

Evaluación de la producción de biohidrógeno por fermentación oscura de las aguas del tanque de acidificación de la PTAR Alpina Sopo

Paola Acevedo, Iván Cabeza, Fredy Martínez.

1. Introducción

Las demandas energéticas requieren nuevos desarrollos metodológicos e investigativos que permitan generar fuentes renovables de energía, para disminuir los gases de efecto invernadero, producto de la combustión y de los manejos de los combustibles fósiles y sus derivados. Los sistemas agroalimentarios desempeñan un factor informante dentro de la economía y desarrollo de los países y son quienes pueden aportar al mejoramiento ambiental sostenible (Abad-Segura et al., 2021). Una de las formas más eficientes y amigables de energía limpia, es la implementación de nuevas fuentes de hidrógeno.

Estas necesidades requieren la búsqueda de fuentes alternativas que permitan obtener hidrógeno de forma económica y que sea accesible a las diferentes sociedades y comunidades, estimulando su desarrollo socioeconómico disminuyendo las afectaciones en la producción de sustancias contaminantes al medio ambiente integrando los residuos como fuentes de valor sostenible (Dahiya S. 2021).

Una alternativa para la producción de hidrógeno es la fermentación oscura debido al proceso de degradación de sustratos ricos en carbohidratos, por medio de bacterias anaerobias en condiciones específicas como pH, tiempo de retención hidráulico, temperatura entre otros, este proceso tiene características similares a la digestión anaerobia (Rangel, C. 2021).

En la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa Alpina planta Sopó, en su diseño y estructura, cuenta con equipos que permiten realizar un pretratamiento al agua residual por

medio de presurización que inyectan aire en microburbujas. Una vez realizado este proceso se adicionan sustancias químicas como floculante y coagulante que permiten retirar los sólidos suspendidos presentes en el agua a tratar.

Una vez finalizado este proceso, los sólidos retirados son enviados a digestores anaerobios para su transformación biológica y el agua separada es almacenada en un tanque de acidificación, que luego será enviada al reactor tipo UASB para su transformación biológica a biogás.

Es en este punto (tanque de acidificación), se pretende determinar si los compuestos o componentes orgánicos presentes en esta estructura, pueden a través de la fermentación oscura generar o producir hidrógeno para evaluar su potencial energético. Teniendo en cuenta que las industrias, en este caso los lácteos, en su diversidad de procesos pueden aprovechar con mayor eficiencia la producción de energía por este método.

La generación de residuos son proporcionales al aumento en las demandas de energía (Dahiya S. 2021), por lo que es claro que el aprovechamiento de residuos y su transformación en energía, constituyen el pilar de la sostenibilidad. Es importante el dimensionamiento de las biorrefinerías de acuerdo a sus capacidades de generación y transformación, derivados de las propiedades de los Ácidos Grasos Volátiles (AGV's) por sus características de degradación (Patrick T. 2021).

Revisando los datos recolectados de la planta de tratamiento de Alpina Sopó, se determinó

que en promedio se alimenta con 105 m³/hora de aguas residuales industriales, para su almacenamiento en el Tanque de Igualación y Homogeneización (TIH) de 850 m³, la planta tiene una capacidad de tratamiento de 120 m³/hora, este tipo de residuo contienen un alto contenido de materia orgánica que puede afectar los ecosistemas y el medio ambiente.

El agua resultante de este proceso, es enviada al tanque de almacenamiento de acidificación, con una capacidad de 400 m³ en el que puede tener un tiempo de retención hidráulico de 3 a 4 horas para permitir la hidrólisis de algunos componentes como carbohidratos, proteínas, azúcares entre otros que se encuentran disueltos en el agua.

Dado lo expuesto anteriormente, la pregunta de investigación que se resolverá con el desarrollo del presente proyecto es: ¿Cuál es la viabilidad técnica y económica de producir biohidrógeno a partir de las aguas provenientes del tanque de acidificación de la planta de tratamiento de aguas residuales de la planta Alpina Sopó mediante un proceso de fermentación oscura?

Es conveniente evaluar la viabilidad técnica y económica de producir biohidrógeno por medio de la fermentación oscura de las aguas del tanque de acidificación, permite conocer y dimensionar sus características con los posibles elementos de valor que conlleven a nuevos planteamientos y estudios que determinen con más amplitud su aprovechamiento.

Los datos en la evaluación de producción de biohidrógeno en las aguas residuales del sector lácteo son escasas y no se cuenta con un planteamiento que permita modelar un sistema de análisis con el fin de establecer los usos y aprovechamiento en la formación del biohidrógeno.

Utilizar los residuos industriales es uno de los caminos para aumentar la eficiencia energética. Este estudio es importante porque permite analizar la viabilidad técnica y económica para la producción y obtención de

biohidrógeno por el método de fermentación oscura (Fernández C. 2016), para el sector lácteo a la que pertenece la empresa Alpina en la planta de Sopó.

2. METODOLOGÍA.

La metodología se trabajó en tres fases principales: 1) caracterización del agua del tanque de acidificación, 2) Diseño experimental para la determinación del potencial de producción de biohidrógeno, 3) Desarrollo de los experimentos y análisis de resultados, tal y como se observa en la figura 1.

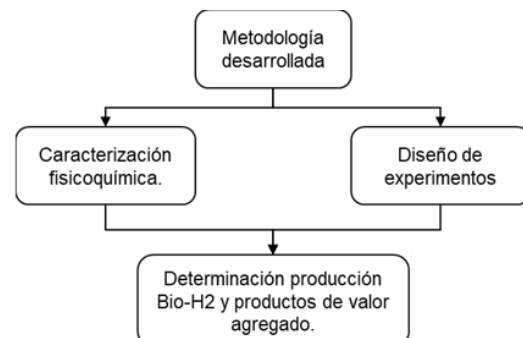


Figura 1. Diagrama metodológico.

Se tomó una muestra aleatoria de agua del tanque de acidificación (ATA) que alimenta el reactor anaerobio de la planta de tratamiento de agua residual en la planta de Alpina Sopó, realizando una caracterización en los siguientes parámetros.

PARAMETRO	NORMA
pH	NTC 3651
Sólidos totales	Método gravimétrico SM 2540
Sólidos volátiles	ASTM D3174
DQO	NTC ISO/IEC 17025/2005
Alcalinidad	NTC 4803
AGV	NTC 5532

Tabla 1. Parámetros de análisis al agua del tanque de acidificación.

Se planteo un diseño experimental para evaluar la concentración del ATA y la proporción de mezcla de los sólidos volátiles del sustrato e inóculo en las pruebas (S/X), como se observa en la tabla 2.

COMBINACION	ENSAYO	S/X	DQO (g/L)	ATA (ml)	INOCULO (ml)	H2O (ml)	Vol. TOTAL (ml)
1	C1	1,00	1,00	105,82	8,96	85,22	200,0
2	C8	1,00	0,60	63,49	5,38	131,13	200,0
3	C3	1,00	0,20	21,16	1,79	177,04	200,0
4	C7	0,60	1,00	105,82	14,93	79,25	200,0
5	C2	0,60	0,60	63,49	8,96	127,55	200,0
6	C9	0,60	0,20	21,16	2,99	175,85	200,0
7	C4	0,20	1,00	105,82	44,80	49,38	200,0
8	C5	0,20	0,60	63,49	26,88	109,63	200,0
9	C11	0,20	0,20	21,16	8,96	169,88	200,0

Tabla 2. Diseño experimental para tratamiento por el método de fermentación oscura.

De acuerdo con los datos obtenidos en el proceso de caracterización, se obtuvieron los volúmenes de sustrato e inóculo requeridos en el proceso experimental (ver tabla 3).

COMBINACION	ENSAYO	S/X	DQO (g/L)	ATA (ml)	INOCULO (ml)	H2O (ml)	Vol. TOTAL (ml)
1	C1	1,00	1,00	105,82	8,96	85,22	200,0
2	C8	1,00	0,60	63,49	5,38	131,13	200,0
3	C3	1,00	0,20	21,16	1,79	177,04	200,0
4	C7	0,60	1,00	105,82	14,93	79,25	200,0
5	C2	0,60	0,60	63,49	8,96	127,55	200,0
6	C9	0,60	0,20	21,16	2,99	175,85	200,0
7	C4	0,20	1,00	105,82	44,80	49,38	200,0
8	C5	0,20	0,60	63,49	26,88	109,63	200,0
9	C11	0,20	0,20	21,16	8,96	169,88	200,0

Tabla 3. Diseño experimental para tratamiento por el método de fermentación oscura.

Realizando una variación en el sustrato/inoculo (S/X) de 1,00 – 0,6 – 0,2, con pruebas realizadas a temperatura constante de 30°C y simulando las condiciones del reactor anaerobio en planta, se determinó el potencial de producción de gas mediante el montaje de la prueba de potencial de hidrógeno.

Para las pruebas experimentales el inóculo se sometió a estrés térmico con el fin de inhibir el metabolismo de la fase metanogénica.



Figura 2. Montaje del diseño experimental.

Se realizó el montaje del primer ensayo, con los valores más altos de inóculo que se observan en la tabla del diseño del experimento denominados como control C1 –

C7 – C4, midiendo diariamente los desplazamientos de volumen en las botellas con solución de NaOH, en un período de 5 días. Luego se realizó por duplicado la caracterización para el seguimiento del proceso, midiendo sólidos volátiles (SV), alcalinidad y ácidos grasos volátiles (AGV).

A continuación, se realizó el montaje experimental incluyendo los tratamientos con valores intermedios de inóculo denominados en la tabla de diseño como control C2 – C5-C8. Nuevamente, se realizó la medición en desplazamiento de volumen, en un mismo período de tiempo, tomando muestras de cada control para análisis de SV, alcalinidad y AGV.

Se finalizó el montaje experimental con los controles C3 – C9 – C11 en las condiciones de los ensayos anteriores y sus respectivos análisis.



Figura 3. Desarrollo del diseño experimental.

Una vez obtenidos los resultados del diseño experimental, se analizó el digestato, determinando el pH empleando un potenciómetro Edge Model HI2002, AGVs mediante la 5560D APHA SM, y para la alcalinidad se aplicó la norma 2320B APHA SM.

Por último, se analizó la información recolectada dentro del diseño de experimentos ortogonal, determinando las mezclas con mayor potencial de producción de bio-H₂,

empleando el modelado matemático Box-Behnken (Rangel, 2021).

3. Resultados

3.1. Caracterización

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de las aguas procedentes del tanque de acidificación de la PTAR de planta de Alpina, ubicada en Sopó, Cundinamarca, se presentan en la tabla 4.

		ATA	Inóculo □
ST	g/l	2,6±0,	0,027 ±0,25
SV	g/l	3,26 ±00	38,5 ±5,6
pH		5,8	
Humedad	%	97,6	
DQO	g/L	1,89± 00	

Tabla 4. Resultados de caracterización de análisis del agua del tanque de acidificación.

Los resultados de la caracterización presentan que ATA tiene un bajo porcentaje de materia orgánica (MO), inferior al 5% y un alto porcentaje de humedad. Lo anterior se relacionó con el hecho de que, antes de llegar al reactor de acidificación, se realiza remoción de MO de las aguas residuales que ingresan a la PTAR, reduciéndose en más del 70% la concentración de DQO.

Usualmente, las aguas residuales de la industria láctea contienen altas concentraciones de DQO que oscilan entre los 18- 19 g/L (Balcioğlu et al., 2021), hasta los 55-117gDQP/L, así como concentraciones de lactosa (39-60g/L), proteínas (1.4-18g/L), lípidos (1-21 g/L) y sales minerales (5-10g/L) (Poletini et al., 2022) que hacen este residuo atractivo para procesos de aprovechamiento y obtención de bio-H₂.

3.2 Diseño de experimentos

Los resultados experimentales obtenidos permitieron identificar como mejor mezcla la combinación 3 con 407 mL H₂/gDQO, seguida de la combinación 1 (272 mL H₂/gDQO). A pesar de lo anterior, como se muestra en la figura 4, las desviaciones estándar más bajas

se presentan en las combinaciones 1, 2 y 5 lo cual se relaciona con una mayor estabilidad a nivel experimental. Por ello, se tomó la combinación 1 como la de mejor BHP con S/X de 1, la mayor concentración [1gDQO/L] y la mayor cantidad de ATA (105 mL).

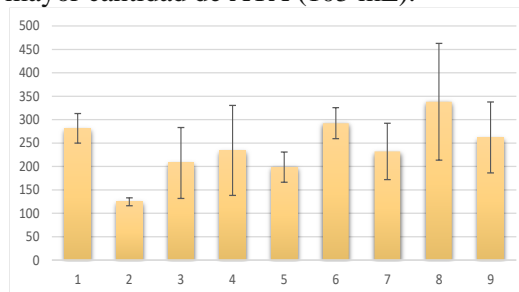


Figura 4. Desviación estándar de resultados.

Lo anterior, puede soportarse con lo indicado en literatura, donde cargas mayores presentan mejores producciones de H₂. En el caso de Gadhe et al., 2013 trabajaron con residuos de la Sociedad Gubernamental de Productos Lácteos, con concentraciones de 5, 15 y 25 gDQO/L, concluyendo que las mejores condiciones de operación se presentan con 15.3 gDQO/L, pH 5.5 con una producción de 13.54 mmolH₂/gDQO.

Mientras tanto, en un estudio recopilatorio se identificó que las mejores condiciones operacionales para la obtención de H₂ son aquellas que trabajan con pH entre 5 -7.5, temperatura entre 35-37°C y realizando pretratamiento térmico al inóculo (Lopez-Hidalgo et al., 2022).

Se realizó un análisis estadístico a través del programa STAGRAPHICS, el cual arrojó la siguiente ecuación:

$$\text{BHP} = 149,778 + 24,8333 \cdot \text{S/X} + 10,6667 \cdot \text{DQO} + 5,83333 \cdot \text{S/X}^2 + 37,25 \cdot \text{S/X} \cdot \text{DQO} + 39,3333 \cdot \text{DQO}^2$$

La ecuación obtenida para el volumen acumulado presenta un coeficiente de correlación capaz de explicar el 67% de la variabilidad asociada con la producción de bio-H₂. El modelo permitió la definición de

una combinación óptima, compuesta por una concentración de 1 g DQO/L de ATA y un S/X de 1 prediciendo un volumen de estimado de 267.694 mL de bio-H₂.

En la figura 4 puede observarse que ambas variables influyen de manera directa sobre el modelo; sin embargo, la concentración inicial tiene un impacto ligeramente superior.

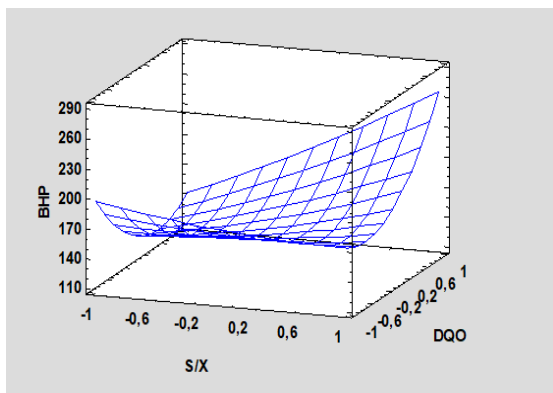


Figura 4. Estimado de la superficie de respuesta.

Adicionalmente, se analizó la producción de AGV y alcalinidad de las combinaciones, obteniendo lo ilustrado en la figura 5

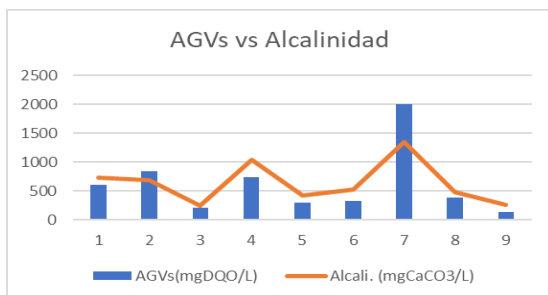


Figura 5. Producción de AGV y alcalinidad.

La figura 5 presenta la relación entre la alcalinidad y la producción de AGVs, observándose que en la mayoría de las mezclas hubo una mayor alcalinidad de en comparación con la producción de AGVs; esto es deseable debido a que una alta alcalinidad favorece la producción de hidrógeno (Sreethawong et al., 2010).

Conclusiones

La presente investigación muestra que para el proceso de fermentación oscura el contenido de MO es una de las variables de mayor impacto, requiriendo valores, según lo observado en literatura, superiores al 70%. En sistemas como el analizado en donde los valores son inferiores al 10% el proceso se ve frenado, debido a que los microorganismos encargados del proceso no cuentan con los insumos necesarios para la producción de hidrógeno; por lo anterior, la realización de un proceso de fermentación oscura, bajo los parámetros actuales, disminuye la precisión en los resultados, ya que la muestra obtenida del proceso contiene un porcentaje bajo de MO, teniendo en cuenta que las mejores condiciones para la experimentación se podrían optimizar si la muestra se toma con un valor más alto de MO disponible en el tratamiento.

Para mejorar la eficiencia del proceso del ensayo, es necesario evaluar condiciones en las que se tome la muestra del tanque de acidificación con una concentración de DQO mayor a la establecida para esta investigación de manera no aleatoria, con el fin de determinar mezclas diferentes y combinaciones de S/X en relación con la DQO, permitiendo a los microorganismos tener mayor disponibilidad de materia que permita incremento en la producción de bio-H₂.

En cuanto a las condiciones operacionales, se identificó que la mejor mezcla fue la combinación 1 con un BHP de 2772 mL H₂/gDQO, la cual contó con un S/X de 1, con la concentración más alta ensayada [1gDQO/L], y una de las desviaciones estándar más bajas; se sugiere realizar ensayos con concentraciones mayores, en lo posible, antes de la etapa de remoción de MO en la

PTAR con el fin de obtener datos que se asemejen más a la realidad de la planta.

Bibliografía.

Abad-Segura, E., Batlles-de-laFuente, A.,

González-Zamar, M.-D., &

Belmonte-Ureña, L. J. (2021).

Implications for Sustainability of the

Joint Application of Bioeconomy and

Circular Economy: A Worldwide

Trend Study. *Sustainability*, 13(13),

Article 13.

<https://doi.org/10.3390/su13137182>

Balcioğlu, G., Yilmaz, G., & Gönder, Z. B.

(2021). Evaluation of anaerobic

membrane bioreactor (AnMBR)

treating confectionery wastewater at

long-term operation under different

organic loading rates: Performance

and membrane fouling. *Chemical*

Engineering Journal, 404, 126261.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126>

261

Gadhe, A., Sonawane, S. S., & Varma, M. N.

(2013). Optimization of conditions

for hydrogen production from

complex dairy wastewater by

anaerobic sludge using desirability

function approach. *International*

Journal of Hydrogen Energy, 38(16),

6607-6617.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.201>

3.03.078

Lopez-Hidalgo, A. M., Smoliński, A., &

Sanchez, A. (2022). A meta-analysis

of research trends on hydrogen

production via dark fermentation.

International Journal of Hydrogen

Energy, 47(27), 13300-13339.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.202>

2.02.106

Polettini, A., Pomi, R., Rossi, A., Zonfa, T.,

De Gioannis, G., & Muntoni, A.

(2022). Factor-based assessment of

continuous bio-H₂ production from

cheese whey. *Chemosphere*, 308,

136174.

<https://doi.org/10.1016/j.chemospher>

e.2022.136174

Rangel, C. J. (2021). *Evaluación de un*

esquema de biorefinería basado en

fermentación oscura empleando

biomasa residual de Santander.

<https://repository.universidadean.edu.co/handle/10882/10854>

- Climate, Energy and Tenure División. 2012. Energy-Smart Food at FAO: An Overview. Documento de trabajo sobre el medio ambiente y los recursos naturales. Número de serie: 9789251071502|2226-6062. Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura.
- Dahiya S., Chatterjee S., Sarkar O., Mohan S. 2021. Renewable hydrogen production by dark-fermentation: Current status, challenges and perspectives, *Bioresource Technology*, Volume 321, ISSN 0960-8524.
- Patrick T. Sekoai, Ghimire A., Obinna T. Ezeokoli O., Rao S., Wing Y. Ngan, Habimana O., Yao Y, Yang P., Fung Y., Kelvin O. Yoro, Michael O. Daramola, Chun-Hsiung Hung. 2021. Valorization of volatile fatty acids from the dark fermentation waste Streams-A promising pathway for a biorefinery concept, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 143,110971.ISSN 1364-0321.
- Rangel, C., Hernández, MA, Mosquera, JD et al. Producción de hidrógeno por proceso de fermentación oscura a partir de estiércol de cerdo, mucílago de cacao y mucílago de café. *Conversión de biomasa Bioref.* 11, 241–250 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00618-z>.
- Fernández C.; Martínez E.; Morán A.; Gómez X. 2016. Procesos biológicos para el tratamiento de lactosuero con producción de biogás e hidrógeno. Revisión bibliográfica. Grupo de Ingeniería Química y Ambiental. Instituto de Recursos Naturales. Universidad de León. Avda Portugal 41, 24009, León, España.