

Biohidrógeno a partir de residuos sólidos en México

Biohydrogen from waste solids in Mexico

Pedro Vera Toledo¹; Carlos M. García Lara¹; Rubén A. Vázquez Sánchez¹;
Hugo A. Nájera Aguilar¹; Joel Moreira Acosta² e Iván Moreno Andrade³

¹ Cuerpo académico Estudios Naturales y Riesgos Ambientales de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. E-mail: caachis1@hotmail.com

² Cuerpo académico Energía y Sustentabilidad de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.

³ Investigador del Laboratorio de Investigación en Procesos Avanzados de Tratamiento de Aguas, Unidad Académica Juriquilla, Querétaro, del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

RECIBIDO EL 9 DE JUNIO DE 2013 Y ACEPTADO EL 8 DE SEPTIEMBRE DE 2013

RESUMEN

Se realizó una revisión de bibliografía en torno a las investigaciones y trabajos sobre la generación de biohidrógeno a partir de biomasa residual, sobre el estado del arte del tema en México. Se encontró que existen grupos de investigadores que se enfocan en el tópico. Diversos autores no sólo en México, sino a nivel mundial, concuerdan que se tiene un gran potencial en el tema, asegurando en muchos casos que es el energético del futuro, pero que aún faltan delimitar muchas variables, iniciando por homogenizar las unidades de reporte de las investigaciones para realizar comparativos válidos en las variables de pH, Temperatura de operación de los procesos, agitación o no, tiempos de retención, concentración del sustrato y adición y pretratamiento del inóculo; todas las anteriores son variables que aún no se ha determinado un rango dentro del cual se tenga mejor producción, lo que refleja que el estado del arte es incipiente, y se debe trabajar orientado al desarrollo de procedimientos en rangos de operación claros para optimizar la generación.

Palabras clave: biocombustibles, fermentación.

ABSTRACT

A review of literature about the research and work on the generation of biohydrogen from waste biomass, on the state of the art on the topic in Mexico. We found that there are several groups of researchers who focus on the topic. Several authors not only in Mexico, but worldwide agree that it has great potential in the field, ensuring that in many cases is the energy of the future, but still lack define many variables, starting standardize the reporting units of research, for comparative variables valid in pH, operating temperature processes, agitation or no, retention times, and substrate concentration and pretreatment inoculum addition; all of the above variables are still not determined a range within which one has better production reflecting the state of the art is emerging, and it should work oriented development of procedures for operation ranges clear optimize generation.

Key words: Biofuels, Fermentation.

INTRODUCCIÓN

El uso indiscriminado de combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón) ha traído consigo una serie de problemas que afectan a todo el planeta y por ende a los seres humanos, como contaminación, crisis económicas e incluso guerras (Escamilla et al., 2011). A pesar de lo anterior, los combustibles fósiles son considerados el motor del mundo actual, pues cerca del 80% de la demanda mundial de energía se cubre con éstos (Das y Veziroglu, 2001; Kalinci et al., 2009); sin embargo, la tendencia es el agotamiento. En México, del total de la generación de energía alcanza 91% con petróleo, condensados, gas natural y carbón (SENER, 2012), por ello es imperante reorientar tanto la generación como el consumo. El reto: producir energía a bajos costos, con menos impacto al ambiente y a la salud pública, tanto en la obtención como en la utilización (Montiel et al., 2010), lo que ha dado como resultado el

desarrollo de una gama de oportunidades en diversas fuentes de generación. En general, se considera que los combustibles renovables pueden ser una parte importante para la solución del problema de los energéticos.

Los combustibles renovables, también conocidos como biocombustibles, obtenidos a partir de biomasa mediante procesamiento químico, térmico o biotecnológico son cuatro principales: bioetanol, biodiesel, biogás y biohidrógeno.

El hidrógeno no está disponible como tal en la naturaleza, por lo tanto hay que sintetizarlo a partir de compuestos que lo contengan, como por ejemplo el agua o la materia orgánica (De Luchi, 1989); en contraparte, el biohidrógeno es el producido biológicamente por diversos microorganismos utilizando distintas vías metabólicas, a partir de la biomasa.

En Estados Unidos de América, la mayor parte del hidrógeno se produce por el trata-

miento de metano con vapor de agua, según la fórmula: $\text{CH}_4 (\text{g}) + \text{H}_2\text{O} + \text{e} \Rightarrow 3\text{H}_2 (\text{g}) + \text{CO} (\text{g})$, que no considera la energía requerida para producir el vapor, que generalmente proviene de la quema de combustibles fósiles; por esta razón, no escapan a la producción de CO_2 y otros gases de efecto invernadero (Morgan y Sissine, 1995). Este procedimiento se traduce en una pérdida de energía, primero cuando se produce metanol (materia prima para producir hidrógeno) a partir de gas natural, con un rango de 32 a 44% neto. Posteriormente, el proceso de tratamiento del vapor para obtener el hidrógeno dará como resultado una mayor pérdida de energía de hasta 35% (Andersen, 1997).

Si se posee agua se puede obtener hidrógeno, sin embargo la reacción $2\text{H}_2\text{O} + \text{e} = 2\text{H}_2 (\text{g}) + \text{O}_2 (\text{g})$ requiere de 286 kJ/mol de agua, que no se puede reducir (Jay, 1999).

Debido a lo anterior se han propuesto procesos de obtención de hidrógeno a partir de la biomasa con materias primas no alimenticias, como los residuos orgánicos tanto sólidos como líquidos, de cualquier origen, que ofrecen ventajas para los tres criterios energéticos, ambientales y económicos; además, los biocombustibles que no son a base de alimentos tienden a ser mucho más importantes en el largo plazo (Hill et al., 2006) por no amenazar la seguridad alimentaria y ser por mucho más económicos.

Para producir biohidrógeno se debe utilizar como fuente de generación la biomasa residual, específicamente la que proviene de residuos sólidos urbanos (Mizuno, 1997; Lay, 2000; Okamoto et al., 2000; Lovisa et al., 2001; Lay et al., 2003; Cooney, 2007; Burak y Scherer, 2008; Lee et al., 2010). Por otra parte, con excepción de la energía renovable todas las demás fuentes generan subproductos agresivos al ambiente, que son la principal fuente de gases de efecto de invernadero (Etchebehere et al., 2008), en ese sentido el hidrógeno es un gas considerado como el energético del futuro debido a que su combustión o su utilización en celdas de combustible generan sólo agua como residuo (Jui et al., 2006; Dávila y Razo, 2007; Yonghua et al., 2008; Beckers et al., 2010; Moreno et al., s/f). Aunado a esto, el biohidrógeno es un combus-

tible que tiene grandes ventajas por ser limpio en su producción, renovable, su contenido energético es 2.75 veces mayor que los hidrocarburos, se puede acumular ya que el gas se puede comprimir y guardar, su utilización es muy versátil (desde dispositivos microelectrónicos hasta vehículos de transporte y grandes centrales eléctricas pueden utilizar esta tecnología), es un importante precursor en la industria química y posee características muy similares al gas natural por lo que su aplicación a nivel industrial no requiere de creación de diferente infraestructura (Lee et al., 2010).

ANTECEDENTES DE PRODUCCIÓN DE BIOHIDRÓGENO A PARTIR DE BIOMASA

En la última década se han realizado investigaciones en torno a la producción de biohidrógeno, experimentando con residuos de sorgo dulce, tallos de maíz, bagazo de caña, estiércol, lodos de plantas de tratamiento, de producción de azúcar, la fracción orgánica de los residuos sólidos domiciliarios, residuos orgánicos de rastros y frigoríficos, residuos de la industria papelera, entre otros, o mezclas entre éstos, utilizándolos como sustratos. También se ha experimentado con la paja y la madera, que son pobremente degradadas y no se puede convertir fácilmente a biocombustibles por los microorganismos (Henstra et al., 2007). En el Cuadro 1 se presenta un concentrado de los antecedentes de investigaciones realizadas, tipo de sustrato, inóculo, condiciones generales de operación del proceso o experimento.

En lo que se refiere a la generación de biohidrógeno a partir de biomasa residual, se reportan las más variadas velocidades de producción, que por desgracia no se puede realizar una comparación debido a la gran gama de unidades en las que se reportan los resultados; influyen en esto las diferencias en las que se realizan los experimentos, por la variación de rangos por ejemplo de pH, temperatura, agitación o no y los procesos utilizados propiamente para la generación. Por ello, es prácticamente imposible realizar análisis orientados a homogenizar las variables que intervienen.

En México se realizan investigaciones en el campo de las energías renovables, especí-

Cuadro 1. Investigaciones realizadas con diversos sustratos para generar biohidrógeno

Temp °C	pH	TRH	Rendimiento	Tasa de generación	Inóculo	Sustrato	Autor
22-26	5.5	5 d	557 NmL/L- Lodo de la planta	23 NmL/h/L-Lodo de la planta	Lodo de misma planta	Efluente de la planta del molino de aceite de palma	Mohd. et al., 2010
22-26	5.5	3 d		39	"	"	
22-26	5.5	2 d	1054	44	"	"	
40	NR	Bach 180 h	50 ml en 100 h	0.6 ml H2/h	Paja de arroz y estiércol de vaca 85 °C	Residuos de levadura de cerveza	Chang, et al., 2007
35	4.9	6 h	10.4 l H2/ kg de sorgo dulce	2550 ml H2/d	Licor mixto de un reactor metanogénico	Residuos de sorgo dulce	Antonopoulou et al., 2007
35 ± 2	5.5	15 d	NR	893 ml H2/l	Lodo activado y excreta de vaca (50:50), choque térmico	Residuos de frutas y verduras	Montiel et al., 2010
35 ± 1	7.5 – 8	10 d	NR	NR	Lodos de reactor anaerobio	Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos	Sandoval et al., 2007
38 ± 1	5– 6.5						
37	7	NR Estudio 10 d	32,3 ml H2 / g de biomasa h	H2 4,84 ml / h	Lodo anaerobio tratado, 5 h hirviendo y 1 h en autoclave a 121 °C, 30 min.	Residuos de trigo en polvo	Rukiye et al., 2009
37	6.5 a Diversos valores	NR Estudio 45 h	530 ml H2/h g-SV	0.99 mol H2/mol	Lodo anaerobio tratado por 2 h a 103 °C	Residuos de arroz rico en almidón Residuos de soja rico en proteína	Ding et al., 2008
35	NR	NR	1.8 L H2/kg STin	NR	Lodos anaerobios Tratado por 24 h a 105 °C	Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos	Moreno et al., s/f
60	5.5	2 d	243 ml H2/g-azúcar	4.820 ml H2/l-POME	Lodos anaerobios de PTAR carga-descarga, enriquecido químicos	Lodos anaerobios	Sompong et al., 2008
35 ± 1	5.5	NR	230, 290, y 20 L / kg de glucosa / día	NR	Lodo tratado con HCl, H2SO4, HNO3 enriquecido químicos	Agua residual	Lee et al., 2009
52	4.8	NR	209.8 ml/g-SV	9,4 FPU / g de TS-carga enzimática	Estiércol de ganado tratado con luz infrarroja por 2 h	Caña de maíz pre-tratada hidrólisis ácida y enzimática	Pan et al., 2010
37 ± 2	NR	NR	240 ml H2/g SV	NR	Composta de estiércol de búfalo tratado por 30 min a 105 °C enriquecido químicos	Líneas de alta biomasa de sorgo	Nagaiah et al., 2012
60	6.5	10 d	743 ml H2/ Kg- Estiércol de vaca	NR	Composta	Estiércol de vaca sin diluir	Hiroshi, 2007
NR	NR	21 d	6.7X10 ⁻³ mmolH2/ Reactor h	34 mmolH2/reactor	Mezcla de residuos sólidos urbanos mesófilas, metanogénicas inhibidor metanogénico	Puré papel de seda aproximadamente 20 g de blanqueado	Valdez et al., 2004
30	6.8	80 d. estudio	20 ml / h por g (peso seco)	6 ml H2 / h por g (peso en seco) de las células con suero de leche	Cultivos de bacteria <i>Rhodospirillum rubrum</i>	Residuos de la producción de ácido láctico	Hans y Reinhard, 1979
NR	5.5	6.6 d	0,071 L H2 producido/L reactor/d	NR	Inóculo activo de reactor termofílico	Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos	Romero, 2008
35 ± 1	4.28	6 h	5.9 L/d	NR	Lodo tratado aireación por 30 d. Microorganismos inmovilizados con carbón activado	Agua residual / melaza	Han et al., 2010
37	7	3 H	294 ml H2 / g de caña de maíz	NR	Estiércol de vaca 105 °C por 2 h El <i>Rhodobacter sphaeroides</i> bacteria fotosintética aislada de agua residual 0,5 h a 115 oC después de la centrifugación (20,000 rpm)	Caña de maíz pre-tratada, alcalino enzimático	Ma et al., 2010

36 ± 1	7 inicial 5.5 - 7	100 h	58.6 ml H2/g SV	NR	Composta de estiércol de vaca, tratada con 2 h rayos infrarrojos	Residuos de caña de maíz, hervido 30 min adicionado con ácido y base y nutrientes	Mu'taz, 2007
60	5.8 - 6	8 d	5.4 m3/m3/d de H2	2,4 mol / mol de hexosa	Compost de lodos activados	Lodos de basura modificada con pa- pel Shredded	Yoshiyu et al., 2007
37	5.5	NR	NR	630 ml-H2.h-1	Lodo anaerobio, dige- rido, pre-tratamiento	Melaza de la indus- tria azucarera remolacha, enri- quecida con quí- micos	Aceves et al., 2008
37	6.5 - 7	8 d	0.31 m3/kg	3.63 m3/m3 d	Residuos de comida	Lodo anaerobio digerido	Sun y Hang, 2004
36	5.5	8 h	165.8 ml H2/g-ST	12.8 ml H2/g-ST h-1	Estiércol de panda, aireado por 24 h	Caña de maíz pre- tratada, ácido en- zimático	Xing et al., 2010
36	NR	35 d estudio	NR	10.74 mmol/h · L	Lodo de PTAR, 0.5 mm, carbón activado, soporte e inmovili	Melaza	Wei et al., 2011
36	6.7 - 7.9	7.5, 8.0, 6.5 d	mLH2.g-1(VS) 11.5~12.2 24.1~24.7 34.2~34.9	NR	NR	Lodo de PTAR, adicionado químico y tratamiento ácido-alcali Digestión caliente y ultrasonido	Feng et al., 2009
32	7	48 h	0.23 mol H2 / mol sustrato	NR	<i>Bacillus sp</i> MTCC, 297	Extracto de bagazo de caña	Manikkandan et al., 2009
55±1	5.56-5.95	91 d	54.8 Nml/g SVrem	463.7 Nml/kg-d	Consorcio microbiano anaerobio	Residuos sólidos orgánicos	Valdez y Poggi, 2009
55	6.3	21 d	NR	123 NmL H2/ kgwmm/d	Inóculo termofílico	Fracción orgánica de los residuos sólidos municipales	Escamilla et al., 2013

NR= No reporta. PTAR= Planta de tratamiento de aguas residuales

ficamente en generación y recuperación de biohidrógeno a partir de biomasa residual, en el CINVESTAV, con la línea de investigación en Biorrefinería de residuales orgánicos: Bioenergías (biohidrógeno, biometano, bioelectricidad) y productos de valor agregado (enzimas, biomateriales); existen unidades del mismo centro de investigaciones como el de Guadalajara, con la línea: Ingeniería de procesos para biocombustibles de generaciones superiores, y el de Mérida con la línea: Electroanálisis y caracterización de biocombustibles.

En la UNAM, en el Laboratorio de Investigación en Procesos Avanzados de Tratamiento de Aguas (LIPATA) de la Unidad Académica Juriquilla, Campus UNAM, Juriquilla, Querétaro; con la producción de hidrógeno a partir de aguas residuales, con el proyecto: "Producción de hidrógeno a partir de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU)". Además, en el Instituto de Ingeniería, el proyecto: Aprovechamiento de biogás a partir de biomasa, obteniendo hidrógeno para transporte vehicular, con tratamiento de lodos y residuos sólidos por vía anaerobia. Otra más es la carac-

terización de desechos mexicanos tales como residuos biomásicos de aserradero, bagazo de caña, basura, llantas (neumáticos) usadas de automóviles, aceites industriales quemados, coque de petróleo entre otros desechos.

En el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT) trabajan en la línea de degradación anaerobia de compuestos xenobióticos, biotransformación de compuestos azufrados, remoción biológica de nitrógeno y bioenergía, en diversos proyectos de los que se obtiene biohidrógeno de efluentes líquidos.

En el Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán, A.C., se tiene la línea de investigación II, Tecnología del Hidrógeno, en donde se realizan estudios diversos relacionados con la producción de energía renovable vía la tecnología del hidrógeno, incluyendo la producción del hidrógeno y su uso en celdas de combustible. Se trabaja en el desarrollo de celdas de combustible tipo enzimático, de alcoholes directos y microbianos. Los investigadores colaboran en las tecnologías de conversión biológica mediante procesos de digestión anaerobia a partir de la fracción orgánica de residuos sólidos y líquidos

urbanos para la obtención de biocombustibles como biohidrógeno, biometano y bioetanol.

Con el proyecto número 150001 “Desarrollo y prueba de concepto de una biorrefinería en pequeña escala para la coproducción de etanol, hidrógeno y biogás usando residuos lignocelulósicos”, se persigue el objetivo: Desarrollar el concepto de una biorrefinería cero emisiones y consumo mínimo de agua para la coproducción de etanol, biogás, hidrógeno y biomateriales de interés biotecnológico, para demostrar la factibilidad en equipos a escala equivalente a 1 kg materia prima en base seca; persiguiendo el mismo objetivo, trabajan grupos de instituciones como el CINVESTAV, con las unidades de Guadalajara y Saltillo, el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, el IPICYT, la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, la Universidad de Guanajuato y la Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo.

PROCESOS DE GENERACIÓN DE BIOHIDRÓGENO

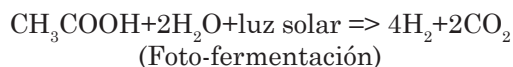
Los procesos bioquímicos que generan biohidrógeno a partir de biomasa que se conocen, son: la biofotólisis directa, biofotólisis indirecta, fotofermentación y fermentación oscura.

La biofotólisis es un método directo de producción de biohidrógeno, basado en la aportación energética de la luz solar, la producción de biohidrógeno es debido a algas o bacterias que reaccionan con el agua liberando hidrógeno; por desgracia, este proceso no puede dar lugar a cantidades importantes de hidrógeno. El ejemplo son las algas verdes, que producen biohidrógeno por medio de hidrogenasas, con rendimientos entre 1 y 2% considerados muy bajos (Gutiérrez, 2005).

Finalmente, se han desarrollado procesos para aislar y sintetizar hidrocarburos a partir de plantas, estos procesos consisten en una serie de extracciones con acetona, hexano y benceno que conducen a diversas fracciones constituidas por aceites, polifenoles, hidrocarburos y un residuo con un contenido elevado

de proteínas e hidratos de carbono (David et al., 2004; González, s/f).

El proceso de fotofermentación y fermentación oscura, realizado por bacterias y algas, consiste en la transformación de algunos compuestos orgánicos —como el ácido acético— en hidrógeno y dióxido de carbono con el aporte energético proveniente de la luz solar.



Esta reacción toma lugar bajo condiciones anaeróbicas y puede combinarse con la fermentación oscura del biohidrógeno, realizada por diferentes tipos de bacterias.



De esta forma la foto-fermentación puede ser utilizada en la segunda etapa, en un proceso que consiste, a su vez, en dos etapas para la producción de biohidrógeno, en donde todo el sustrato orgánico es completamente convertido en H₂ y CO₂.

La producción o fermentación oscura de biohidrógeno es un fenómeno que ocurre bajo condiciones anaeróbicas o anóxicas (ausencia de oxígeno). Durante este proceso, el sustrato orgánico sobre el que crecen diferentes tipos de bacterias, sufre una gradual degradación a través de un proceso oxidativo, que genera y libera electrones. Con el fin de mantener la neutralidad electrónica, estos electrones deben ser cedidos a un aceptor de los mismos, en este caso hidrógeno molecular, el cual finalmente se reduce.

Algunos de los microorganismos capaces de producir biohidrógeno molecular que se pueden citar están anaerobios estrictos como: *Clostridia sp*, *Pyrococcus sp*, *Caldicellulosiruptor sp*, *Clostridium sp*, *Ferredobacterium sp* y *Thermoanaerobacter sp* Entre los anaerobios facultativos: *Enterobacter sp* y *Citrobacter sp* (Vipin y Hemant, 2008).

De las investigaciones sobre la generación de biohidrógeno han derivando una serie de

estrategias para incrementar su producción, entre las cuales destaca el pre-tratamiento del inóculo, cuyo principal objetivo es garantizar la eliminación de los microorganismos que consumen hidrógeno y a los productores de metano (Venkata, 2008), los pre-tratamientos más utilizados, solos o combinados, son: choque térmico, enriquecimiento químico, ultrasonido, involización y aireación.

El pre-tratamiento por choque térmico consiste básicamente en calentar desde 80 °C hasta 140 °C con tiempo de exposición de 15 a 20 min (Venkata, 2008) al lúgamo o lodo, generalmente proveniente de lodo activado, lodo anaeróbico, compost y el suelo (Hawkes et al., 2002; Lay et al., 2003; Oh et al., 2003; Fan et al., 2004; Iyer et al., 2004; Yonghua et al., 2008). Jung y Young (2009) reportan el efecto sobre la influencia de la temperatura (90 °C a 100 °C) y la duración del tratamiento térmico para los lodos anaerobios como inóculo para la fermentación de biohidrógeno (periodos de 0 hasta 180 min), donde el mejor potencial de 63.1 ml H₂ / g de glucosa, se encontró a partir de lodos tratados a 100 °C durante 30 min.

Además del enriquecimiento con químicos se adicionan al inóculo sales minerales y otros compuestos aportan micronutrientes esenciales para el buen funcionamiento de las bacterias generadoras de biohidrógeno.

La viabilidad del tratamiento con ultrasonidos queda demostrada en la investigación de Elsayed (2011), y sirve para solubilizar el material particulado presente en el sustrato, suprimir el crecimiento de los microorganismos metanógenos y fortalecer los productores de biohidrógeno, superando así el reto principal de los sistemas productores de biohidrógeno, la estabilidad a largo plazo y la aparición de microorganismos productores de metano.

Otro pre-tratamiento que se ha investigado es la inmovilización celular, con incrementos reportados por Ren et al. (2006) del 8% respecto a los de células libres, para procesos alimentados con glucosa.

FACTORES QUE AFECTAN LA GENERACIÓN DE BIOHIDRÓGENO

El pH del medio tiene grandes efectos sobre las actividades vitales de los microorganismos,

conduce a cambios de membrana de la célula, cobra influencia aún más en la ingesta de sustancias nutritivas, influye en la actividad enzimática durante el proceso metabólico, cambia el suministro de sustancias nutritivas y la toxicidad de las sustancias dañinas en el hábitat (Yong et al., 2007).

En la fermentación del biohidrógeno, el pH es uno de los factores de gran influencia (Khanal et al., 2004) y su valor pH se encuentra asociado al efecto de ácidos grasos volátiles (AGV) que surgen como metabolitos solubles. En esta operación, los AGV producidos fueron controlados para investigar el efecto y la interrelación con el rendimiento de biohidrógeno. Según Zheng y Yu (2005), un exceso de producción de AGV podría dar lugar a un efecto inhibitorio sobre la fermentación de biohidrógeno. Por lo tanto, las formas no disociadas de los AGV acumuladas dentro del sistema son capaces de penetrar libremente en el interior de la membrana plasmática de los microorganismos, la acción podría interrumpir metabolismos de la célula y como consecuencia perturbar la actividad celular, así como el crecimiento celular (Zhang et al., 2006).

La composición del sustrato o de la biomasa utilizada para la generación de biohidrógeno tiene una influencia preponderante y es a menudo considerada como un importante factor. Con frecuencia el tipo de sustrato lleva a la lucha por la existencia entre especies, mientras que la cantidad de sustrato lleva a la lucha intraespecies por la existencia (Yong et al., 2007).

La compleja naturaleza de los residuos sólidos puede afectar la producción de biohidrógeno. Por ejemplo, los residuos de alimentos contienen carbohidratos y cierta cantidad de proteínas. El almidón contenido en los residuos sólidos es fácil de degradar en el proceso para la formación de hidratos de carbono y biohidrógeno.

Las proteínas contenidas en los residuos de alimentos no sólo aportan la capacidad amortiguadora para neutralizar los ácidos grasos volátiles, sino también mejoran la producción de hidrógeno, proporcionando nitrógeno orgánico fácilmente disponible, tales como proteínas solubles y aminoácidos. Se encontró que el

máximo potencial específico de producción de hidrógeno fue de 0.99 mol H₂/mol, para el almidón inicial expresado como azúcar y la máxima tasa de producción de biohidrógeno se encontró con una relación almidón/proteína con 1.7530 ml de H₂/h g-VS (Ding et al., 2008).

Lay et al. (2003) investigaron la influencia de la naturaleza química de los residuos sólidos de alta carga orgánicos en la generación de biohidrógeno. Su estudio lo realizaron con arroz y patatas ricos en carbohidratos con 20 veces más potencial de producción de biohidrógeno que los de huevo y carne (ricos en proteínas). La fluctuación del contenido de proteínas en la alimentación puede imponer efectos, por lo menos dos diferentes, el primero en la producción de biohidrógeno de hidratos de carbono contenido en el mismo, y el segundo también afecta la producción de biohidrógeno a través de la influencia sobre el cambio de pH; finalmente se produjo en una proporción de almidón / proteína de 1.7 (Ding et al., 2008).

La temperatura es uno de los factores ecológicos más importantes, influye en todas las clases de actividades fisiológicas de los microorganismos y en la conversión de tasa de producto de la fermentación (Yong et al., 2007).

CONCLUSIÓN

La investigación en la producción de biohidrógeno a partir de residuos de diversa índole en México es incipiente, pocos equipos de investigadores han trabajado en el área, a pesar de que muchos autores concuerdan que se tiene un gran potencial específicamente en este sector.

A nivel mundial se han desarrollado diversas investigaciones; sin embargo, se tienen relativos avances. No se han homogenizado, entre otras cosas, las unidades de reporte de la generación que plantea un problema. Existen combinaciones de las más diversas unidades que son totalmente incompatibles, esto resulta en una deficiencia en el momento de tomar decisiones por no contar con una referencia sólida; por lo que es no sólo importante sino necesaria la unificación de criterios en el momento de utilizar unidades de generación. Los rangos de operación de las variables del pH, presión, temperaturas, agitación, tiempos

de tratamiento o de retención, son verdaderamente dispares con un rango muy amplio de valores.

Otros aspectos importantes que aún no se han logrado establecer con claridad son los límites de estas variables, los relacionados con la concentración y preparación del sustrato y de existir, el inóculo de siembra y, de ser el caso, el pre-tratamiento al que es sometido para asegurar su eficacia.

Todas las anteriores son variables de las que aún no se ha determinado un rango dentro del cual se tenga mejor producción de biohidrógeno, lo que refleja que el estado del arte es incipiente y que se debe trabajar orientado al desarrollo de procedimientos en rangos de operación claros para optimizar la generación.

REFERENCIAS

- Andersen, Arthur T., (1997). Development Patterns For Long Supply And Demand, EIA. <http://www.eia.doe.gov/oiaf/issues97/lng.html>
- Antonopoulou G, Hariklia N, Gavala Ioannis V, Skiadas K, Angelopoulos Gerasimos L. (2007). Biofuels generation from sweet sorghum: Fermentative hydrogen production and anaerobic digestion of the remaining biomass, *Bioresource Technology*, doi:10.1016/j.biortech.2006.11.048 Elsevier.
- Beckers Laurent, Serge Hilgsmann, Christopher Hamilton, JulienMasset, Philippe Thonart. (2010). Fermentative hydrogen production by *Clostridium butyricum* CWBI1009 and *Citrobacter freundii* CWBI952 in pure and mixed cultures. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ. Agrofuels& Energies*. 14(S2), 541-548.
- Burak Demirel & Scherer Paul. (2008). The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: a review. *Rev Environ SciBiotechnol*, 7:173–190 DOI 10.1007/s11157-008-9131-1.
- Chang Jui Jen, Chia-Hung Chou, Ping-Chi Hsu, Sian-Jhong Yu, Wei-En Chen, Jiunn-Jyi Lay, Chieh-Chen Huang y Fu-Shyan Wen. (2007). Flow-FISH analysis and isolation of clostridial strains in an anaerobic semi-solid bio-hydrogen producing system by hydrogenase gene target. *Appl Microbiol Biotechnol*.74:1126-1134. DOI 10.1007/s00253-006-0740-8.
- Pan C. M., Fan Y.T. & Hou H. W. (2010). Enzymatic hydrolysis and fermentation of dilute acid pretreated cornstalk to biohydrogen. The 6th international symposium on multiphase flow, heat transfer and energy conversion, American Institute of Physics 978-0-7354-0744-2/10.
- Aceves Lara C.A., Latrille E., Bernet N., Buffière P. y Steyer J.P., (2008). Optimization of Hydrogen Production in Anaerobic Digesters with Input and State Estimation and Model Predictive Control. e-STA copyright by see, vol. 5, n° 2, pp 47-51.
- Cooney M., Maynard N., Cannizzaro C. y Benemann J. (2007). Two-phase anaerobic digestion for production of hydrogen-methane mixtures. *Biores Technol* 98(14):2641-2651.
- Das, D. y Veziroglu, T.N. (2001). Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. *Int J Hydrogen Energy*, 26 (1), pp. 13-28.
- David B. Levina, Lawrence Pitt y Murray Love. (2004). Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application. *International Journal of Hydrogen Energy* 29. 173-185.

- Dávila Vázquez, Gustavo y Razo Flores, Elías. (2007). Producción biológica de hidrógeno por vía fermentativa: Fundamentos y perspectivas. *BioTecnología*, año 2007, vol. 11, n° 3, 19.
- Nagaiah D., Srinivasa Rao P., Prakasham R.S., Uma A., Radhika K., Yoganand Barve y Umakanth A.V. (2012). High Biomass Sorghum as a Potential Raw Material for Biohydrogen Production: A Preliminary Evaluation. *Current Trends in Biotechnology and Pharmacy* vol. 6 (2) 183-189.
- Demirbas, A., (2008). Biohydrogen generation from organic waste, *Energy Sources, Part A*, 30, 475-482, ISSN: 1556-7036
- Ding, H.B., Liu, X.Y., Stabnikova O. y Wang J.Y. (2008). Effect of protein on biohydrogen production from starch of food. *Waste Water Science & Technology WST*, pp. 57.7.
- Elsayed Elbeshbishy. (2011). Enhancement of Biohydrogen and Biomethane Production from Wastes Using Ultrasonication. School of Graduate and Postdoctoral Studies The University of Western Ontario London, Ontario, Canada.
- Etchebehere Arenas, Claudia; Soares Fernandes, Bruna; Castelló Antonaz, Elena Victoria; Foresti, Eugenio; Peixoto, Guilherme; Borzacconi Vidal, Liliana Margarita; Zaiat, Marcelo; Amancio Maria, Bernadete; Varesche Silva y Saavedra del Águila, Nora Katia. (2008). Producción de biohidrógeno a partir de aguas residuales para ser utilizado como fuente alternativa de energía, *Biocombustível para o Mercosul: edição 2008 do Prêmio Mercosul de Ciência e Tecnologia - Brasília: UNESCO, MBC, RECYT/Mercosul, CNPq, Petrobras*.
- Escamilla Alvarado, C.; Ponce Noyola, M.T.; Ríos Leal, E.; Poggi Varaldo, H.M. (2013). A Multivariable evaluation of biohydrogen production by solid substrate fermentation of organic municipal wastes in semi-continuous and batch operation. *International journal of hydrogen energy* 38, 12527-12538. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.124.
- Escamilla Alvarado, C.; Poggi Varaldo, H. y Ponce Noyola, M.T. (2011). Producción de hidrógeno y metano como biocombustibles bajo el esquema de biorrefinería, *Ide@s CONACYTEG*, 6 (71), pp. 526-539.
- Fan, Y.; Li, C. y Lay, J.J. (2004). "Hou H., Zhang G., optimization of initial substrate and pH levels for germination of sporing hydrogen producing anaerobes in cow dung compost. *Biores. Technol.*, vol. 91, pp. 198-193.
- Feng Wu, Shao-Qi Zhou, Yang-Lan Lai y Wen-Jiao Zhong. (2009). Studies on the effects of pretreatment on production hydrogen from municipal sludge anaerobic fermentation. *Natural Science*, 1, 10-16.
- González González, J.F. (s/f). La nueva generación de combustibles: biocombustibles. Grupo de Investigación "GAIRBER", Dpto. de Física Aplicada, EIL UNEX.
- Gutiérrez Jodra, L. (2005). El hidrógeno, combustible del futuro. *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fís. Nat. (Esp)*, vol. 99, n° 1, pp. 49-67.
- Han Wei, Chen Hong, Yao Xin, Li Yong-Feng y Yang Chuan-Ping. (2010). Biohydrogen production with anaerobic sludge immobilized by granular activated carbon in a continuous stirred-tank. *Journal of Forestry Research* 21(4): 509-513. DOI 10.1007/s11676-010-0107-y
- Hans Zurrer y Reinhard Bachofen. (1979). Hydrogen Production by the Photosynthetic Bacterium *Rhodospirillum rubrum*. *Applied And Environmental Microbiology*, pp. 789-793, vol. 37, n° 5. 0099-2240/79/05-0789/0
- Hawkes, F.R.; Dinsdale, R., Hawkes, D.L. y Hussy, I. (2002). Sustainable fermentative hydrogen production: challenges for process optimisation. *Int J Hydrogen Energy* 27(11-12): 1339-1347.
- Henstra, A.M.; Sipma, J.; Rinzema, A. y Stams, A.J.M. (2007). Microbiology of synthesis gas fermentation for biofuel production. *Curr Opin Biotechnol* 18:200-206.
- Hill Jason, Nelson Erik, Tilman David, Polasky Stephen y Tiffany Douglas. (2006). Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proc Natl Acad Sci EE.UU.* A. 25; 103 (30): 11206 a 11210.
- Publicado en internet el 12 de julio de 2006. doi: 10.1073/pnas.0604600103
- Hiroshi Yokoyama, Miyoko Waki, Akifumi Ogino, Hideyuki Ohmori y Yasuo Tanaka. (2007). Hydrogen Fermentation Properties of Unidiluted cow Dung. *Journal of Bioscience and Bioengineering* vol. 104, n° 1, 82-85. DOI: 10.1263/jbb.104.82
- Iyer, P.; Bruns, M.A.; Zhang, H.; Ginke, S.V. y Logan, B.E. (2004). "H₂ producing bacterial communities from a heat treated soil inoculum". *Appl. Microbiol. Biotechnol.* vol. 66, pp. 166-173.
- Lay, J.J. (2000). Modeling and optimization of anaerobic digested sludge converting starch to hydrogen. *Biotechnol Bioeng* 68 (3):269-278.
- Lay, J.J.; Fan, K.S.; Chang, J. y Ku, C.H. (2003). Influence of chemical nature of organic wastes on their conversion to hydrogen by heat-shock digested sludge. *Int. J. Hydrogen Energy*. 28(12), 1361-1367.
- Lee, H.S.; Vermaas, W.F.J. y B.E. Rittmann. (2010) Biological hydrogen production: prospects and challengers. *Trends Biotechnol.* 28, pp. 262-271.
- Lee, M.J.; Song, J.H. y Hwang S.J. (2009). Enhanced bio-energy recovery in a two-stage hydrogen/methane fermentation process. *Water Science & Technology-WST*. 59. 11.
- Lovisa Bjo, Rnsson, Marika Murto, Tor Gunnar Jantsch, Bo Mattiasson Evaluation. (2001). Of New Methods for the Monitoring of Alkalinity, Dissolved Hydrogen and the Microbial Community in Anaerobic Digestion. *Wat. Res. vol.* 35, n° 12, pp. 2833-2840.
- Jay Hanson. (1999). Energetic Limits to Growth. Appeared in *ENERGY Magazine*.
- Jung-Hui Woo y Young-Chae Song. (2009). Influence of Temperature and Duration of Heat Treatment Used for Anaerobic Seed Sludge on Biohydrogen Fermentation. *KSCJ Journal of Civil Engineering* 14(2):141-147. DOI 10.1007/s12205-010-0141-5
- Jui-Jen Chang, Wei-En Chen, Shiou-Yun Shih, Sian-Jhong Yu, Jiunn-Jyi Lay, Fu-Shyan Wen y Chieh-Chen Huang. (2006). Molecular detection of the clostridia in an anaerobic biohydrogen fermentation system by hydrogenase mRNA-targeted reverse transcription-PCR. *Appl Microbiol Biotechnol*, 70: 598-604.
- Kalinci, Y.; Hepbasli, A. y Dincer, I. (2009). Biomass-based hydrogen production: A review and analysis. *Int J Hydrogen Energy*, 34, pp. 8799-8817.
- Ma, C.; Yang, H.H. y Guo, L.J. (2010). Two steps biohydrogen production: biomass pretreatment and fermentation. *The 6th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion*, American Institute of Physics, 98-0-7354-0744-2/10.
- Manikkandan, T.R.; Dhanasekar, R. y Thirumavalavan, K. (2009). Microbial production of hydrogen from sugarcane bagasse using *Bacillus* sp. *International Journal of Chem Tech Research*, CODEN (USA): IJCRGG ISSN: 0974-4290 vol. 1, n° 2, pp. 344-348.
- Mizuno, O.; Ohara, T. y Noike T. (1997). Hydrogen production from food processing waste by anaerobic bacteria. *J Environ Syst Eng* 573:111-118.
- Morgan, Daniel y Sissine, Fred. (1995). Hidrógeno: Tecnología y Política. Informe para (The Committee for the National Institute for the Environment) 1725 KStreet, NW, Suite 212, Washington, D.C. 20006 (202) 5305810.
- Moreno Andrade, I.; Ramos, C. y Buitrón, G. (s/f). Efecto de los sólidos totales iniciales sobre la producción de hidrógeno a partir de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos. Laboratorio de Investigación en Procesos Avanzados de Tratamiento de Aguas, Unidad Académica Juriquilla-Querétaro, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Blvd. Juriquilla 3001, Querétaro, 76230, México.

- Montiel Corona, V.; Sánchez Carrillo, A.R. y Guevara García, J.A. (2010). Biohidrógeno a partir de basura orgánica, Ciencia, tecnología e innovación para el desarrollo de México, año 3, n° 66.
- Mohd Zulkhairi Mohd Yusoff, Nor'Aini Abdul Rahman, Suraini Abd-Aziz, Chong Mei Ling, Mohd Ali Hassan y Yoshihito Shirai. (2010). The Effect of Hydraulic Retention Time and Volatile Fatty Acids on Biohydrogen Production from Palm Oil Mill Effluent under Non-Sterile Condition. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 4(4): 577-587, ISSN 1991-8178.
- Mu'taz Al-Alawi. (2007). Biohydrogen Production by Anaerobic Biological Fermentation of Agriculture Waste. J.W. Sheffield and C. Sheffield (eds.), *Assessment of Hydrogen Energy for Sustainable Development*, 177-185.
- Okamoto, M.; Miyahara, T.; Mizuno, O. y Noike, T. (2000). Biological hydrogen production potential of materials characteristics of the organic fraction of municipal solid wastes. *Water Sci Technol* 41(3):25-32.
- Oh, S.E.; Ginkel, S.V. y Logan, B.E. (2003). The relative effectiveness of pH control and heat treatment for enhancing biohydrogen gas production. *Environ. Sci. Technol.*, vol. 37, n° 22, pp. 5186-5190.
- Sandoval, Claudia Johanna; Carreño de, Mariela; Castillo, Edgar Fernando y Vergara Mendoza, Marisol. (2007). Caracterización Microbiológica de Lodos Anaerobios Utilizados en el Tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos, *Scientia et Technica*, año XIII, n° 35.
- Ren, N.Q.; Li, Y.F.; Wang, A.J.; Li, J.Z.; Ding, J. y Zadsar, M. (2006). Hydrogen production by fermentation: Review of a new approach to environmentally safe energy production. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 9(1):39-42, DOI: 10.1080/14634980500536030
- Romero, M.A.; Romero, L.I. y Álvarez-Gallego, C.J. (2008). Producción de Biohidrógeno a Partir de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos: Puesta en Marcha del Proceso. Departamento de Ingeniería Química y Tecnología de los Alimentos, Universidad de Cádiz, España. Proyecto CTM2007-62164 y beca BES-2008-004390.
- Rukiye Oztekin, Ilgi K. Kapdan, Fikret Kargi y Hidayet Argun. (2009) Comparison of Hydrogen Gas Production from Hydrolyzed Wheat Starch and Glucose by Different Anaerobic Cultures. *International Journal of Natural and Engineering Sciences* 3 (2): 61-66.
- SENER (Secretaría de Energía). (2012). Balance Nacional de Energía, México, D.F. 2013.
- Sompong O-Thong, Chonticha Mamimin y Poonsuk Prasertsan. (2008) Effect of temperature and initial pH on biohydrogen production from palm oil mill effluent: long-term evaluation and microbial community analysis. *Electronic Journal of Biotechnology* ISSN: 0717-3458, vol. 14, n° 5.
- Sun-Kee Han y Hang-Sik Shin. (2004). Performance of an Innovative Two-Stage Process Converting Food Waste to Hydrogen and Methane. *Air & Waste Manage. Assoc.*, vol. 54. 242- 249.
- Venkata Mohan, S. (2008). Fermentative hydrogen production with simultaneous wastewater treatment: influence of pretreatment and system operating conditions, *Journal of Scientific & Industrial Research*, vol. 67, pp. 950-961.
- Valdez-Vazquez, I., Poggi Varaldo, H.M. (2009). Alkalinity and high total solid effecting H₂ production from organic solid waste by anaerobic consortia. *International journal of hydrogen energy* 34, 3639-3646. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.02.039
- Valdez-Vazquez, I.; Sparring, R.; Rinderknecht-Seijas, N. y Risbey, D. (2004). Hydrogen from the anaerobic fermentation of industrial solid wastes. *Chemical Engineering Transactions*, vol. 4.
- Vipin Chandra Kalia y Hemant J. Purohit. (2008). Microbial diversity and genomics in aid of bioenergy. *J Ind Microbiol Biotechnol.* 35:403-419. DOI 10.1007/s10295-007-0300-y
- Xing ,Y.; Fan, Y.T. y Hou H.W. (2010). Production of Cellulose-Hydrogen from Corn Stalk based on Acid-enzyme Two-Stage Pretreatment by Mixed Culture. The 6th International Symposium on Multiphase Heat Mass Trasfer and Energy Conversion, American Institute of Physics. 978-0-7354-0744-2/10.
- Yonghua Luoa, Husen Zhangb, Michael Salernob, Bruce E. Loganb y Mary Ann Bruns. (2008). Organic loading rates affect composition of soil-derived bacterial communities during continuous, fermentative biohydrogen production. *International journal of Hydrogen Energy.* 33 6566-6576.
- Yong Feng Li, Nan Qi Ren, Ying Chen y Guo Xiang Zheng. (2007). Ecological mechanism of fermentative hydrogen production by bacteria. *International Journal of Hydrogen Energy* 32 755-760.
- Yoshiyu Kiueno, Hisato Mofukui, Masa Fumigoto. (2007). Operation of a Two-Stage Fermentation Process Producing Hydrogen and Methane from Organic Waste. *Environ. Sci. Technol.* 41, 1413-1419.