

Procesos sustentables para la producción de biocombustibles: a review

Paulina Marlene Casas-Jiménez¹, César Alejandro Escudero-González¹, Tania Zulema Martínez-Guerrero², Mariel del Carmen Mendoza-Díaz¹, Cristina Ramírez-Barroso¹, Dra. Norma Leticia Gutiérrez-Ortega³, Dra. Esthela Ramos-Ramírez⁴

1 Licenciatura en Ingeniería Ambiental, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato

5 Licenciatura en Ingeniería Ambiental, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato

3 Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato

4 Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de

Resumen

A nivel mundial el uso de energía se ha incrementado con forme el aumento de la población, es por ello que en los últimos años los biocombustibles han tenido un mayor auge en cuestión de desarrollo de tecnología e innovación. Actualmente la principal fuente de energía del mundo es la quema de combustibles fósiles los cuales son un recurso finito y generan un deterioro al medio ambiente emitiendo gases de efecto invernadero y los biocombustibles. Lo anterior resalta la importancia de encontrar alternativa sustentable que contribuyan a disminuir esta problemática. En este trabajo se presenta la revisión de los procesos sustentables asociados a los cuatro principales biocombustibles: bioetanol, biodiesel, biogás y biohidrógeno; analizando la materia prima utilizada, los procesos de producción y casos de estudio en la actualidad, para tener un panorama general del potencial que tienen los biocombustibles como fuente de energía limpia.

Palabras clave: Energía; bioetanol; biodiesel; biogás; biohidrógeno.

Biocombustibles

En los últimos años el crecimiento exponencial de las poblaciones ha provocado que la generación de energía dependa principalmente del uso y quema de combustibles fósiles, lo que ha generado un incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero, los cuales contribuyen en el aumento de la contaminación y al calentamiento global (Edenhofer et al., 2011).

La actual demanda de energía y la contaminación por el uso de combustibles fósiles ha provocado el desarrollo de nuevas alternativas y tecnologías para la generación de energía. Un ejemplo de esto son los biocombustibles los cuales son productos químicos con alto poder energético generados a partir de procesos biológicos o que derivan de la biomasa de organismos vivos (Romero, 2020). Debido a sus características es que los biocombustibles han permitido abastecer la demanda energética sin poner en riesgo al medio ambiente y los ecosistemas vulnerables (Khan et al., 2018).

Existen distintos tipos de biocombustibles y una de sus clasificaciones principales es debido al origen de su biomasa, donde se dividen en cuatro: biocombustibles de primera, segunda, tercera y cuarta generación.

Los biocombustibles de primera generación (1G) son aquellos cuya biomasa se obtiene directamente de los cultivos agrícolas, aprovechando el contenido de almidón, celulosa, azúcar, grasas entre otros componentes principales de cultivos como el maíz, la caña, el trigo, la remolacha y la soja. (Campos et al., 2020) Este tipo de biocombustibles al usar materias primas de uso alimentario, que en algunos países forman parte de la canasta básica de alimentos, generan polémica (Campos et al., 2020) y no son del todo aceptados, a pesar de que su proceso de elaboración es menos costoso económicamente, debido a que los insumos no requieren de tratamientos tan especializados para aprovechar sus nutrientes y al ser procesos como

fermentación y transesterificación donde se emplean aceites y grasas vegetales o animales. (Sotomonte, 2021)

Los biocombustibles de segunda generación (2G) son producidos a partir de material lignocelulósico (Cortés et al., 2019) proveniente principalmente de residuos agrícolas (paja, tallos), forestales (ramas, restos de podas, aserrín) y orgánicos de desechos urbanos (cáscaras de fruta como piña, naranja, plátano, bagazos). (Sánchez, 2019) A diferencia de los biocombustibles de primera generación, estos permiten usar gran cantidad de residuos (Sotomonte, 2021), reincorporando la biomasa de estos a un ciclo de producción en lugar de ser simplemente desechada. De esta manera se contribuye a un modelo de economía circular y desarrollo sostenible, más aceptado por la población, pero, por la complejidad de los residuos y con el afán de rescatar los elementos y nutrientes de la biomasa necesarios para la elaboración de biocombustibles, se requiere un tratamiento más específico, implicando costos elevados en el proceso, complicando su comercialización y la inversión económica en proyectos de este tipo. (Sánchez, 2019)

Los biocombustibles de tercera generación (3G) también denominados "biocombustibles avanzados" son los procedentes de la biomasa de microalgas. Al ser las microalgas la materia prima, tienen la ventaja de ser insumos que no compiten en un mercado de alimentos. Además de las algas, los biocombustibles 3G incluyen a microorganismos como hongos, levaduras y bacterias. A pesar de que se pueden cultivar in situ en lagunas o estanques de poca profundidad requieren condiciones controladas de temperatura y nutrientes, elevando los costos de energía requerida. (Sánchez, 2019)

Por último, con base en esta clasificación por el origen de biomasa, se están considerando los biocombustibles de cuarta generación (4G) los cuales son producidos a partir de materia prima o insumos genéticamente modificados, principalmente microorganismos (levaduras, algas). El desarrollo e investigación actual de este tipo de biocombustibles busca mejorar la tolerancia de los microorganismos y sus nutrientes en los procesos de producción, requiriendo modificaciones como en su pared celular y proteínas, por ejemplo. (Sánchez, 2019)

Bioetanol

El etanol es un alcohol, que en estado puro y desnaturalizado se puede utilizar como combustible, normalmente como aditivo. Se puede fabricar de manera natural a partir de la fermentación alcohólica, o de manera sintética mediante el uso de etileno. (Oiltanking, 2021)

Es común que el bioetanol y el etanol sintético puedan confundirse como sinónimos, ambos tienen el mismo compuesto C_2H_5OH , la diferencia entre ellos es la composición isotópica de los átomos de carbono y el proceso de producción, ya que el primero es a partir de reacciones con insumos naturales y renovables, y el segundo requiere una modificación química del etileno, proveniente del petróleo y gas natural. (Beta Analytic, 2016)

El bioetanol es el biocombustible que pretende sustituir a la gasolina, como una alternativa para reducir el impacto ambiental que tiene no solo su uso, sino también su producción, por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). (Rey-Porras et al., 2021). Se produce principalmente a partir de biomasa que requiere materia prima con un elevado contenido en azúcar (glucosa, sacarosa), almidón y celulosa. Los insumos mayormente usados son la caña de azúcar, el grano de maíz, la remolacha azucarera y el sorgo, o material lignocelulósico de residuos de caña de azúcar y cáscara de piña. (FAO, 2008)

Los mayores productores de bioetanol en el mundo son en primer lugar, Estados Unidos con aproximadamente un 53% de la producción total, en segundo lugar, Brasil con 28%, China con 4%, India con 3% y Canadá con el 1%, además de otros países del mundo con un menor porcentaje. (Torroba, 2020) En 2019, el maíz y la caña fueron las materias primas más utilizadas para producir

bioetanol, requiriendo más de 170 millones de toneladas de maíz (Torroba, 2020), teniendo a Estados Unidos como el mayor productor de bioetanol a partir de este cereal desde el 2005. (Paredes et al., 2020) De manera general, en el proceso de producción de bioetanol se realizan operaciones de sacarificación, fermentación y destilación, pero estas varían de acuerdo con los insumos y las tecnologías empleadas. (FAO, 2008)

Procesos de producción de bioetanol

- a) **Pretratamiento:** puede variar dependiendo de la materia prima utilizada para la producción de bioetanol. Para el caso del maíz, este se debe lavar, moler (ya sea por martillo o rodillo) y mezclar antes de ingresar al reactor. La levadura se separa para que crezca y se utilizará en su etapa de propagación. También se puede suministrar una fuente de nitrógeno para optimizar el metabolismo de la levadura.
- b) **Licuefacción:** se convierte el almidón a dextrinas.
 - **Licuefacción primaria:** minimiza el consumo de vapor y disminuye la viscosidad de la mezcla en la cocción del macerado, añadiendo una enzima α -amilasa.
 - **Degradación del almidón:** ocurre una gelatinización, donde se libera la amilosa y la amilopectina, pero puede ocurrir mediante una hidrólisis ácida o una hidrólisis enzimática, siendo más común esta última debido a sus ventajas.
 - La hidrólisis ácida requiere condiciones extremas para que ocurra la reacción, una temperatura elevada y un pH muy ácido, permitiendo reacciones paralelas que disminuyen el rendimiento de la glucosa.
 - La hidrólisis enzimática es a condiciones de temperatura un poco más baja y un pH con acidez leve, con la ventaja de que la reacción es más controlada y no genera subproductos, llegando a un rendimiento de 95% o mayor. Sin embargo, se necesitan enzimas muy específicas, por lo cual es complicado reciclarlas.
 - **Cocción del macerado:** a una temperatura aproximada de 110°C.
 - **Licuefacción secundaria:** a temperatura controlada entre 85-90°C se añade α -amilasa de nuevo, para que el almidón se transforme en dextrinas.
- c) **Sacarificación:** las dextrinas obtenidas de la licuefacción se transforman a glucosa para luego fermentarla. Se utilizan enzimas glucoamilasas, con tolerancia a una temperatura mucho menor que la de la licuefacción, aproximadamente 65°C, con un pH de 4.5.
- d) **Fermentación:** se disminuye la temperatura del macerado hasta llegar entre 30-35°C, se agrega la levadura, se espera un tiempo aproximado de 48h para que ocurra la fermentación. El proceso es anaerobio, sin embargo, si se utiliza como levadura la *Saccharomyces cerevisiae* ocurre un poco de respiración aerobia que transforma la glucosa en CO₂ con un poco de oxígeno, beneficiando la producción de etanol.
- e) **Posttratamiento:** esta etapa dependerá de hasta dónde se quiere llegar con el proceso de producción, las actividades más comunes son:
 - **Tratamiento de vinazas:** se pretende separar de la vinaza pesada, mediante una centrifugación, la mayor cantidad de sólidos para que quede una fase líquida, conocida como vinaza liviana.
 - **Deshidratación de etanol:** se eliminará el agua. Existen diferentes técnicas para hacerlo, como: adsorción con tamices moleculares, destilación azeotrópica (donde se añade un tercer componente o agente de separación a la mezcla para facilitar la separación en las columnas de destilación), destilación extractiva (consiste en un proceso de vaporización parcial con la presencia de un agente de separación no volátil en la mezcla) o la pervaporación (evaporación a través de membranas donde el etanol se concentrará en el retenido), entre otras.
 - **Recuperación de levaduras:** para reintegrarlas al proceso y disminuir costos.

- Obtención de CO₂: al ser un biocombustible se pretende que la emisión de GEI sea menor, por lo tanto, en lugar de liberar el CO₂ producido en la fermentación sería mejor recuperarlo y utilizarlo para otro proceso. Sin embargo, requiere de una serie de operaciones complejas para ello. (Dorsch et al., 2020)

Uno de los propósitos principales al realizar investigación y experimentación científica en el ámbito de los biocombustibles es encontrar procesos más eficientes, desarrollar tecnologías menos costosas y con mayor rendimiento de las materias primas y el producto obtenido. Para el caso del bioetanol, estos son algunos estudios y modificaciones que se han realizado:

Vellosillo (2020) menciona que se han hecho modificaciones a cepas de levaduras, como la *Saccharomyces cerevisiae*, por ejemplo, la llamada XUSE, que es capaz de fermentar xilosa, permitiendo un buen rendimiento de biomasa de 0,43 g de etanol/ g de xilosa.

En un estudio de Avila et al., 2020, se estimó de forma teórica el potencial de producción de bioetanol a partir de residuos de cacao en Ecuador, mediante un modelo matemático de la hidrólisis ácida en la celulosa presente en la corteza del cacao y se concluyó que es una opción atractiva, alternativa a la caña de azúcar.

Durante el 2019, Bonilla et al., realizaron una investigación donde a partir de residuos lignocelulósicos de cáscara de banano maduro al 60% molido, adicionando polietilenglicol (masa molecular de 1500) en concentración de 0.03 g/g biomasa, obtuvieron bioetanol con un rendimiento de 7% v/v, con la característica de que el método de producción que probaron es menos costoso a comparación de otros procedimientos, con mayor rendimiento y rapidez en la elaboración.

Apaza (2021) realizó un experimento donde al optimizar el proceso de hidrólisis enzimática, modificando variables como el tiempo de la hidrólisis y la concentración enzimática de la cascarilla de arroz como materia prima en la producción de bioetanol se favorece la obtención de azúcares reductores. Se obtuvo un 96.40% de rendimiento de bioetanol con 5g de cascarilla de arroz como base para la fermentación.

Los estudios anteriores comprueban que continuar la experimentación e investigación en la producción de bioetanol, contribuirá a mejorar los procesos y permitirá identificar las mejores alternativas en cuanto al bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos, para ver de qué materia prima se obtiene más rendimiento y así aprovechar gran cantidad de residuos orgánicos generados diariamente.

Biodiesel

El biodiesel es el biocombustible líquido alternativo al diésel convencional; es una mezcla de ésteres metílicos que se produce a partir de combinar aceites vegetales (soja, palma, girasol) o grasas animales (pescado, cerdo) o algas (Álzate, 2009), mediante procesos de transesterificación con un alcohol y un catalizador (FAO, 2008; Jiménez et al., 2020).

En 2019 la materia prima más utilizada en la producción de biodiesel fue el aceite de palma, soja y colza, además de aceite vegetal usado y grasas animales. En ese mismo año, se requirió el 26% de la producción mundial de aceite de colza, el 18% del aceite de soja y el 16% del aceite de palma (Torroba, 2020).

Los cinco mayores productores de biodiesel en el mundo son Indonesia en primer lugar, con aproximadamente un 16% de la producción total; en segundo lugar, Estados Unidos con 13%; Brasil con 11%; Alemania con 8% y Francia con 5%, entre otros con un menor porcentaje. (Torroba, 2020)

Para la elaboración de biodiesel generalmente se realiza la extracción de la materia prima (aceites y grasas) y posteriormente una esterificación y transesterificación. Sin embargo, el proceso dependerá de la tecnología, de si las materias primas a utilizar son vírgenes o usadas, y la caracterización de estos, para saber si requieren de un pretratamiento o con base a su contenido de ácidos grasos definir cuál es la mejor reacción química para aplicar y evitar la formación de subproductos o residuos.

Proceso de obtención de biodiesel

Para elaborar biodiesel se puede usar grasa animal o aceites vegetales; para el caso de las grasas se hará una extracción y para los aceites una caracterización, sin importar si son aceites usados o vírgenes.

- a) Extracción de grasa animal: se debe calentar el tejido membranoso para modificar la estructura celular y liberar la grasa de este. Esta etapa se puede realizar mediante fusión húmeda, seca o usando solventes. (Sánchez et al. 2020)
- b) Caracterización del aceite: es una parte fundamental para definir si el proceso constará de una o dos etapas, esterificación y transesterificación. (Contreras, 2019) Las especificaciones a analizar en el aceite son la densidad, la viscosidad, el índice de acidez, índice de saponificación, índice de yodo y de peróxido, entre otros. (Sánchez et al. 2020)
- c) Pretratamiento: se realiza con el fin de obtener rendimientos más altos en las reacciones, generando biodiésel de mejor calidad y evitando obstrucción de conductos del motor. Los aceites por usar deberán ser de preferencia anhidros (no contener agua) y con poca acidez o cantidad de ácidos grasos libres (AGL) para evitar la reacción de saponificación o formación de jabones. Entonces el aceite se purificará o refinará para reducir su contenido de humedad y AGL. (Sánchez et al. 2020)
- d) Neutralización de ácidos grasos: los AGL son aquellos que en presencia de agua reaccionan con un catalizador básico como el NaOH o KOH, ocurriendo la saponificación y formando jabón. Para neutralizarlos el costo suele ser elevado, pero el procedimiento consiste en tratar soluciones con diferentes concentraciones del catalizador elevando la temperatura sobre los 70°C, así las emulsiones formadas durante la agitación podrán separarse mediante el lavado, aunque puede tener complicaciones. (Sánchez et al. 2020)
- e) Esterificación: cuando los aceites o grasas tienen acidez en un porcentaje superior al 4% se lleva a cabo esta reacción de catálisis ácida reversible (Caye et al., 2020) que convertirá los AGL reaccionando con alcohol en ésteres de alquilo y agua con restos de alcohol y algunas impurezas. (Sánchez et al. 2020)
- f) Transesterificación: esta reacción es de catálisis reversible alcalina. Primero el triglicérido se transforma en un diglicérido más un éster, luego el diglicérido se volverá monoglicérido y producirá una molécula más de éster y por último, del monoglicérido se produce la glicerina y una molécula adicional de éster (Marín, 2020), como se muestra de manera simplificada en la figura 1. La transesterificación se hace en presencia de un catalizador (NaOH y KOH, entre otros) para mejorar el rendimiento y velocidad de la reacción. (Contreras, 2019)
- g) Purificación: tiene el fin de que el pH y las concentraciones de contaminantes en el biodiesel cumplan con los niveles que señala la normatividad. (Sánchez et al., 2020) Se puede realizar por diferentes medios, tales como el lavado y secado.
- h) Lavado: se eliminan los restos de jabón que se hayan formado y permite recuperar los residuos de catalizador, alcohol y glicerina. (Marín, 2020) El lavado se hace con agua, añadiendo el 20% del volumen de biodiesel y luego de mezclarlos se deja reposar para que se separe en fases y mediante decantación queda el biodiesel. (Sánchez et al., 2020)
- i) Secado: su objetivo es eliminar la humedad del biodiesel, mediante el calentamiento a temperaturas elevadas, de un poco menos de 120°C para evitar la ignición del líquido. (Sánchez et al., 2020)
- j) Separación: después de recuperar el alcohol para recircularlo en el proceso, se obtiene el metiléster y la glicerina y debido a su diferencia de densidades se pueden separar por gravedad. (Marín, 2020)

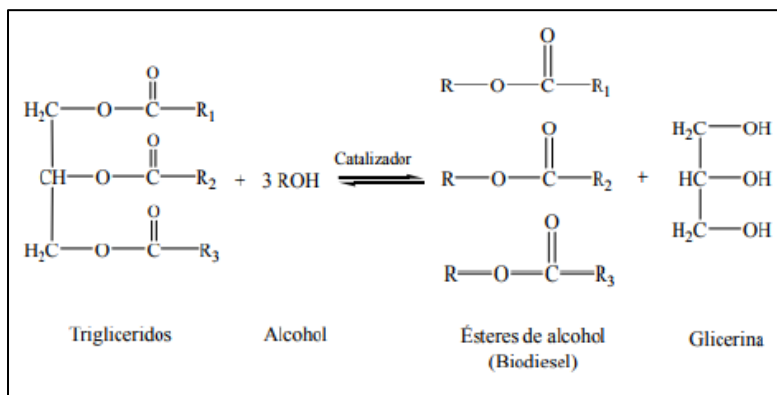


Figura 1. Reacción general de transesterificación. Fuente: Contreras et al. (2019)

En lo referente al biodiesel también se han realizado múltiples investigaciones, algunas de ellas para bicombustibles de segunda generación como Sánchez et al. (2020) quien hizo un estudio sobre producción de biodiesel a partir de residuos grasos de pollo, donde tan sólo para un rendimiento de biodiesel del 61.48% respecto a la materia prima, a partir de 400kg de residuos grasos se requiere de equipo especial que logre extraer el aceite de pollo. Lescano (2019) por su parte, analizó el caso del matadero municipal Tingo María, teniendo como porcentaje más alto el 83.67% de producción de biodiesel a una temperatura de 55°C mediante aceite de grasa animal, obtenido de sebo de los animales.

Otros con el fin de ver la efectividad de utilizar como materias primas cultivos alternativos que no perjudiquen la reserva alimentaria de los países, por ejemplo, Gad et al. (2021) y Martínez et al. (2019) analizaron el uso de la *Jatropha*, principalmente por obtener de ella un aceite que no es para consumo humano, ya sea analizando el rendimiento de diferentes métodos de extracción del aceite de *Jatropha* con el fin de ver cuál es más eficiente, para el primer caso y teniendo como resultado de la producción un rendimiento de biodiesel máximo de 99% de ésteres metílicos de ácidos grasos para el segundo caso. La tabla 1 compara las distintas fuentes de materia prima que se emplean para la producción de biodiesel en base al terreno cultivado, el rendimiento y el contenido de aceite.

Tabla 1. Comparación de distintas fuentes de materia prima para la producción de biodiesel. Fuentes: Fernández et al. (2012), Sánchez (2019), Contreras et al. (2019)

Materia prima	Kg de aceite / ha	Rendimiento (ton/ha)	Contenido de aceite (%)	Aceite producido (L/ ha)
Maíz	145	-	-	172
Soja	375	1.6	17	446

Mostaza	481	-	-	572
Girasol	800	1.7	37.5	-
Cacahuate	890	-	-	-
Palma	-	14.8	22	1892
Jatropha	-	2	35	-
Canola	-	1.5	38	-
Cártamo	-	1.1	35	-
Microalgas	-	-	-	12000-100000

Aplicando la producción de biocombustibles 3G, Merma et al. (2020) realizó una investigación con tres especies distintas de microalgas para generar biodiesel, de las cuales sólo de la *Chlorella vulgaris* se obtuvo suficiente aceite para que ocurra la reacción de transesterificación, resultando biodiesel con un rendimiento de 83.33%.

Uno de los problemas principales en la producción de biodiesel es que al realizar un mal proceso pueda ocurrir la formación de jabón debido a la presencia de impurezas como los AGL y que entre la materia prima más utilizada se tiene el aceite de soja y de palma, lo cual ha fomentado la deforestación de bosques y selvas, gracias a la demanda elevada que tienen esos cultivos. He ahí dos factores importantes a considerar para valorar las investigaciones que permiten mejorar los procesos y encontrar alternativas más viables y menos perjudiciales para el ambiente.

Biogás

Barrera et al., (2019) definen al biogás como una mezcla de diversos gases (principalmente metano) los cuales son generados por la descomposición o digestión anaerobia de la materia orgánica. En este proceso se aprovecha el contenido bacteriano del material orgánico (sustrato) que en la ausencia de oxígeno llevan a cabo un proceso de degradación cuyos productos finales son el digerido (materia orgánica procesada) y el biogás (Parra-Ortiz, 2019). En la tabla 2 se enuncian los principales componentes del biogás y su porcentaje de producción.

Tabla 2. Composición química del biogás. Fuente: Barrera et al., 2019

Componente	Fórmula	Porcentaje (V/V)
Metano	CH ₄	40 - 70
Dióxido de Carbono	CO ₂	30 - 60
Hidrógeno	H ₂	0.1
Nitrógeno	N ₂	0.5
Monóxido de carbono	CO	0.1
Oxígeno	O ₂	0.1
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	0.1

Una de las principales características del biogás es su poder calorífico de 23 MJ/m^3 el cual puede aumentar si se elimina su contenido en CO_2 . Es por esta característica que el biogás en México es utilizado principalmente en la generación de energía térmica, mecánica o eléctrica y es considerado un bioenergético de gran impacto, pues es capaz de sustituir los combustibles fósiles en cuestión de generación de energía (Cortés, 2019). En base a lo anterior la Secretaría de Energía menciona que existe un potencial de 3000 MW para la generación de energía a través del uso de biogás proveniente del aprovechamiento del metano (SENER, 2012).

Las principales fuentes de producción de biogás son la vegetación, los cultivos sumergidos (plantaciones de arroz y totorales), pantanos y humedales (pudrición de la vegetación en el fondo), estiércol de animales de granja, desagües y en los rellenos sanitarios. (Barrera et al, 2019)

La producción de biogás es regida por un proceso metabólico denominado digestión anaerobia (DA) la cual se desarrolla a través de 4 etapas consecutivas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. En la hidrólisis se transforma por acción de enzimas extracelulares producto de bacterias hidrolíticas realizan la ruptura de los compuestos de alto peso molecular (proteínas, carbohidratos o lípidos), con el objetivo de generar compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos). Dichos compuestos pasan posteriormente a la fase acidogénica o fermentativa, en esta etapa son producidos principalmente ácido acético, alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono. La fase acetogénica consiste en la transformación de los ácidos grasos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono para posteriormente continuar con la última etapa, la metanogénesis, en la cual se aprovechan los productos de la etapa anterior para producir metano (Segovia, 2019). En la figura 2 se observa un diagrama con las etapas y los microorganismos involucrados en la digestión anaerobia.

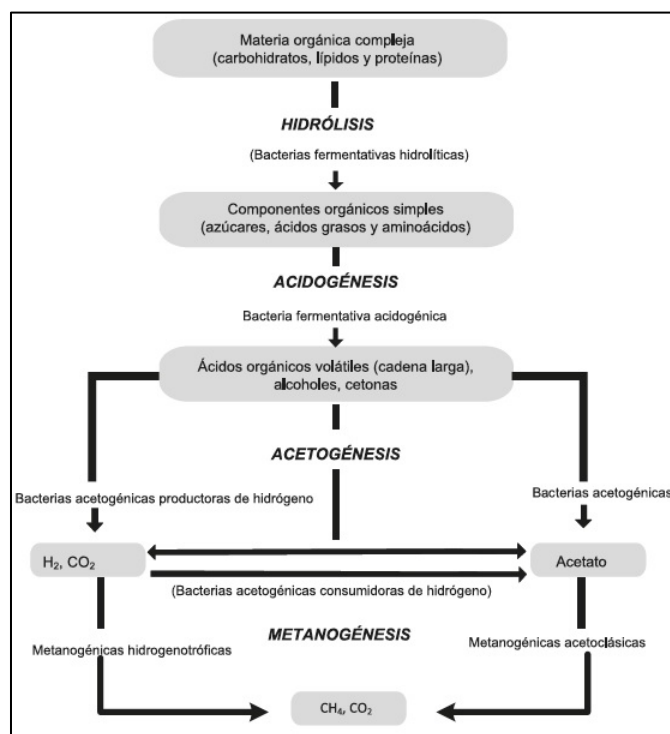


Figura 2. Esquema de la digestión anaerobia de la materia orgánica. (Moraes et al, 2015)

Para llevar a cabo una digestión anaerobia y por ende una producción de biogás se requiere de un biodigestor, el cual, en su definición más simple, es un recipiente cerrado herméticamente e

impermeable, en el cual se deposita la biomasa (Torres, 2020). A lo largo de los años han existido diversos tipos de biodigestores, de los cuales resaltan unos más que otros por su producción de biogás, por su bajo costo o por su tiempo de vida útil; entre los más reconocidos a nivel mundial son los siguientes:

- Biodigestor tipo hindú o de campana flotante (Figura 3a): Este tipo de biodigestor consta de un tanque vertical de fibra de vidrio reforzado, el reactor es construido por una pared de ladrillo al igual que el fondo y cuenta con una campana que tiene la función de recolectar el biogás generado. Con el uso de esta campana se logra una presión constante lo que a su vez genera una operación eficiente. (Conde et al, 2020)
- Biodigestor tipo chino o de domo fijo (Figura 3b): Los biodigestores de domo fijo son construidos a base de ladrillos y hormigón sin embargo no cuentan con una campana flotante para el almacenamiento del biogás ya que el biogás generado se mantiene a volumen constante en el interior mientras la presión varía a medida que se produce o libera el biogás. Este tipo de biodigestores una amplia vida útil ya que pueden durar aproximadamente 20 años. (Arenas - Parra-Ortiz, 2019)

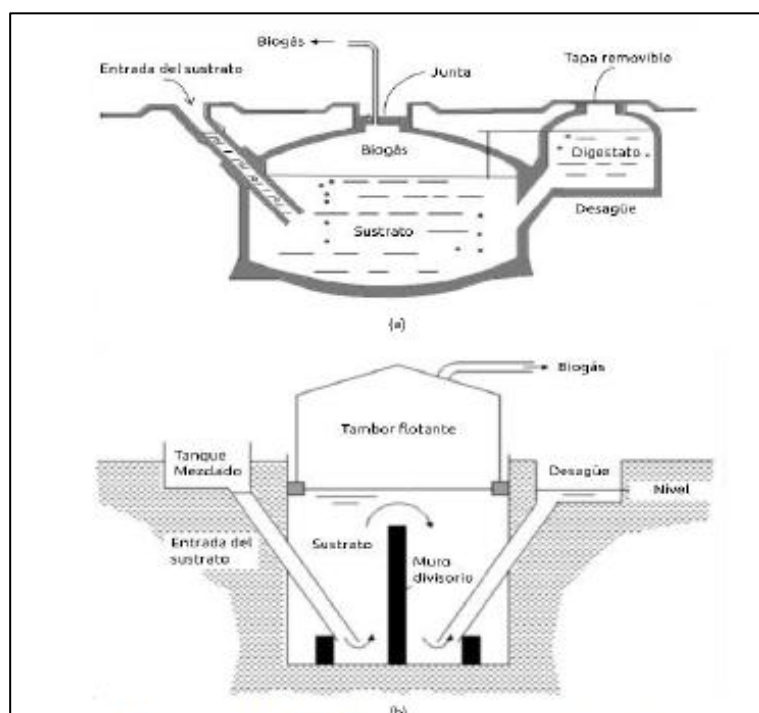


Figura 3. (a) Biodigestor de domo fijo, (b)

biodigestor de campana flotante. (Parra-Ortiz, 2019)

- Biodigestor de estructura flexible (Figura 4): Este biodigestor nace de la necesidad de reducción de costos, ya que debido a los procesos de construcción de los biodigestores anteriores estos resultaban incosteables. Es por ello por lo que para este tipo de biodigestores se cambiaron los materiales y la estructura llevando a cabo un nuevo diseño en donde se cambiaron los ladrillos, el cemento y el hormigón por polietileno para formar una bolsa que pudiera contener el biogás y el sustrato. En este tipo de biodigestores el biogás se acumula en la parte superior de la bolsa lo que genera un aumento en el tamaño de esta a medida que se produce un volumen de gas cada vez mayor, sin embargo, para el correcto uso de estos

biodigestores se debe regular el paso del gas ya que presenta un volumen determinado por el tamaño de la bolsa (Arenas, 2019).



Figura 4. Biodigestor de polietileno. Fuente: Propia

La producción de biogás dentro del biodigestor depende de un correcto desarrollo de la digestión anaerobia la cual a su vez depende íntegramente de cinco parámetros clave: pH, Temperatura, relación C/N, tiempo de retención hidráulica y la carga orgánica (Gutiérrez, 2011).

El pH es el parámetro que permite medir las concentraciones de los iones hidrogeno o hidroxilo en el medio. En un proceso de digestión anaerobia el pH afecta a los organismos metalogénicos ya que estos son altamente sensibles a valores de pH menores a 6.5 y mayores a 8.0 por lo que una variación en el pH fuera de valores neutros provoca una reducción e incluso la inhibición de la actividad bacteriana (Arius et al., 2019 – Moreno, 2020).

La temperatura determina la velocidad de degradación de la materia orgánica y por ende la producción de biogás ya que, conforme aumenta la temperatura también crece la tasa de hidrólisis de los compuestos orgánicos complejos y se promueve el crecimiento microbiano (Auris et al., 2019). Para llevar a cabo una óptima producción de biogás se pueden utilizar diversos rangos de temperatura, ya que el proceso de digestión puede ser psicrófilico, con temperaturas inferiores de 20 °C, mesófilico entre 25°C y 40°C, y termófilico entre 45°C-60°C (Arius et al., 2019 – Moreno, 2020).

Con referencia a la relación carbono/nitrógeno, este parámetro indica la proporción de carbono, nitrógeno y fósforo en el sustrato ya que estos elementos son de suma importancia para el crecimiento de los microorganismos. La relación óptima es de 100:30:1, puesto que las proporciones fuera de esta relación ideal provocan deficiencias en la capacidad tampón o en la insuficiencia de nutrientes (Moreno, 2020).

El tiempo de retención hidráulica como se mencionó anteriormente es un parámetro esencial al momento de realizar una digestión anaerobia ya que se debe garantizar que sea un tiempo que permita tanto la fase de hidrólisis como la actividad metanogénica, ya que ésta última empieza a partir de tiempos de retención entre 5 y 15 días (Moreno, 2020).

Por último, la carga orgánica alimentada, ya que, si el proceso es continuo, es de suma importancia el determinar la cantidad de materia orgánica que será agregada para un determinado tiempo de retención hidráulica ya que si se excede la carga esto puede ocasionar una desestabilización del sistema ya que las bacterias acidogénicas producirían ácidos rápidamente y las metanogénicas no podrían consumir estos ácidos a la misma velocidad de producción (Gutiérrez, 2011).

A partir de lo antes planteado en el mundo se han realizado diversas investigaciones, así como la implementación de nuevas tecnologías con el objetivo de generar ciencia e innovar en la producción

de un biocombustible de alto impacto como lo es el biogás. A continuación, se enuncian algunos casos de estudio referentes a la producción de biogás:

Uno de los estudios más representativos es el titulado “Biogás, la energía renovable para el desarrollo de granjas porcícolas en el estado de Chiapas”, en este artículo los autores estiman el potencial de biogás, energía eléctrica y reducción de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) generado a partir del aprovechamiento del estiércol proveniente de 39 granjas porcícolas tecnificadas en 14 municipios del Estado de Chiapas. Dentro de los resultados se encontró que con el empleo de biodigestores en granjas porcícolas es posible la generación de energía limpia, en los catorce municipios que cuentan con granjas porcícolas tecnificadas existe un potencial de 5,381,925 m³ de biogás por año, donde el potencial por cerdo es de 0,21 m³ por día. Además, con el metano estimado, se calculó un potencial de generación de 7,593 Mega watts de energía eléctrica por año (Venegas et al., 2019).

Otro estudio que es importante resaltar es el referente a la compresión de biogás a una escala piloto, esto con el objetivo de facilitar la distribución y comercialización de este biocombustible. En este trabajo se propone un sistema de compresión compuesto por la sección de filtración, reducción de gases no combustibles (como dióxido de carbono) y la sección de compresión para ser envasado en cilindros. Como resultados de este estudio se describe que la compresión se realizó en tres etapas; la primera de esta consistió en comprimir el gas hasta 10 bar, la segunda donde se comprimió a 40 bar y por último la tercera etapa en donde el biogás fue comprimido a 90 bar. Además, la composición del biogás mantuvo una concentración del metano por encima de un 84% (Souza, 2020). Este estudio nos demuestra que es posible envasar, transportar y comercializar el biogás, sin embargo, aún se deben realizar pruebas y experimentos dado la escala de este trabajo.

Por otra parte, el uso de biodigestores no solo se remite a la generación de biogás, también después del proceso de digestión se genera un residuo conocido como digerido o biol el cual puede ser utilizado como biofertilizante, puesto que este residuo está bastante enriquecido con nitrógeno, potasio y fósforo, elementos químicos que nutren a los cultivos (Bhawna, 2020). En concordancia con este punto en el trabajo de (Huamán, 2019) se presentan múltiples investigaciones del uso del biol aprovechando el estiércol de animales (vacuno, gallinaza, ovino, entre otros) y de pescado triturado en cultivos de rábano. En el estudio se menciona que el biol a base de estiércol vacuno tuvo el mejor resultado, ya que se obtuvieron las siguientes concentraciones de nutrientes: 0.64 g/l de fosforo, 2.52 g/l de potasio, 2.24 g/l de calcio y 0.5 g/l de magnesio. En referencia a la mejor dosis para la aplicación al cultivo del rábano (*Raphanus Sativus*) fue del 5% de biol, obteniendo la planta una altura de 41.38 cm, con un promedio de número de hojas de 6.4, una longitud de raíz 5.12 cm y un diámetro de la raíz con 3.75 cm.

Todas las investigaciones presentadas anteriormente denotan que el biogás es uno de los biocombustibles más desarrollados y estudiados a nivel mundial, esto se puede deber a su practicidad de diseño e implementación, al aprovechamiento de un residuo (como lo es el estiércol de ganado) y a su potencial energético. Sin embargo, su producción requiere de un monitoreo constante de pH y temperatura y puede llegar a tener un costo inicial elevado.

Biohidrógeno

El hidrógeno es el más simple de los elementos dentro de la tabla periódica y a su vez el más abundante en el universo en forma gaseosa, tiene un peso atómico de 1.00797 y dentro de la superficie terrestre es común encontrarlo en compuestos como el agua, la biomasa o como parte de la litosfera y la hidrosfera (Álvarez, 2019; Zahuantitla, 2020).

En los últimos años, el biohidrógeno ha tomado gran relevancia como biocombustible debido a su contenido energético de 122 KJ/g el cual supera a cualquier otro biocombustible: Metano (119.66 KJ/g), metanol (20.08 KJ/g), etanol (26.78 KJ/g) y gasolina (44.35 KJ/g) (Solowski, 2018);

Zahuantitla, 2020). Es por esta característica que las principales aplicaciones del biohidrógeno son como combustible para transportes, motores de combustión y turbinas, de igual forma es utilizado para la generación de energía eléctrica utilizado pilas de combustible que funcionan a base de H₂ (Noblecourt et al., 2018; Abe et al., 2019).

La producción de biohidrógeno es llevada a cabo por diversos microorganismos en diferentes procesos y rutas metabólicas. Sin embargo, se pueden agrupar en dos categorías: los procesos dependientes de la luz y los procesos independientes de la luz (Zahuantitla, 2020).

Dentro de los procesos dependientes de la luz se encuentra la biofotólisis y la fotofermentación. La primera de ellas es un proceso donde se usan microorganismos como catalizadores para convertir energía solar y agua (H₂O) a hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂). Esta reacción se lleva a cabo gracias a las hidrogenasas de hierro, a través de las cuales los microorganismos usan protones para producir biohidrógeno (Romero, 2020; Zahuantitla, 2020). En cambio, la foto-fermentación es un proceso fotosintético que consiste en la degradación de un sustrato (principalmente ácidos grasos) los cuáles serán los donadores de electrones, que serán transferidos a la enzima nitrogenasa mediante la cadena transportadora de electrones y las ferredoxinas, esto resulta en la formación de H₂ (Alvarez, 2019; Zahuantitla, 2020).

Como parte de los procesos independientes de la luz se encuentra la fermentación oscura la cual es una “variación” al proceso de digestión anaerobia ya que en vez de transformar la materia orgánica en CH₄ y CO₂ en la fase de metanogénesis se favorece la obtención de H₂ alterando la cadena trófica y evitando el último paso de consumo de hidrogeno por las bacterias metanogénicas (Fuentes, 2020). En la figura 5 se observan los métodos biológicos para la producción de biohidrógeno con sus respectivas reacciones.

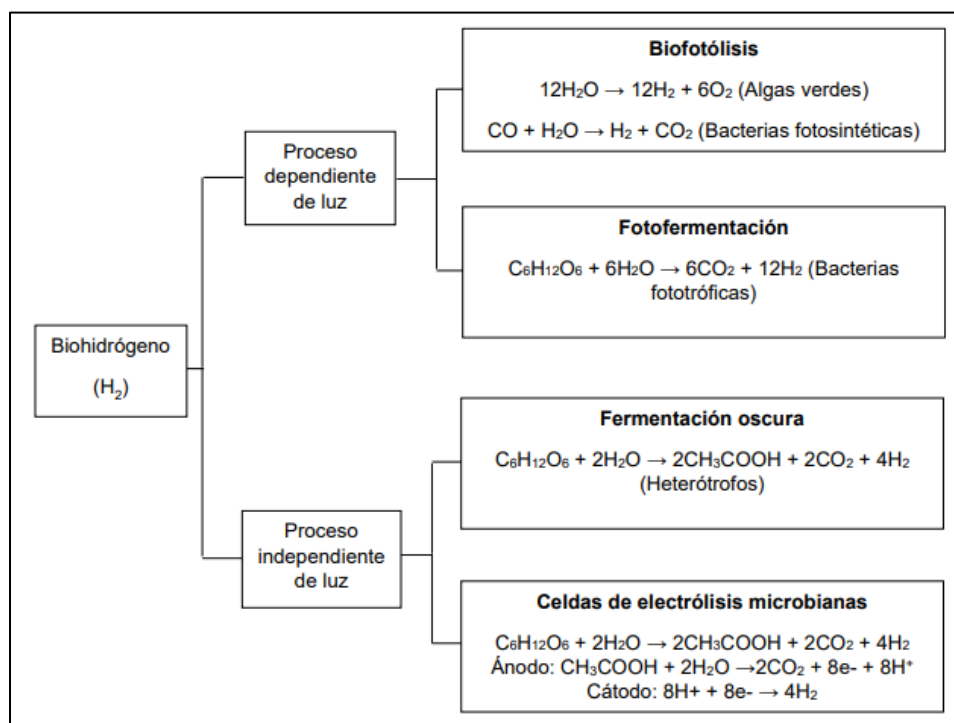


Figura 5. Métodos biológicos de producción de hidrógeno. Fuente: Zahuantitla, 2020

Actualmente la producción de biohidrógeno en el mundo es baja debido a las complicaciones asociadas a su eficiencia, coste de producción, uso, distribución y almacenamiento por esta razón es indispensable una mejora de procesos y una reducción de costos. Además, la purificación de hidrogeno requiere de cambios de temperatura y presión bruscos por lo cual hoy en día las técnicas de purificación son muy poco efectivas y no llegan a asegurar un hidrogeno totalmente puro (Romero, 2020)

Debido a lo anterior las investigaciones y trabajos realizados están enfocados a mejorar la eficiencia en la producción de este biocombustible ya sea innovando en los procesos de producción

o buscando un inóculo o consorcio microbiano que sea prioritariamente productor de hidrogeno como por ejemplo en el trabajo titulado “Metagenómica de un biorreactor enfocado a producción de biohidrógeno en el proceso de aprovechamiento de vinazas tequileras empleando inóculo pretratado” en donde se encontró que, en fermentaciones mesofílicas en lote con diferentes variaciones como la presencia o ausencia de nutrientes o la procedencia del inóculo, las poblaciones microbianas se enfocan a ser aquellas que se caracterizan por ser anaerobias estrictas, productoras de hidrógeno y de ácidos grasos volátiles tales como *Klebsiella* o *Clostridium* (Muñoz, 2021).

Otro estudio que resulta relevante en cuestión de mejoramiento de la eficiencia en la producción de biohidrógeno es el trabajo realizado por Pascualone (2019), donde se estudió la producción de gas hidrógeno por fermentación a partir de glucosa utilizando un cultivo mixto de vermicompost enriquecido por shock térmico. Dentro de los resultados obtenidos se identifica que la mayor producción de hidrógeno fue de 394 ml/l, además, se obtuvieron con 2.5 g SSV/l inoculados con un 70% de eficiencia de degradación del sustrato y el rendimiento de hidrógeno más alto fue de 79.8 ml H₂/g glucosa.

Los estudios anteriores comprueban que se debe continuar la experimentación e investigación en la producción de biohidrógeno ya que esta permitirá una mejora en los procesos y permitirá su aprovechamiento, implementación y distribución para su uso real como bioenergético.

Conclusiones

El panorama general de los combustibles es prometedor ya que como se describió anteriormente, en el mundo se han desarrollado y mejorado las diferentes formas y procesos para generar energía a partir de la biomasa. Sin embargo, se debe de considerar el tema de sustentabilidad, ya que no sería viable implementar un sistema de biocombustible que afecte las reservas alimenticias de los países o incluso modifique ecosistemas impactando directamente a la biota y los recursos con tal de satisfacer la demanda de energía.

Los biocombustibles no son la solución única y completa al problema de la emisión de gases de efecto invernadero generados a partir de la quema de combustibles fósiles, sino que es una tecnología que debe de ser considerada complementaria con las otras fuentes alternas de energía buscando así la sostenibilidad energética limpia.

En esta revisión y análisis de los diferentes biocombustibles se puede concluir que el desarrollo y la implementación de estos son el primer eslabón para entrar a una economía circular dado que de los residuos generados de diferentes actividades económicas la biomasa puede ser utilizada como materia prima e insumos en la generación de energía y con ello satisfacer la demanda actual.

Referencias

- Alonso Segovia, G. (2019). Efecto de elementos traza en la digestión anaerobia del residuo de fresa.
- Álvarez Acosta, D. L. Producción de Hidrógeno al reaccionar agua en el intermetálico Al-Li activado mediante molienda mecánica.
- Álzate C. A. C. (2009). Perspectivas de la producción de biocombustibles en Colombia: contextos latinoamericano y mundial. *Revista de ingeniería*, (29), 109-120.
- Apaza Condori, Y. M., & Ramirez Medina, G. K. (2021). Optimización de la hidrólisis enzimática en cascarilla de arroz (*oryza sativa*) para la obtención de bioetanol.
- Arenas Guayazan, B. D. (2019). Propuesta para el diseño de un biodigestor anaerobio como sistema de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, generados en las viviendas del proyecto "La Villa Solar" ubicado en la ciudad de Buenaventura-Colombia
- Auris Retamozo, R. I., & Morales De La Cruz, F. K. (2019). Evaluación de la influencia de la temperatura en el tiempo de producción de biogas de excretas de bovino en el centro poblado de callqui grande-huancavelica.
- Avila, J. M. S., Noboa, J. W. D., Rivera, F. R. P., & Quezada, J. P. S. (2020). Estimación del potencial de producción de bioetanol para los residuos de la corteza del cacao en Ecuador. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 21(3), 1-20.
- Barrera, M. Á., Maicelo, J. L., Gamarra, O. Á., Oliva, M., Leiva, S. T., Taramona, L. Á., ... & Ordinola, C. M. (2019). Biogás: producción y aplicaciones.
- Beta Analytic. (2016, 30 noviembre). Distinguiendo entre el bioetanol y el etanol de petróleo. Beta Analytic - ASTM D6866 Lab, Nitrates in Water Testing. <https://www.betalabservices.com/espanol/biocombustibles/bioetanol-versus-etanol-de-petroleo.html>
- Bonilla, H. R., Balón, C. M., Moreno, A. P., & Pesantez, F. R. (2019). Estudio cinético de la producción de bioetanol a partir de residuos agroindustriales de la cáscara de banano maduro. *Industrial data*, 22(1), 187-202.
- Campos Martín, J. M., Chica Lara, A., Dómine, M. E., García Martínez, T., Pawelec, B., Pinilla Ibarz, J. L., ... & Suelves Laiglesia, I. (2020). *Biocombustibles*.
- Caye M. Drapcho, Ph.D.; Nhuận Phú Nghiê, Ph.D.; Terry H. Walker, Ph.D. *Biofuels Engineering Process Technology*, Second Edition. Biodiesel, Chapter (McGraw Hill: New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto, 2020).
- Conde Paccelli, M., & Fanelli, N. M. (2020). *Proyecto de inversión para la producción de biodigestores de uso urbano-rural* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería; Argentina).
- Contreras, L., López, M., Martínez, E., & Villavicencio, S. (2019). Producción de biodiesel a partir de desechos de aceites a nivel de laboratorio. *Revista científica Ingeniería y Ciencia de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Rafael Landívar*, 1(17).
- Contreras, L., López, M., Martínez, E., & Villavicencio, S. (2019). Producción de biodiesel a partir de desechos de aceites a nivel de laboratorio. *Revista científica Ingeniería y Ciencia de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Rafael Landívar*, 1(17).
- Cortés-Sánchez, M. D., Gata-Montero, E. M., Pipió-Tertero, A., Rivas, Á. R., & Sánchez-Santos, J. M. (2019). Biocombustibles: tipos y estrategias de producción. *MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, (35), 6.
- Dorsch, Q., Leoni, S., & Tarnovsky, N. (2020). Diseño de planta de producción de bioetanol (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería; Argentina).
- Ecopetrol. (2014). *Biocombustibles*.
Nuevoportal.ecopetrol.com.co. Retrieved 19 October 2020, From https://nuevoportal.ecopetrol.com.co/wps/portal/e/s/ecopetrol-web/medio-ambiente/gestion-ambiental-proactiva/eficiencia/biocombustibles/!ut/p/z1/jdHLDsIgEAXQb_ElMAH7WiK1tDSGSqUqG90VaeJrYfx-3GjiaOwljk3wwUW2IaFU38b9v11OJ_6w3jehniXNih1BVhDkguQXKlpdCRthmz9BPBISWDhLa-yYsyX2UpWlJ5vPKZRa3LFmpdFiksdZsboRwuYvwwT4Dwz_0JE0h6axalEd7GggTzbpV8AivddA5mjNfK0DhJ9AuHwFzVi5NrWaqiV6A-gXqHT1yEjjeJV9AJ0aF8zhtkKzJK_ujRd5xdjl67zcvVI-9n0zuSXxLiw!/?uri=nm:oid:Z6_8P1AGI01K07D30A2A1JFG5MMU3
- Edenhofer, O., Pichis-Madruga, P. M., & Sokona, Y. (2011). Fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático. In Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. [https://doi.org/ISBN 978-92-9169-331-3](https://doi.org/ISBN%20978-92-9169-331-3)
- Encalada Rosales, P. E. (2021). Aislamiento, identificación y evaluación del potencial generador de biocombustibles de desmodemus communis procedente de la reserva biológica Limoncocha.
- Etanol (Alcohol) | Glosario | Oiltanking. (2021, 27 mayo). Oiltanking 2021. <https://www.oiltanking.com/es/publicaciones/glosario/detalles/term/etanol-alcohol.html>
- FAO. (2008). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/i0100s/i0100s.pdf>
- Fernández-Linares, L. C., Montiel-Montoya, J., Millán-Oropeza, A., & Badillo-Corona, J. A. (2012). Producción de biocombustibles a partir de microalgas. *Ra Ximhai*, 8(3), 101-115.
- Fuentes Casullo, L. C. (2020). Producción de hidrógeno por fermentación oscura y producción de electricidad a partir de suero de queso y otros subproductos industriales.
- Gad, M. S., El-Shafay, A. S., & Hashish, H. A. (2021). Assessment of diesel engine performance, emissions and combustion characteristics burning biodiesel blends from *jatropha* seeds. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 518-526.
- Gutiérrez Vargas, S. (2011). *Análisis de la Producción de biogás a través de Sustratos no Convencionales*.
- Jiménez-Jiménez, W. J., Valdez-López, L. L., & Duque-Mariño, M. M. (2020). Fuentes alternativas para la producción de biocombustibles. *Polo del Conocimiento*, 5(10), 200-214.

- Lescano Pizarro, F. H. (2019). Transesterificación de los ácidos grasos de las grasas del matadero municipal de Tingo María para la obtención de biodiesel.
- López Bermúdez, Y. N. (2020). Producción de bioetanol a partir de residuos de fruta utilizando *Saccharomyces cerevisiae*: una revisión de las diferentes condiciones y métodos de proceso (Bachelor's thesis, Uniandes).
- Marín Moreno, M. (2020). Análisis tecno-económico de una planta industrial de producción de biodiésel a partir de microalgas.
- Martínez, A., Mijangos, G. E., Romero-Ibarra, I. C., Hernández-Altamirano, R., & Mena-Cervantes, V. Y. (2019). In-situ transesterification of *Jatropha curcas* L. seeds using homogeneous and heterogeneous basic catalysts. *Fuel*, 235, 277-287.
- Merma Cruz, W., Guevara Cancho, G. V., Alejandro Pérez, K. C., Espinoza Reynoso, I. D. C., & Ramirez Revilla, S. (2020). Obtención de biodiesel a partir de microalgas nativas cuantificando su potencial bioenergético en el litoral de la provincia de Ilo del año 2014.
- Moreno Simón, M. (2020). Dinámica de los polifenoles procedentes de aguas residuales de la industria vinícola durante el proceso de digestión anaerobia (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Muñoz-Estrada, J. R., Velázquez-Fernández, J. B., & Aguilar-Juárez, O. (2021). Metagenómica de un biorreactor enfocado a producción de biohidrógeno en el proceso de aprovechamiento de vinazas tequileras empleando inóculo pretratado. *RINDERESU*, 5(2).
- Nagle N., Lemke P., Production of methyl ester fuel from microalgae, *Appl. Biochem. Biotechnol.* 24–25 (1990) 355–361. doi:10.1007/BF02920259.
- Noblecourt, A., Christophe, G., Larroche, C., & Fontanille, P. (2018). Hydrogen production by dark fermentation from pre-fermented depackaging food wastes. *Bioresource Technology*, 247(July 2017), 864–870. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.199>.
- Oblitas Castro, M. A. (2019). Aplicación de biol en cultivos de rábano (*Raphanus Sativus*).
- Paredes-Cervantes, S. A., Barahona-Pérez, L. F., Barroso-Tanoira, F. G., & Ponce-Marbán, D. V. (2020). Biocombustibles y su potencial en el mercado energético mexicano. *Revista de Economía, Facultad de Economía, Universidad Autónoma de Yucatán*, 37(94), 35-56.
- Parra-Ortiz, D. L., Botero-Londoño, M. A., & Botero-Londoño, J. M. (2019). Biomasa residual pecuaria: revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos. *Revista UIS Ingenierías*, 18(1), 149-160.
- Pascualone, M. J. (2019). Producción de biohidrógeno por fermentación: efecto de la concentración de inóculo. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 6(2), 15-19.
- Rey-Porras, K. D., Leguizamón-Nonsoque, G. M. M., González-LaRotta, E. C., & Becerra-Fernández, M. (2021). Análisis de brechas del sector de biocombustibles en Colombia. *INVENTUM*, 16(30), 61-90.
- Romero, M. G. (2020). Biocombustibles y producción de biohidrógeno. *MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, (38), 8.
- Sánchez Patiño, E. T., & Torres Gemade, V. N. (2020). Desarrollo de una propuesta de proceso para la producción de biodiésel partiendo de residuos grasos de pollo (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).
- Sánchez-Bayo Álvarez, A. (2019). Biorrefinería de Microalgas para la Producción de Biocombustibles.
- Sialve B., Bernet N., Bernard O., Sialve B., Bernet N., Bernard O., Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. To cite this version : HAL Id : hal-00854465, (2013).
- Sołowski, G., Konkol, I., & Cenian, A. (2020). Methane and hydrogen production from cotton waste by dark fermentation under anaerobic and micro-aerobic conditions. *Biomass and Bioenergy*, 138. 124 <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105576>.
- Sotomonte Carvajal, K. (2021). Análisis de los beneficios que obtiene el medio ambiente a partir de la producción de biocombustibles.
- Souza, J., Luna, W. H. D., & Schaeffer, L. (2020). Sistema de compresión de biogás. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 29, 13-17.
- Torres Benavides, D. A. (2020). *Biodigestión anaerobia de los desechos del camal del Distrito Metropolitano de Quito para obtención de compost, biol y biogás* (Bachelor's thesis, Quito: UCE).
- Torroba, A. (2020). Atlas de los biocombustibles líquidos 2019-2020.
- Vellosillo, I. D. (2020). Obtención de bioetanol mediante procesos de fermentación con levaduras: revisión bibliográfica.
- Venegas Venegas, J. A., Raj Aryal, D., & Pinto Ruíz, R. (2019). Biogás, la energía renovable para el desarrollo de granjas porcícolas en el estado de Chiapas. *Análisis económico*, 34(85), 169-187.
- Zahuantitla Razo, I. (2020). Producción de biohidrógeno a partir de vinazas vitivinícolas: potencial de componentes del sustrato y comunidad microbiana asociada (Bachelor's thesis).

Agradecimientos

A la Dirección de Apoyo a la Investigación y Posgrados (DAIP) de la Universidad de Guanajuato por el financiamiento de las becas de investigación de los estudiantes dentro de la convocatoria de XXVI Verano de la Ciencia.