; amperaje biochar), manteniendo la otra variable en su nivel ideal.

La Figura 10 representa la interacción de varios parámetros operativos en el proceso de electrólisis, como el voltaje, el amperaje y el biochar, con respecto a la producción de hidrógeno. En cada una de las subgráficas (A, B, C) de la Figura 10, no se observan puntos máximos ni curvaturas dentro del rango de estudio de los niveles. Sin embargo, todas las subgráficas de la Figura 10 muestran el comportamiento del sistema y establecen las condiciones de funcionamiento e interacción entre variables de operación, en el rango considerado. Además, indican el camino hacia el diseño y optimización de la operación del sistema, según el caso.



**Figura 10.** Análisis de la superficie de respuesta para la síntesis de hidrógeno respecto al amperaje y voltaje (A), voltaje y biochar (B), amperaje y biochar (C).

Realizado por: statgraphics centurión software

### 3.5.3 Análisis de resultados reales y previstos.

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante el diseño factorial completo 3<sup>3</sup> (Tabla 7), la corrida 19 muestra la mayor producción de hidrógeno (2,76 ml/h) en los valores observados y (2,72 ml/h) en el valor predicho usando un voltaje de 12 V, 1A y la máxima concentración de biochar de 150 g/l mientras que la corrida 2 muestra la actividad mínima (0,28 ml/h) con una configuración de 6 V, 0,4 A y sin ninguna adición de biochar.

**Tabla 11.** Resultados de valores reales y predichos por el diseño experimental.

Corrida	Configuración	Síntesis hidrogeno ml/h	
		Observados	Valores Ajustados
<b>Biochar 0 g/L</b>			
1	12 V- 0,4 A	1,11	1,01549
2	6 V- 0,4 A	0,39	0,437849
3	9 V- 0,4 A	0,80	0,830558
4	6 V- 1A	0,43	0,493085
5	12 V- 1A	1,02	0,993798
6	9 V- 1A	0,69	0,711213
7	6 V- 2A	0,43	0,516222
8	9 V- 2A	0,69	0,692674
9	12 V- 2A	1,11	1,011347
<b>Biochar 50 g/L</b>			
10	6 V- 1A	0,89	0,786477
11	12 V- 1A	1,52	1,62436
12	9 V- 1A	1,13	1,13431
13	12 V- 0,4 A	1,52	1,61051
14	6 V- 0,4 A	0,89	0,777321
15	9 V- 0,4 A	1,13	1,1228
16	6 V- 2A	0,89	0,799098
17	9 V- 2A	1,13	1,14067
18	12 V- 2A	1,52	1,62446
<b>Biochar 150 g/L</b>			
19	12 V- 1A	2,76	2,71654
20	6 V- 1A	1,0	1,01818
21	9 V- 1A	1,75	1,79625
22	12 V- 2A	1,0	1,01929
23	9 V- 2A	1,75	1,78043
24	12 V- 2A	2,76	2,69837
25	6 V- 0,4 A	1,0	1,01818

<b>26</b>	9 V- 0,4 A	1,75	1,7911
<b>27</b>	6 V- 0,4 A	2,76	2,70513

---

Realizado por: statgraphics centurión software

### 3.5.4 Modelo de regresión matemática

El modelo de regresión que se ha ajustado a los datos describe el estudio de varios parámetros de operación en el proceso de electrólisis y sus interacciones sobre la producción de hidrógeno. El modelo simplificado viene dado por la ecuación (3) y puede usarse para hacer predicciones sobre la respuesta para niveles dados de cada factor. La ecuación codificada es útil para identificar el impacto relativo de los factores comparando los coeficientes de los factores.

$$\begin{aligned}
 R = & 0,569891 - 0,0737604 X_1 - 0,0362488 X_2 + 0,0010151 X_3 + 0,00790123 X_1^2 - \\
 & 0,00130385 X_1 X_2 + 0,00143413 X_1 X_3 + 0,0231481 X_2^2 - 0,0000719145 X_2 X_3 \\
 & - 0,0000363704 X_3^2
 \end{aligned} \tag{3}$$

Donde R es la producción de hidrógeno,  $X_1$  es voltaje,  $X_2$  es amperaje y  $X_3$  es biochar. El signo positivo que precede a los términos indica un efecto de correlación, mientras que el signo negativo indica un efecto adverso sobre la síntesis de hidrógeno.

### 3.5.5 Maximización en la producción de hidrógeno

La tabla 12 muestra la combinación de los niveles de los tres factores, la cual maximiza el hidrógeno. Para una máxima producción de hidrógeno todos los valores menos el amperaje están en su índice más alto, voltaje de 12 voltios y niveles de concentración de biochar de 150 g/L mientras que el amperaje presenta un nivel óptimo de 0,4.

**Tabla 12.** Niveles óptimos de producción de hidrógeno

<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Máximo</b>
<b>Voltaje</b>	6,0	12,0	12,0
<b>Amperaje</b>	0,4	2,0	0,4
<b>Biochar</b>	0,0	150,0	150,0

Realizado por: statgraphics centurión software

### 3.6 Estado físico de los electrodos después del proceso de electrólisis.

Una vez se acabaron de analizar todos los parámetros y sus interacciones, se puede observar un desgaste pronunciado en el área superficial de los electrodos, en especial del ánodo (lado izquierdo) donde ocurría un proceso de electrocoagulación, ya que se trabaja con efluentes de aguas residuales domésticas.



**Figura 11.** Estado físico de los electrodos ánodo (lado izquierdo) y cátodo (lado derecho) después del proceso de electrólisis

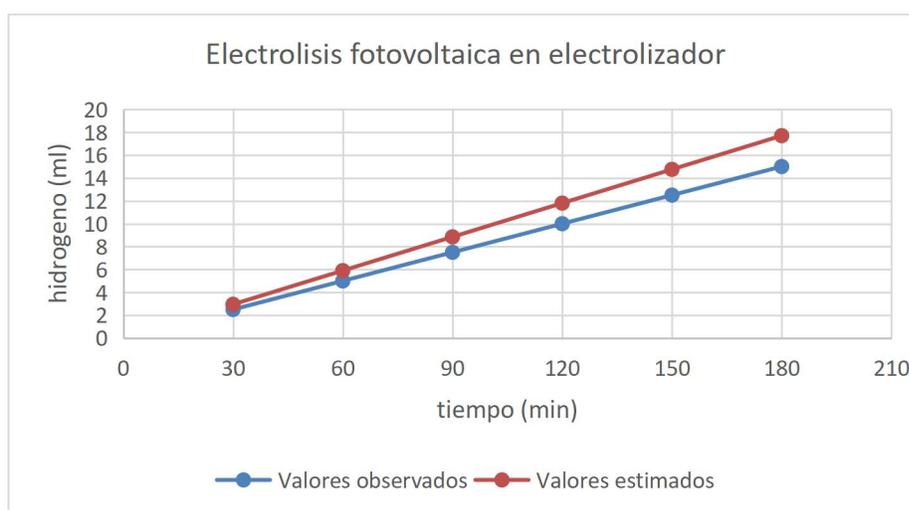
Tomada por: Oña, Andres, 2024

### 3.7 Producción de hidrógeno mediante electrólisis fotovoltaica

La síntesis de hidrógeno mediante electrólisis fotovoltaica muestra la viabilidad de producción autónoma de hidrógeno a escala real bajo las siguientes condiciones: punto máximo de irradiancia solar  $569 \text{ W/m}^2$  que muestra una configuración de  $17 \text{ V}$  y amperaje constante de  $1 \text{ A}$  en el panel fotovoltaico. La gráfica 12 muestra la producción de

hidrógeno (ml) respecto al tiempo (min) para los valores observados con el electrolizador a bajo costo (línea azul) con una producción máxima de 15 ml de hidrógeno en tres horas, mientras que el modelo matemático ajustado para la producción de hidrógeno en la ecuación (3) describe los valores estimados (línea naranja) con una máxima producción de 17,6 ml de hidrógeno

Los valores de las pendientes son de 5 ml/h en los valores observados y 5,9 ml/h en los valores estimados y su porcentaje de diferencia es del 18% lo que quiere decir que la producción de hidrógeno en el electrolizador es del 18% menos que los valores estimados.



**Figura 12.** Producción de hidrógeno mediante el uso de un panel fotovoltaico. Las condiciones fueron las mismas 150 g/L de biochar, 17 V y 1A para los dos valores.

**Realizada por:** Oña, Andres 2024

## CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### 4.1 Producción de hidrógeno mediante tecnologías a bajo costo

En el presente estudio, se logró sintetizar una cantidad de 1,01 ml/h de hidrógeno a 12 V y 1 A, utilizando los efluentes del sistema de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Regional Amazónica Ikiam. Al comparar estos resultados con otras investigaciones, se evidencia una menor producción de hidrógeno. Por ejemplo, en el estudio realizado por Ayman Oz et al. [24], se alcanzaron 129 ml/h de hidrógeno a 8 V utilizando efluentes de aguas residuales de almazara. Además, en el trabajo de Basem S et al. [38], se obtuvieron 16,04 ml/h de hidrógeno empleando efluentes sólidos (lodos residuales) en una celda electrolítica microbiana. La principal razón de estas investigaciones y el presente estudio radica en el tipo de efluentes utilizados y su carga orgánica [24].

Según el estudio de Atin K et al. [20] la presencia de sólidos orgánicos disueltos y iones en los efluentes aumenta la conductividad del medio, lo que a su vez incrementa la producción de hidrógeno. Por esta razón, las investigaciones de Ayman Oz et al. [24] y Basem S et al. [38] muestran una mayor producción, ya que tienen una alta cantidad de sólidos totales, con valores de 63729 mg/L y 5100 mg/L respectivamente, en comparación con este estudio, que registra una cantidad de 467,3 mg/L de sólidos totales.

Otros parámetros importantes son el pH y la conductividad. En la investigación realizada por Atin K et al. [20], se registró un pH de 8,66, lo que indica que el mecanismo de separación de las moléculas de agua está dominado por el ion  $\text{OH}^-$ . En los resultados obtenidos, se observó un pH ligeramente básico de 7,17. Además, la baja producción de hidrógeno en estos resultados puede estar relacionada con la conductividad del medio. Aumentar la cantidad de iones presentes en el medio (conductividad) reduce la resistencia a la corriente que pasa a través de la solución electrolítica, lo que puede aumentar la producción de hidrógeno [39]. En las investigaciones de Ayman Oz et al. [24] y Basem S et al. [38], se observaron valores más altos de conductividad, en un rango de 5 ms/m a

15 ms/cm, en comparación con los resultados obtenidos, que fueron de 1,4 ms/cm. Esta diferencia en la conductividad puede explicar la mayor producción de hidrógeno en esos estudios.

## **4.2 Influencia de los distintos parámetros de operación en el proceso de electrólisis**

### **4.2.1 Voltaje y Amperaje**

Cada una de las figuras y análisis estadísticos muestra que no existe una relación entre el amperaje y el voltaje. Según los datos del ANOVA y los análisis complementarios del diagrama de Pareto del (Anexo 1), la relación entre el voltaje y el amperaje no influye en el proceso de electrólisis. Sin embargo, los análisis indican que el voltaje por sí solo es uno de los parámetros de operación que más incide en la síntesis de hidrógeno, junto con el biochar, así como su interacción. Esta fuerte influencia se explica porque el voltaje determina tanto la tasa de producción como el tamaño de las burbujas de hidrógeno. Cuando hay una gran cantidad de burbujas de gran tamaño, se incrementa la eficiencia de la producción de gas hidrógeno [20].

Debido a esto, los resultados de este estudio revelan una relación directa entre la máxima producción de hidrógeno y el voltaje suministrado, que alcanzó 1,01 ml de hidrogeno a 12 V. Además, se observó una relación lineal entre la producción de hidrógeno (ml) y el tiempo (min) en cada uno de los análisis: voltaje, amperaje y voltaje, concentración de biochar. Este patrón de comportamiento coincide con la investigación de Ayman Oz et al. [24], quienes también encontraron una producción lineal de hidrógeno en relación con el tiempo al aplicar voltajes de 6 V, 8 V y 10 V. En su estudio, la máxima producción alcanzó los 1268 ml y estuvo estrechamente asociada al voltaje máximo de 10 V

Por otro lado, los resultados del análisis de varianza (ANOVA) indican que el amperaje no influye en la producción de hidrógeno, dado que su valor de p es mayor a 0,05. Este hallazgo se contrasta con la investigación llevada a cabo por Chakik F et al. [40], quienes exploraron el efecto del amperaje utilizando NaOH a 20 g/L como electrolito, dentro de un rango de 0,2 a 5 A, manteniendo un voltaje constante de 5 V. Sus resultados mostraron un aumento de 2ml a 6 ml de hidrógeno, al aumentar el amperaje suministrado de 0,2 a

0,5 amperios, en un lapso de 3 minutos. Una de las principales diferencias entre este estudio y el de Chakik et al. [40] es el voltaje aplicado: mientras que en este estudio se utilizaron voltajes más altos, de 6 V a 12 V, en el estudio de Chakik et al. [40] a se empleó un voltaje de 5 V. Al aumentar el voltaje suministrado, la corriente proporcionada por el amperaje se disipa en forma de calor debido al efecto Joule, lo que no afecta la producción de hidrógeno. Además, la alta resistencia generada por la baja conductividad del electrolito también puede contribuir a la pérdida de amperaje en forma de calor. En nuestro estudio, la mayor conductividad registrada fue de 3.1 ms/cm, aportada por el biochar en una concentración de 150 g/L. En contraste, en el trabajo de Chakik et al. [40] se utilizaron electrolitos químicos como NaOH, que poseen una alta conductividad, aportando alrededor de 650000 ms/cm en una concentración del 20% al 30% p/p.

#### ***4.2.2 Uso de biochar como electrolito para la producción de hidrógeno***

La concentración de biochar es otro parámetro que afecta significativamente la producción de hidrógeno con un valor de p de 0.0000. Además, se revela que el biochar tiene el efecto principal en la producción de hidrógeno con más del 30% de efecto estandarizado según los análisis complementarios del diagrama de Pareto (Anexo 1). La principal razón se debe a la contribución de la conductividad aportada por el biochar en el proceso de electrólisis. Según la investigación de Otterson D [41], la capacidad de un electrolito para conducir electricidad se evalúa en función de su conductividad eléctrica. Si un electrolito es fuerte, puede disociarse completamente en el medio y generar una gran cantidad de iones que facilitan el paso de la corriente eléctrica hacia los electrodos. Estos hallazgos coinciden con los resultados de esta investigación, donde se observa un aumento gradual en la conductividad al incorporar 50 g/l y 150 g/l de biochar, respectivamente, pasando de 1,4 ms/cm en los efluentes a 2 ms/cm y 3,1 ms/cm, respectivamente.

Estos resultados muestran las propiedades electroquímicas que tiene el biochar. Hay varias investigaciones donde indican que estas propiedades electroquímicas como la conductividad del biochar se controla por la velocidad de calentamiento y la temperatura máxima de calentamiento del proceso de síntesis del biochar. Según Yuan [31] en su estudio de aplicaciones del biocarbon en reacciones mediadas por redox, menciona que el biochar tiene la capacidad de dar y recibir electrones. Cuando se calienta a

temperaturas superiores a 600°C, se vuelven conductores. Esto es debido a que tienen una mayor proporción de carbonos híbridos  $sp^2$  lo que a su vez lleva al crecimiento de compuestos aromáticos [31].

Varias investigaciones respaldan estos resultados, como el estudio de Amikam et al. [33], que utilizó una concentración de 150 g/L de biochar en suspensión con ácido  $H_2SO_4$  para el proceso de electrólisis. Su investigación demostró que el biochar contribuyó con una densidad de corriente de 50 mA/cm<sup>2</sup> equivalente al 97.8% de eficiencia de corriente para la evolución del hidrógeno [33]. A diferencia de los resultados de este estudio, el aporte del biochar en la investigación de Amikam et al. [33] se midió en términos de densidad de corriente basada en el tamaño de las partículas de biocarbón. Sin embargo, ambos contribuyen a la producción de hidrógeno. Al final la relación entre el voltaje y concentración de biochar es la más influyente en el proceso de producción de hidrogeno mediante electrolisis con un valor de p de 0.000 y un porcentaje del 15% del efecto estandarizado del diagrama de Pareto.

#### **4.2.3 Proceso de coagulación**

En el proceso de electrólisis del agua normalmente se tiene dos productos como el hidrógeno y oxígeno, sin embargo, cuando se trabaja con efluentes o aguas residuales ocurre otro proceso en el ánodo denominado electrocoagulación [20]. Según Kobya et al [42] ocurre una oxidación en el ánodo que da a la formación de coágulos y de adsorción de contaminantes solubles y eliminación mediante sedimentación o flotación. Esto hace que el ánodo pierda su estructura y área superficial de contacto, tal y como se observa en la figura 10a.

Esto tal vez puede tener un efecto en la producción de hidrógeno, sin embargo, durante todo el proceso no se ha encontrado una variación significativa, a pesar de esto si se encuentra una disminución de los sólidos totales y volátiles de 1454,7 mg/L a 1398,0 mg/L a 12 V después del proceso de electrólisis. Esto se atribuye principalmente a la formación de flóculos y precipitados que ocurrían en el ánodo. La mayoría de los estudios de producción de hidrógeno con aguas residuales como Ayman Oz et al. [24] reportan una disminución de los contaminantes como sólidos totales, volátiles, DQO, color, turbidez y

un incremento en el pH, sin embargo, no reporta una disminución en la tasa de producción de hidrógeno.

### **4.3 Producción de hidrógeno a partir de electrólisis fotovoltaica**

Los resultados muestran una producción de 5,9 ml/h de hidrógeno en los valores estimados y una producción de 5 ml/h en los valores observados, esto indica una disminución del 18% respecto a los resultados predichos por el modelo descrito en la ecuación (3). Esta pérdida está asociada a dos factores externos, el primero se debe a los materiales con los que se construyó el electrolizador de bajo costo, ya que al ser de plástico las burbujas de hidrógeno se adhieren a las paredes, lo que disminuye el desplazamiento de hidrógeno [43]. El otro factor se debe al funcionamiento de los paneles fotovoltaicos, ya que la cantidad de carga eléctrica que puede suministrar al prototipo varía dependiendo los cambios de temperatura e irradiación solar que se tenga en ese momento [44]

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se exploró la viabilidad de producción de hidrógeno y se descubrió que los efluentes pueden sintetizar 1,05 ml/h a 12 V, gracias a su elevada concentración de iones disueltos, lo que aumenta la conductividad del medio. Además, se observó un proceso de electrocoagulación en el electrodo ánodo, lo que impide la generación de gas oxígeno.

Se determinó que los parámetros de operación, como el voltaje, influyen significativamente ( $p < 0,05$ ) en el proceso de electrólisis, mientras que la producción de hidrógeno muestra una relación lineal y proporcional con el voltaje. Por otro lado, factores como el amperaje no mostraron una influencia significativa ( $p = 0,9322$ ,  $p < 0,05$ ). Por lo tanto, la producción óptima se logra con 0,4 A, 12 V y 150 g/L de biochar.

Se analizó el papel del biochar como electrolito, y se observó un incremento en la conductividad del medio. Este aumento se reflejó en una mayor producción de hidrógeno, alcanzando 1,52 ml/h y 2,76 ml/h para la primera y segunda concentración, respectivamente, a 12 V.

Se desarrolló un prototipo de electrolizador-panel fotovoltaico que generó aproximadamente 15 ml de hidrógeno en tres horas a 17 V, considerando la irradiancia solar de Tena. Se observó una pérdida del 15% en comparación con los valores predichos.

Se sugiere realizar un análisis más exhaustivo de las propiedades electroquímicas del biochar y los tipos de biochar que podrían mejorar el rendimiento como electrolito en la celda electrolítica.

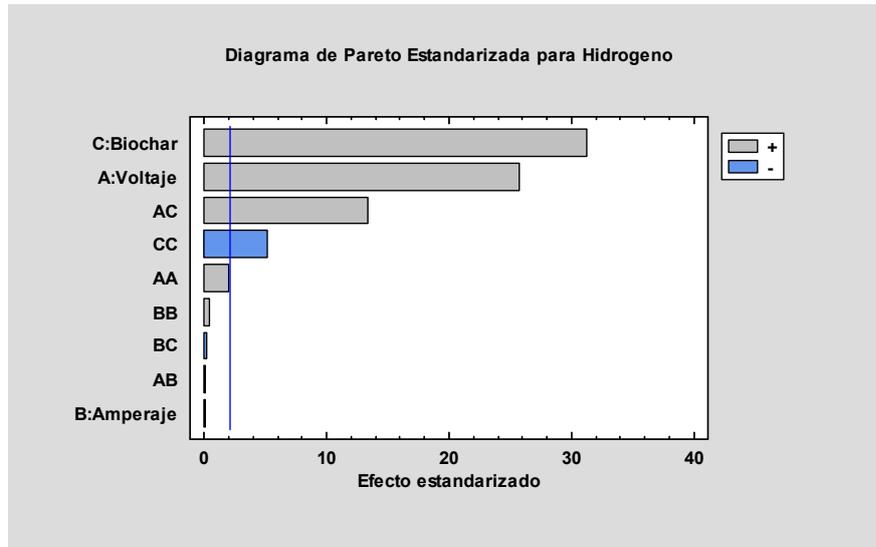
## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Wang B, Liu W, Zhang Y, Wang A. Bioenergy recovery from wastewater accelerated by solar power: Intermittent electro-driving regulation and capacitive storage in biomass. *Water Res.* 2020;175. doi:10.1016/j.watres.2020.115696
2. Ochoa H. Evaluación de la co-digestión de sustratos agroindustriales y animales como estrategia para superar la inhibición de la digestión anaerobia asistida con una celda microbiana de electrólisis. Universidad Nacional de San Agustín Arequipa . 2019. Available: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12773/12935/UPoccoh.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
3. Nieto J, Carpintero Ó, Miguel LJ, de Blas I. Macroeconomic modelling under energy constraints: Global low carbon transition scenarios. *Energy Policy.* 2020;137. doi:10.1016/j.enpol.2019.111090
4. Espinoza VS, Fontalvo J, Ramírez P, Martí-Herrero J, Mediavilla M, Cauce D. Energy transition scenarios for fossil fuel rich developing countries under constraints on oil availability: The case of Ecuador. Available: <https://ssrn.com/abstract=4208691>
5. Antukh T, Lee I, Joo S, Kim H. Hydrogenotrophs-Based Biological Biogas Upgrading Technologies. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology.* Frontiers Media S.A.; 2022. doi:10.3389/fbioe.2022.833482
6. Angelidaki I, Treu L, Tsapekos P, Luo G, Campanaro S, Wenzel H, et al. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances.* Elsevier Inc.; 2018. pp. 452–466. doi:10.1016/j.biotechadv.2018.01.011
7. Bassani I, Kougias PG, Treu L, Angelidaki I. Biogas Upgrading via Hydrogenotrophic Methanogenesis in Two-Stage Continuous Stirred Tank Reactors at Mesophilic and Thermophilic Conditions. *Environ Sci Technol.* 2015;49: 12585–12593. doi:10.1021/acs.est.5b03451
8. Kougias PG, Treu L, Benavente DP, Boe K, Campanaro S, Angelidaki I. Ex-situ biogas upgrading and enhancement in different reactor systems. *Bioresour Technol.* 2017;225: 429–437. doi:10.1016/j.biortech.2016.11.124
9. Zhang L, Kuroki A, Tong YW. A Mini-Review on In situ Biogas Upgrading Technologies via Enhanced Hydrogenotrophic Methanogenesis to Improve the Quality of Biogas From Anaerobic Digesters. *Frontiers in Energy Research.* Frontiers Media S.A.; 2020. doi:10.3389/fenrg.2020.00069
10. Kougias PG, Treu L, Benavente DP, Boe K, Campanaro S, Angelidaki I. Ex-situ biogas upgrading and enhancement in different reactor systems. *Bioresour Technol.* 2017;225: 429–437. doi:10.1016/j.biortech.2016.11.124
11. Shiva Kumar S, Lim H. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy Reports.* Elsevier Ltd; 2022. pp. 13793–13813. doi:10.1016/j.egy.2022.10.127
12. Ayman Oz N, Cagla Uzun Eker A. Simultaneous hydrogen production and pollutant removal from olive mill wastewaters using electrohydrolysis process. *Chemosphere.* 2019;232: 296–303. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.05.125
13. Oliveira AM, Beswick RR, Yan Y. A green hydrogen economy for a renewable energy society. *Current Opinion in Chemical Engineering.* Elsevier Ltd; 2021. doi:10.1016/j.coche.2021.100701

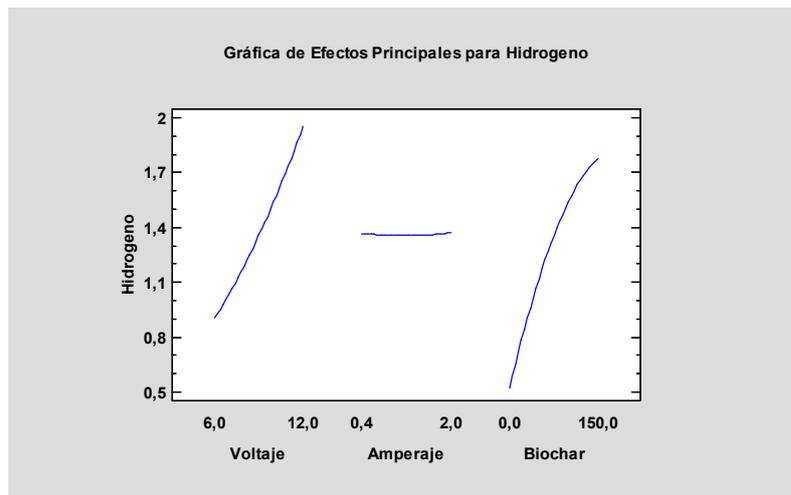
14. Osman AI, Mehta N, Elgarahy AM, Hefny M, Al-Hinai A, Al-Muhtaseb AH, et al. Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH; 2022. pp. 153–188. doi:10.1007/s10311-021-01322-8
15. Wulf C, Linssen J, Zapp P. Power-to-gas-concepts, demonstration, and prospects. *Hydrogen Supply Chain: Design, Deployment and Operation*. Elsevier; 2018. pp. 309–345. doi:10.1016/B978-0-12-811197-0.00009-9
16. Götz M, Lefebvre J, Mörs F, McDaniel Koch A, Graf F, Bajohr S, et al. Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. *Renewable Energy*. Elsevier Ltd; 2016. pp. 1371–1390. doi:10.1016/j.renene.2015.07.066
17. Reansuwan K, Jawana R, Nitayavardhana S, Koonaphapdeelert S. Cost effective in-situ methane enrichment for chicken farm biogas system. *Bioresour Technol Rep*. 2021;15. doi:10.1016/j.biteb.2021.100773
18. Jiang T. Development of Alkaline Electrolyzer Electrodes and Their Characterization in Overall Water Splitting. Franche-Comté, ; 2021 Jun. Available: <https://theses.hal.science/tel-03270903>
19. de Fátima Palhares DDA, Vieira LGM, Damasceno JJR. Hydrogen production by a low-cost electrolyzer developed through the combination of alkaline water electrolysis and solar energy use. *Int J Hydrogen Energy*. 2018;43: 4265–4275. doi:10.1016/j.ijhydene.2018.01.051
20. Pathak AK, Kothari R, Tyagi V V., Anand S. Integrated approach for textile industry wastewater for efficient hydrogen production and treatment through solar PV electrolysis. *Int J Hydrogen Energy*. 2020;45: 25768–25782. doi:10.1016/j.ijhydene.2020.03.079
21. Chi J, Yu H. Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis*. Science Press; 2018. pp. 390–394. doi:10.1016/S1872-2067(17)62949-8
22. Gao F-Y, Yu P-C, Gao M-R. Seawater electrolysis technologies for green hydrogen production: challenges and opportunities. *Curr Opin Chem Eng*. 2022;36: 100827. doi:10.1016/j.coche.2022.100827
23. Mohammed-Ibrahim J, Moussab H. Recent advances on hydrogen production through seawater electrolysis. *Mater Sci Energy Technol*. 2020;3: 780–807. doi:10.1016/j.mset.2020.09.005
24. Ayman Oz N, Cagla Uzun Eker A. Simultaneous hydrogen production and pollutant removal from olive mill wastewaters using electrohydrolysis process. *Chemosphere*. 2019;232: 296–303. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.05.125
25. Li W, Tian H, Ma L, Wang Y, Liu X, Gao X. Low-temperature water electrolysis: fundamentals, progress, and new strategies. *Mater Adv*. 2022;3: 5598–5644. doi:10.1039/D2MA00185C
26. D' Silva TC, Isha A, Chandra R, Vijay VK, Subbarao PM V., Kumar R, et al. Enhancing methane production in anaerobic digestion through hydrogen assisted pathways – A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd; 2021. doi:10.1016/j.rser.2021.111536
27. Balagurusamy N, Chandel AK. Biogas production: From anaerobic digestion to a sustainable bioenergy industry. *Biogas Production: From Anaerobic Digestion to a Sustainable Bioenergy Industry*. Springer International Publishing; 2021. doi:10.1007/978-3-030-58827-4
28. Schievano A, Adani F, Tambone F, Giuliana D'imporzano B, Scaglia P, Luigi G. What is the digestate? Italy ; 2011.
29. Wang M, Wang Z, Gong X, Guo Z. The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd; 2014. pp. 573–588. doi:10.1016/j.rser.2013.08.090

30. Gabhi RS, Kirk DW, Jia CQ. Preliminary investigation of electrical conductivity of monolithic biochar. *Carbon N Y*. 2017;116: 435–442. doi:10.1016/j.carbon.2017.01.069
31. Yuan Y, Bolan N, PrévotEAU A, Vithanage M, Biswas JK, Ok YS, et al. Applications of biochar in redox-mediated reactions. *Bioresource Technology*. Elsevier Ltd; 2017. pp. 271–281. doi:10.1016/j.biortech.2017.06.154
32. Rahman MZ, Edvinsson T, Kwong P. Biochar for electrochemical applications. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. Elsevier B.V.; 2020. pp. 25–30. doi:10.1016/j.cogsc.2020.04.007
33. Amikam G, Fridman-Bishop N, Gendel Y. Biochar-Assisted Iron-Mediated Water Electrolysis Process for Hydrogen Production. *ACS Omega*. 2020;5: 31908–31917. doi:10.1021/acsomega.0c04820
34. Filippov SP, Yaroslavtsev AB. Hydrogen energy: development prospects and materials. *Russian Chemical Reviews*. 2021;90: 627–643. doi:10.1070/rcr5014
35. Garfi M, Cadena E, Pérez I, Ferrer I. Technical, economic and environmental assessment of household biogas digesters for rural communities. *Renew Energy*. 2014;62: 313–318. doi:10.1016/j.renene.2013.07.017
36. Curto D, Martín M. Renewable based biogas upgrading. *J Clean Prod*. 2019;224: 50–59. doi:10.1016/j.jclepro.2019.03.176
37. Singh B, Shen Q, Arbestain MC, Dolk MM, Camps-Arbestain M. Chapter 3. Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. 2017. Available: <https://www.researchgate.net/publication/319206365>
38. Zakaria BS, Lin L, Dhar BR. Shift of biofilm and suspended bacterial communities with changes in anode potential in a microbial electrolysis cell treating primary sludge. *Science of the Total Environment*. 2019;689: 691–699. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.06.519
39. Mandal B, Sirkar A, De P, Baran Kuila S. Studies on the effect of electrolyte concentration on alkaline electrolysis and ion exchange membrane water splitting for production of hydrogen. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*. India ; 2016 Jan. Available: <http://www.esatjournals.org>
40. Chakik F ezzahra, Kaddami M, Mikou M. Effect of operating parameters on hydrogen production by electrolysis of water. *Int J Hydrogen Energy*. 2017;42: 25550–25557. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.07.015
41. Otterson DW. Tech talk: (10) Electrolytic conductivity measurement basics. *Measurement and Control (United Kingdom)*. 2015;48: 239–241. doi:10.1177/0020294015600473
42. Kobya M, Can OT, Bayramoglu M. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *J Hazard Mater*. 2003;100: 163–178. doi:10.1016/S0304-3894(03)00102-X
43. Ursúa A, Gandía LM, Sanchis P. Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends. *Proceedings of the IEEE*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2012. pp. 410–426. doi:10.1109/JPROC.2011.2156750
44. de Fátima Palhares DDA, Vieira LGM, Damasceno JJR. Hydrogen production by a low-cost electrolyzer developed through the combination of alkaline water electrolysis and solar energy use. *Int J Hydrogen Energy*. 2018;43: 4265–4275. doi:10.1016/j.ijhydene.2018.01.051

## ANEXOS



**Anexo 1.** El gráfico de Pareto muestra cada uno de los efectos estimados en orden decreciente de importancia.



**Anexo 2.** Esta gráfica muestra los estimados de Hidrogeno como una función de cada factor experimental.