

Biogas generation from different organic waste: case studies of Bioremediation and community development in Argentina and Dominican Republic

Colombo, Clara V, PhD¹ *; Rodriguez Cuevas, Alvin, PhD²

¹ Plantar Consulting in renewable energy, Argentina. vickycolombo27@gmail.com

² Universidad Apec, Republica Dominicana. rodriguez.alvin@gmail.com

Abstract-- Wet biomass has great potential to generate energy, if viewed as a resource instead of a waste. In the last 30 years, biodigestion technology has been developed and spread throughout Latin America, allowing biogas to be obtained from different wastes having a moisture content greater than 60%. Even so, many projects have failed due to great ignorance and negligence when designing and operating biodigesters. In Argentina, the center region has much in common with the area of Santo Domingo, Dominican Republic: the high availability of biomass and freshwater, in addition to the need to generate biogas in places that are off the natural gas network. This paper presents the study of different case studies in both countries, analyzing different variables. The substrates used are different residues found in each place, and in particular, bioremediation of sargassum is applied in the Dominican Republic. Access to training and support for the operators of biodigesters is another analysis variable. This work shows how the use of local resources and working together with the community guarantees the success of the operation of biodigesters, in addition to promoting community development.

Keywords-- Biogas, Biodigesters, Waste to energy, Sargassum, Community development.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.211>
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Engineering, Integration, and Alliances for a Sustainable Development” “Hemispheric Cooperation for Competitiveness and Prosperity on a Knowledge-Based Economy”, 27-31 July 2020, Virtual Edition.

Generación de biogás a partir de diferentes residuos orgánicos: estudio de casos de biorremediación y desarrollo de comunidades en Argentina y República Dominicana.

Colombo, Clara V, PhD¹ *; Rodriguez Cuevas, Alvin, PhD²

¹ Plantar Consulting in renewable energy, Argentina. vickycolombo27@gmail.com

² Universidad Apec, Republica Dominicana. rodriguez.alvin@gmail.com

Resumen- La biomasa húmeda tiene un gran potencial para generar energía, si es mirada como un recurso en lugar de un residuo. En los últimos 30 años la tecnología de la biodigestión se ha desarrollado y esparcido por Latinoamérica, permitiendo obtener biogás a partir de diferentes desechos con un contenido de humedad mayor al 60 %. Aún así, muchos proyectos han fracasado por el gran desconocimiento y negligencia al momento de diseñar y operar los biodigestores. En Argentina, la región del litoral tiene mucho en común con la zona de Santo Domingo, República Dominicana: la gran disponibilidad de biomasa y de agua dulce, además de la necesidad de generar biogás en lugares que están fuera de la red de gas natural. Este trabajo presenta diferentes casos de estudio en ambos países, analizando diferentes variables. Los sustratos utilizados son diferentes residuos que se generan en cada lugar, y en particular, se aplica la biorremediación del sargazo en República Dominicana. El acceso a capacitación y acompañamiento de los operadores de los biodigestores es otra variable de análisis. Este trabajo evidencia como la utilización de los recursos locales y el trabajo en conjunto con la comunidad garantiza el éxito del funcionamiento de los biodigestores, además de potenciar el desarrollo de la comunidad.

Palabras claves: Biogás, Biodigestores, Energía a partir de residuos, Desarrollo de comunidades, Sargazo.

Abstract- Wet biomass has great potential to generate energy, if viewed as a resource instead of a waste. In the last 30 years, biodigestion technology has been developed and spread throughout Latin America, allowing biogas to be obtained from different wastes having a moisture content greater than 60%. Even so, many projects have failed due to great ignorance and negligence when designing and operating biodigesters.

In Argentina, the center region has much in common with the area of Santo Domingo, Dominican Republic: the high availability of biomass and freshwater, in addition to the need to generate biogas in places that are off the natural gas network. This paper presents the study of different case studies in both countries, analyzing different variables. The substrates used are different residues found in each place, and in particular, bioremediation of sargassum is applied in the Dominican Republic. Access to training and support for the operators of biodigesters is another analysis variable. This work shows how the use of local resources and working together with the community guarantees the success of the operation of biodigesters, in addition to promoting community development.

Keywords-- Biogas, Biodigesters, Waste to energy, Sargassum, Community development.

Introducción

Debido al crecimiento, desarrollo y las actividades llevadas a cabo por el hombre, se ha demostrado que el planeta Tierra está experimentando un cambio climático antropogénico [1]. Una parte significativa de este efecto se origina en la contaminación atmosférica con gases llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI), los cuales son principalmente CO₂ y CH₄. La principal fuente de emisiones de estos gases es la quema de combustibles fósiles para la obtención de energía para diversos fines, además de la deforestación [2]. En las últimas décadas, los Estados de muchos Países se han comprometido a realizar acciones de mitigación del cambio climático y desarrollar nuevas tecnologías para disminuir las emisiones de GEI. Entre estas acciones, se encuentra proyectar cambios en las matrices energéticas de cada país y región, para poder incorporar tecnologías que permitan extraer energía de fuentes renovables.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.211>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

Una opción tecnológica para cumplir este objetivo es la energía de la biomasa. En general podemos dividirla en tres categorías: la biomasa seca (principalmente madera y residuos leñosos); la biomasa húmeda (estiércol, desechos de alimentos, desechos de huerta, etc) y los cultivos energéticos (cuyo fin es obtener biodiesel y bioetanol) [3]. El adecuado tratamiento de la biomasa húmeda se realiza mediante la biodigestión, es decir, es digerida por organismos vivos. Esta puede ser aeróbica (lo que llamamos compostaje) o anaerobia (en ausencia de oxígeno), la cual permite aprovechar la energía contenida en la biomasa transformándola en un combustible (biogás) y devolviendo los nutrientes al suelo en forma de biofertilizante.

Un biodigestor es un sistema donde ocurre este proceso degradativo de la materia orgánica, llamado biodigestión anaeróbica. El proceso es llevado a cabo por un consorcio de bacterias y hongos (facultativos y anaerobios estrictos), creando una cadena trófica donde la materia orgánica se degrada hasta convertirse en dos productos principales: Biogás y Bioabon[4]. El biogás está compuesto por CH_4 (aproximadamente 70%) y CO_2 (~30%), y trazas de otros gases (SH_2 , NO_2). El bioabono es un líquido color negro e inoloro, rico en minerales, fósforo, nitrógeno, potasio y otros componentes que puede ser utilizado como fertilizante ya que se encuentra estabilizado por el proceso bacteriano y a pH neutro. Ambos productos son muy valiosos para el hombre: el biogás es un combustible que puede utilizarse como fuente de energía y el bioabono es un excelente fertilizante de suelos [4]. En conjunto, este sistema permite realizar un adecuado tratamiento de residuos orgánicos húmedos (biomasa húmeda) transformándolos en energía y con un mínimo impacto ambiental. En cuanto al tamaño, diseño y materiales utilizados para construir biodigestores, existe una gran diversidad en los tres aspectos en todo el mundo. En general el sistema de biodigestión consta de un recipiente donde ocurre la biodigestión (el biodigestor propiamente dicho), otro recipiente donde se almacena el biogás (llamado gasógeno), uno o varios filtros para mejorar la calidad del gas (filtro de H_2S , CO_2 y agua), trampas de agua y el artefacto para el uso del gas, que dependiendo el caso, puede ser un anafe, caldera, motogenerador, etc.

En América Latina comienza el uso de biodigestores en la década de los '70. Durante las dos décadas siguientes se llevan a cabo proyectos

de instalación en lugares dispersos y con éxito, pero la difusión de estas tecnologías era muy baja [5]. Hoy en día existe información disponible sobre el uso del biogás y la construcción de biodigestores, de manera que cualquier persona podría armar un biodigestor a través de un video.

Aun así, la realidad es que la información disponible en cuanto a la operación de éstos es limitada y poco clara, llevando a dichos proyectos al fracaso y abandono en los primeros 6-12 meses. En la Provincia de Santa Fe (Argentina) se ha llevado a cabo un proyecto de divulgación e instalación de biodigestores en escuelas y se han brindado capacitaciones de 40 h gratuitas para el público en general (entre ellos productores ganaderos, porcinos, etc.), durante 3 años. Estas capacitaciones han sido brindadas por expertos en esta tecnología y se ha trabajado de manera conjunta con las comunidades en la instalación, puesta en marcha y operación de los biodigestores. El trabajo en conjunto y el compromiso de la comunidad en cada etapa del desarrollo del biodigestor ha aumentado el éxito en el funcionamiento de los mismos, de manera que aproximadamente el 95 % de los biodigestores instalados se encuentran en funcionamiento continuo.

Hemos comprobado así que, aplicando la metodología de desarrollo y trabajando junto con la comunidad para resolver los problemas existentes de la gestión de residuos orgánicos, el éxito de los proyectos fue mayor. Los procedimientos más destacados han sido, por un lado, brindar capacitaciones para la operación del biodigestor (cultivos anaeróbicos); y por el otro, construir el biodigestor con la comunidad y hacer el seguimiento del mismo durante los primeros 6-12 meses a cargo de un especialista (presencial o a distancia). El biogás se ha utilizado en la mayoría de los casos para cocinar, generar electricidad o como parte de los procesos productivos. Asimismo, se ha comprobado que este combustible ha sido muy valorado, debido a que en todos los lugares donde se han instalado, no hay acceso a la red de gas natural.

Utilización de Sargazo como biomasa para energía.

Adicionalmente, la tecnología de la biodigestión puede utilizarse para la biorremediación de ciertos problemas ambientales de esencia orgánica. Por definición, la biorremediación es el uso de organismos vivos, principalmente microorganismos, para degradar contaminantes

ambientales en formas menos tóxicas. Utiliza bacterias naturales, hongos o plantas para degradar o desintoxicar sustancias peligrosas tanto para la salud humana como para el medio ambiente [6]. En este trabajo se utilizará la biodigestión para remediar el efecto ambiental que tiene el Sargazo en la costa del océano Atlántico, en República Dominicana. El sargazo es el nombre coloquial de una microalga marrón que flota libremente en el océano (no se adhiere al fondo). Es parte del ecosistema oceánico ya que proporciona un hábitat importante para los organismos migratorios que se han adaptado específicamente a este, como algas flotantes, incluidos cangrejos, camarones, tortugas marinas y especies de peces comercialmente importantes como el atún y marlin [7].

El sargazo se ha convertido en una amenaza para la economía de los países del Caribe que, como República Dominicana, dependen del turismo. En los últimos años se ha observado una cantidad exacerbada y anormal de esta alga en los meses de invierno. De acuerdo con investigaciones de la Universidad de Puerto Rico, del investigador Rafael Méndez, explica que las algas marinas se mueven por las costas del Caribe por la acción del Anticiclón de las Azores. Este es un sistema de alta presión que se mueve en dirección de las manecillas del reloj y que es el encargado de modular y controlar la llegada de huracanes en esa zona. Durante los meses de mayo a septiembre, es el periodo donde llega el sargazo, impactando negativamente en el sector turístico y zona costera, ya que la acumulación de esta alga genera malos olores debido a su descomposición. En el 2019, según las estimaciones de Medio Ambiente de R.D., 49 playas nacionales fueron impactadas por la llegada de sargazo cuyo volumen de acumulación alcanzó los 2,424,800 metros cúbicos. Es por esto que se está haciendo un gran esfuerzo analizando varias alternativas para disminuir la cantidad de sargazo acumulado en la costa y aliviar los diversos problemas que genera. En la universidad de Puerto Rico han realizado estudios en escala de laboratorio y se ha observado que utilizando sargazo como sustrato se puede obtener 50 L de biogás por kg de sargazo [8].

Las algas marinas crecen en agua salobre o salada y, a diferencia de los cultivos terrestres, no requieren agricultura tierra para el cultivo, evitando así la competencia por el agua dulce y la tierra necesaria para la producción de alimentos [9]. El rendimiento potencial de

biomasa puede ser mayor para las algas marinas que para las plantas terrestres por unidad de área.

El presente trabajo analizará dos aspectos de la biodigestión: el metodológico (operación del biodigestor y degradación de diferentes sustratos) y el social, teniendo en cuenta experimentos y analizando casos que tuvieron lugar en los países de República Dominicana y Argentina.

Experiencias utilizando diferentes sustratos para los biodigestores

Consideraciones generales. Se han analizado diferentes casos de comunidades, instituciones o asociaciones que hay utilizado biodigestores con diferentes sustratos. En todos los casos los biodigestores son de pequeña/mediana escala ($0,2\text{-}2\text{ m}^3$), operados manualmente, a temperatura ambiente (algunos presentan aislación térmica de polipropileno) o con modificación de la temperatura. Los casos analizados en este trabajo se han desarrollado en Argentina y República Dominicana. Algunos biodigestores han sido construidos con la participación de las comunidades y otros son comerciales, siendo los materiales utilizados geomembrana, lana de vidrio y tanques de polietileno.

Definición de variables. Para el análisis de los casos tendremos en cuenta la variable *sustratos utilizados* para alimentar el biodigestor, para estudiar el rendimiento de cada sustrato en cuanto a la producción de biogás, así como la mezcla de los mismos. Para esta variable, las mediciones de sustrato a agregar se realizaron con balanzas y la producción de biogás se midió mediante escalas realizadas en los gasógenos. Otra variable que analizaremos es la *capacitación previa que los operadores* tuvieron antes de comenzar a trabajar con el biodigestor, es decir, si las personas que lo alimentan tuvieron acceso a un curso que les explique e interiorice sobre el cultivo de bacterias anaeróbicas. Y como tercera variable a analizar, tendremos en cuenta la *temperatura de funcionamiento* de los biodigestores, principalmente en los casos de República Dominicana, donde se hicieron experiencias entregando energía al sistema para mantener constante la temperatura de trabajo.

Análisis de los casos estudiados en Argentina

Los casos estudiados en Argentina se listan en la Tabla I. Allí se aclara el tamaño, el sustrato con el cual se alimentan, la cantidad de biogás que

generan, y si los operadores del biodigestor tuvieron acceso a una capacitación donde se les explique cómo hacer el trabajo de operador. Estos biodigestores están dentro de la provincia de Santa Fe.

Casos 1 y 2. Durante el transcurso de los años 2018 y 2019, la Secretaría de Estado de la Energía de la Provincia de Santa Fe llevó a cabo un programa llamado Educación Energética. El

programa se concretó en la instalación de biodigestores en 105 escuelas secundarias rurales, con el fin de acercar esta tecnología a los alumnos de 13 a 17 años, y que esto se transforme en un oficio que puede darles empleo al completar sus estudios. La construcción de los biodigestores se delegó a una empresa, que los realizó en forma de tanques de fibra de vidrio, y siendo sus volúmenes de 1 m³ el biodigestor y 3

TABLA 1
Casos en estudio en Argentina

Caso N°	Tamaño del biodigestor (m ³)	Sustrato	Ubicación	Uso del biogas	Producción de biogás diaria (m ³) ¹	Operadores	Capacitación previa
1	1	Estiércol porcino	Chapuy	Cocción	0,7	Alumnos del colegio (13 a 16 años)	Si
2	1	Desechos de cocina	Monte Oscuridad	-	0	Alumnos del colegio (13 a 16 años)	No
3	5	Estiércol vacuno	Ibarlucea	Cocción y generación de electricidad	2,5	Tarcisio Schaad (Dueño de un tambo)	Si
4	0,4	Desechos de cocina	Rosario	Cocción	0,2	Cocineros de comedores comunitarios	No (sólo una charla)

¹ La producción de biogás se midió mediante escalas dibujadas en los gasógenos, y se muestran los valores de producción en verano, mostrando el promedio de 5 mediciones cada una.

m³ el gasógeno. Se colocó poliuretano rodeando al biodigestor a modo de aislante para que no sufra cambios bruscos de temperatura. Adicionalmente, se contrató consultores especializados para que capaciten a los docentes y alumnos de cada escuela en la operación y mantenimiento del mismo. Los consultores ofrecieron un curso de 6 hs aproximadamente a los colegios, además de un seguimiento personalizado presencial y a distancia, que se sostuvo por un año calendario. Con el asesoramiento de los consultores, se realizó la puesta en marcha de los biodigestores y se comenzaron a alimentar. A pesar de algunos inconvenientes que se presentaron en algunos casos particulares, el 95% de los biodigestores se encuentran en funcionamiento. A modo demostrativo, se eligieron dos biodigestores de este programa: el biodigestor de la escuela de Chapuy y el de la escuela de Monte Oscuridad. En ambas localidades la puesta en marcha se realizó utilizando como inóculo 150 kg de estiércol de vaca fresco, aproximadamente, y 150 kg del sustrato con el que se iba a alimentar en adelante.

En Chapuy, luego de la inoculación, se esperó un tiempo prudencial y al estabilizarse el pH por encima de 6,5 comenzó la alimentación, con estiércol de cerdo. Este desecho proviene de un criadero de los alrededores del pueblo, y ellos

mismos se encargan de llevarlo a la escuela una vez a la semana. En la escuela los alumnos lo pesan, lo disuelven y diluyen antes de cargarlo al biodigestor. En verano el biodigestor se alimenta con 8 kg diarios de estiércol, produciendo 0,7 m³ de biogás al día. Para llegar a este objetivo, se trabajó codo a codo con la comunidad de la escuela, siendo de suma importancia la participación y compromiso del personal directivo de la institución. La directora, María Florencia Martín trabajó arduamente para llevar adelante el proyecto. Ella gestionó la presencia de los materiales para la puesta en marcha, convocó a reunión plenaria institucional para que todos los docentes, junto a los alumnos, reciban el curso que se brindó para la institución. Allí se explicó el funcionamiento del biodigestor y cómo operarlo, se explicó que dentro se desarrollan seres vivos y hasta se invitó a los alumnos a que le pusieran un nombre, a modo de adoptarlo como “mascota” de la escuela. Se explicó cuáles eran los parámetros que debían controlar para monitorear su funcionamiento y cómo hacerlo. Se trabajó con la comunidad para decidir dónde instalarlo, se consiguieron delantales y guantes para manipular el estiércol de manera segura y se entrenó a los alumnos en realizar la tarea. La directora también diseñó un removedor para disolver el estiércol de una manera más sencilla. Los alumnos realizan la

tarea de carga con entusiasmo, y se muestran interesados en el cuidado del ambiente y la gestión de residuos (Fig.1). En cada visita al colegio, la especialista a cargo recibía muy buenas preguntas de los alumnos. Ellos también mostraban cómo la huerta de la escuela había progresado con el aporte del biofertilizante. Por su parte, el biogás fue muy bien recibido, ya que las cocineras lo utilizan para calentar agua y para cocinar diariamente. Chapuy no forma parte de la red de gas, por lo cual normalmente utilizan gas envasado para cocinar. El uso del biogás les ha permitido generar un ahorro de gas, prolongando el tiempo de uso de la garrafa. Por lo tanto, el

esfuerzo de los alumnos de la carga diaria se ve remunerada y valorada por el personal de cocina, por la institución y por ellos mismos. Podemos entonces evidenciar cómo el trabajo en conjunto con la comunidad permitió comenzar a transitar el camino hacia su progreso y desarrollo: Alumnos desarrollando nuevas capacidades al operar el biodigestor, transmitiendo estos conocimientos en sus hogares (en muchos casos sus padres están involucrados en actividades agrícola-ganaderas), los dueños del *feedlot* porcino que ahora trata parte de sus residuos en la comunidad está pensando en incorporar la biodigestión a su circuito de producción, etc.



Figura 1 Biodigestor de Chapuy, Santa Fe. A. Biodigestor y gasógeno instalados al lado de la huerta. B. Alumnos alimentando el biodigestor. C. Anafe instalado en la cocina donde se utiliza el biogás generado.

En Monte Oscuridad el día de la inoculación se agregaron 150 kg de desechos orgánicos de cocina sumado a la misma cantidad de estiércol de vaca. A partir de allí, se fue controlando el pH del equipo cada dos semanas. A pesar de los esfuerzos del consultor especialista en brindar un curso de capacitación para el personal y los alumnos, no pudo encontrar personas interesadas en aprender a operar el biodigestor y en comenzar a alimentarlo. En la escuela no hay red de gas, por lo que el biogás se podría haber valorado, pero nunca llegaron a producir biogás porque el equipo se abandonó. En este caso no hubo interés ni apoyo del personal directivo, tampoco la intención de recibir un curso de capacitación a pesar de las sugerencias del especialista en sus numerosas visitas al establecimiento educativo. Este caso nos demuestra que, sin la capacitación adecuada ni la información para valorar la tecnología, los biodigestores terminan abandonados e inutilizados.

Caso 3. Tarcicio Shaad es propietario y operador de un pequeño tambo de 20 vacas en las afueras de Ibarlucea, Santa Fe. Frente a la inquietud del tratamiento del estiércol de sus vacas y al hecho de que no se encuentra incorporado a la red de gas, pensó en armar un biodigestor. Para esto realizó un curso de 40 hs

dictado por una especialista en el tema en el año 2017. Armó el biodigestor con sus propias manos simultáneamente a la realización del curso, siguiendo las recomendaciones brindadas. Comenzó armando un biodigestor de 1 m³ en el año 2017, alimentándolo con estiércol de vaca que recolectaba del sector de ordeño, donde cuenta con piso de cemento. Lentamente fue incorporando módulos de 1 m³ al biodigestor a medida que iba consiguiendo tanques, y los fue conectando para aumentar el volumen hasta llegar a un total de 5 m³ en agosto del año 2019. También construyó un gasómetro del mismo volumen para poder almacenar el biogás que se generaba (Ver Fig. 2). En época de verano, diariamente el biodigestor es cargado con 25 kg de estiércol de vaca y produce en promedio 2,5 m³ de biogás. En invierno, se alimenta con 12 kg de estiércol fresco y produce 1,25 m³ aproximadamente de biogás. Este cambio se debe a que el biodigestor no está aislado ni calefaccionado. Tarcisio utiliza el biogás para cocinar en su casa, para iluminar con una lámpara adaptada a biogás y para alimentar un pequeño generador adaptado a biogás para abastecer el enfriador de la leche del tambo durante algunas horas. Lo más destacable de este caso es la actitud proactiva de Tarcisio. Esta persona posee una gran creatividad e inventiva para mejorar

constantemente su biodigestor. Es consciente y valora el beneficio de tener biogás y de evitar la acumulación de estiércol en su tambo. Este es un claro ejemplo de una persona que gracias a su actitud proactiva y los conocimientos adquiridos en un curso de operador de biodigestores logró optimizar el biodigestor que él mismo construyó y sigue perfeccionando. Adicionalmente, esta persona participó como consultor especializado en el programa Educación Energética nombrado previamente, capacitando personal de 10 escuelas y poniendo a punto sus biodigestores.

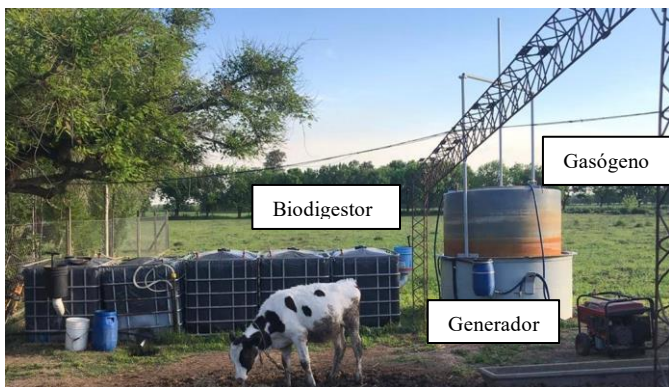


Figura 2. Biodigestor de Tarcisio Shaad, Ibarlucea.

Caso 4. Esta es la historia de un biodigestor pequeño (0,4 m³), sin aislación ni calefacción, que fue construido por los estudiantes de un curso de diseño y operación de biodigestores en el año 2018 como práctica final del curso. El mismo se donó a un espacio público, gestionado por la Municipalidad de Rosario, llamado el Bosque de los Constituyentes. Este lugar es un espacio verde de 484 m² de superficie donde viven caballos y llamas recuperados, que son atendidos diariamente por empleados municipales. El biodigestor se instaló allí con el objetivo de que los empleados lo alimenten diariamente con estiércol de estos animales (Fig.3 A). Estos empleados no habían participado del curso, de la construcción, y tampoco colaboraron el día de la puesta en marcha. Posteriormente, una consultora especializada les explicó como operarlo en una reunión de dos

horas, mostrándoles las partes y componentes. Los empleados empezaron a operarlo y generaron biogás. Pero en el término de un mes el equipo fue abandonado, ya que estos operadores no quisieron continuar con la tarea de recolectar estiércol y cargarlo. A pesar de las presiones de sus jefes y las visitas de los consultores, no se pudo motivar a los empleados a continuar con la alimentación.

Al comprobarse que no había interés de continuar con la operación del biodigestor, la Municipalidad decide vaciarlo y trasladarlo al galpón de distribución de tierra y vivienda, localizado en San Juan 5100 de Rosario, donde se entregan las raciones y alimentos a 23 comedores comunitarios de la ciudad. De esta manera, el biodigestor se podría alimentar con los desechos de la preparación de esas raciones y con las sobras. Así mismo el biodigestor estaría visible a todo el personal de estos comedores, dándoles la posibilidad de conocerlo y tal vez interesarse en replicarlo en los comedores. Allí comenzó a funcionar en junio de 2019, siendo operado por empleados del lugar y con asistencia de un especialista que los capacitó sobre cómo operarlo. Diariamente, el biodigestor se carga con 2 kg de desechos de comida y produce 0,2 m³ de biogás (Fig. 3 B). Actualmente el biogás se utiliza para calentar agua para infusiones de los trabajadores utilizando un anafe. El biodigestor llama mucho la atención de las personas que visitan el lugar, y a raíz de eso, se ha hecho un pedido formal a la Municipalidad para gestar un proyecto de instalación de biodigestores en algunos comedores comunitarios. En este caso es de suma importancia destacar la dedicación y entusiasmo del personal del centro de distribución, ya que ellos aprendieron a utilizarlo y asisten en la divulgación de esta tecnología que a ellos les beneficia. El desarrollo de este proyecto sería de suma importancia para los comedores ya que en la mayoría se cocina utilizando leña, debido al elevado costo de las garrafas de gas.



Figura 3. A Biodigestor instalado en el bosque de los constituyentes de Rosario. B Mismo biodigestor instalado en el centro de distribución de tierra y vivienda, en funcionamiento.

Discusión y conclusiones

A partir de los casos estudiados en Argentina, se calculó el rendimiento de cada sustrato estudiado en condiciones de verano, es decir, con temperaturas de alrededor de 30 °C, en la Tabla 2. Podemos observar que los tres sustratos estudiados tienen un rendimiento bastante similar cuando se utilizan biodigestores de pequeña escala. El caso del biodigestor de Chapuy muestra un rendimiento levemente menor que tiene que ver con la composición del estiércol de cerdo que ellos utilizan. El biodigestor de Tarcisio (Caso 3) muestra un rendimiento exacerbado para los reportes presentados en la bibliografía al respecto [3]. Esto podría deberse a que el biodigestor lleva ya dos años funcionando y esto puede favorecer que se haya establecido y consolidado una población bacteriana enriquecida en cierto tipo de microorganismos que optimice la producción de biogás. Esta hipótesis está en estudio y podría demostrarse haciendo un estudio microbiológico de la población bacteriana dentro del biodigestor.

TABLA 2

Rendimiento de los sustratos. Producción de biogás por kg fresco de sustrato.

Caso	Sustrato	Rendimiento (m ³ biogás/kg fresco)
1	Estiércol de cerdo	0,087
3	Estiércol de vaca	0,1
4	Desechos de cocina	0,1

En cuanto a la variable en estudio de la influencia de la educación o acceso a información sobre el éxito en el funcionamiento de los biodigestores, se puede observar que hay dos factores que influyen en los casos estudiados. En primer lugar, la motivación y el deseo de que el biodigestor funcione y produzca biogás. Esto suele ser una característica de las personas que buscan

incorporar esta tecnología debido a que poseen conciencia de cuidado ambiental, por ejemplo, el caso de Tarcisio Shaad o de María Florencia Martín. Esta conciencia también puede ser generada o transmitida mediante una capacitación, pero es más difícil, ya que la persona debe estar dispuesta a ser sensibilizada al respecto. Se ha notado en las personas jóvenes una resistencia significativamente menor a la sensibilización que en los adultos, sobre todo en las escuelas. Al dictar las capacitaciones para operar los biodigestores, los alumnos generalmente mostraron más entusiasmo que los docentes para aprender y para ejecutar la carga del digestor. El acceso a una capacitación dictada por un especialista donde se explica cómo funciona el biodigestor, cómo cultivar los microorganismos que vivirán dentro de él, qué cuidados se deben tener para que el proceso curse adecuadamente demostró ser esencial para el éxito en el funcionamiento del biodigestor. Esto se observa claramente en el caso 4, cuando un biodigestor fue abandonado en el lugar donde el personal tuvo acceso a una capacitación muy breve, y el mismo sí pudo funcionar con éxito en un lugar donde los operadores fueron capacitados y asistidos de manera correcta por un experto. Existe un aspecto no menor, y es que todos los casos presentados excepto el 3 son instituciones de orden público (Escuelas, Bosque de los Constituyentes y centro de distribución). Muchas veces sucede que hay resistencia por parte de los trabajadores del Estado a realizar tareas extra que no serán remuneradas específicamente. Por ejemplo, los docentes no cobraron extra por alimentar diariamente el biodigestor o por estudiar sus fundamentos para trabajarlo con los alumnos y esto, a veces, genera que las personas se desmotiven rápidamente y dejen de realizar estas tareas. Se observó que este factor fue de gran influencia en el caso 2 y el caso 4. Pero en

los casos 1, 3 y 4 (centro de distribución) esto no fue un inconveniente en absoluto.

Otro aspecto de gran importancia para el éxito del funcionamiento de los biodigestores está asociado al desarrollo de la comunidad, en el sentido de cómo se logra que la comunidad se apropie de la tecnología. Esto se suele lograr mediante un trabajo activo con la comunidad durante el tiempo previo y de implementación de la tecnología, sobre todo brindándole conocimiento e involucrándola en el proceso. También es de suma importancia la valoración por parte de la comunidad de los productos y beneficios del biodigestor: el biogás como energía, el bioabono como fertilizante y el tratamiento de los residuos orgánicos. Si la comunidad evidencia como alguno (o todos) estos productos potencian su desarrollo y el de sus miembros, procurarán hacer lo posible por sostener el correcto funcionamiento del equipo. En conclusión, tomando en cuenta los casos presentados, el éxito del funcionamiento de un biodigestor está dado no solo por el sustrato con el cual se alimenta, sino principalmente por la actitud de la comunidad hacia el biodigestor y su capacidad para operarlo correctamente, lo cual aumenta significativamente si la comunidad tiene acceso a una capacitación y acompañamiento prolongado de mano de especialistas en la tecnología que se desea implementar.

Análisis de caso estudiado en República Dominicana: Transformación de sargazo y desechos orgánicos en energía limpia

Resumen

La visión de la Universidad Apec (UNAPEC) se enfoca en ofrecer respuestas a problemáticas nacionales mediante la investigación científica. La finalidad de este estudio se enfoca en la utilización de algas marinas (Sargazo) y desechos orgánicos como materia prima (biomasa) para la producción de biogás, con el apoyo de expertos internacionales en el área como es la empresa MAOF, de Israel; el sector turístico privado, así como el sector público en la conformación de un proyecto multisectorial que ofrece un enfoque holístico para la gestión de sargazo y residuos sólidos.

Caso de estudio: Unapec-Maof

La Universidad APEC, con la misión de capacitar a líderes creativos y empresarios para una economía global, como parte de un campo de

estudio académico completo que enfatiza los negocios, la tecnología y los servicios, integrando la enseñanza, la investigación y la extensión del estudio, para contribuir al desarrollo de la sociedad dominicana, ha establecido relaciones de cooperación e investigación con la empresa israelí YA Maof Holdings & Management Ltd., dedicada a diversos proyectos en el sector ambiental y energético. Esta empresa se especializa en el manejo, reciclaje y supervisión de residuos, además de la rehabilitación de áreas contaminadas y tóxicas, y antiguas canteras, todo esto con el apoyo de soluciones innovadoras y tecnologías de vanguardia.

El objetivo principal es avanzar en las actividades conjuntas dentro de un marco de cooperación entre la República Dominicana e Israel basado en el apoyo internacional para combatir los riesgos del cambio climático y varios mecanismos vinculados a los programas de créditos de carbono. El deseo conjunto es establecer interacciones sostenibles y de largo alcance con impactos positivos significativos en las comunidades del país.

La Universidad Apec junto con la empresa Maof se acercó al Grupo Punta Cana, como punto focal para desarrollar con la empresa multinacional Algeanova, el Proyecto Energyalgae. En ese sentido, se realizaron los acuerdos con cada uno de los actores, en un Proyecto multisectorial que ofrece un enfoque holístico para la gestión de sargazo y residuos sólidos. De igual forma, se une a esta propuesta la empresa Ecoservices, dedicada a la gestión de residuos sólidos con el propósito de mejorar el medio ambiente y ayudar al desarrollo sostenible en RD. Otros sectores como el ministerio de Medio Ambiente de la República Dominicana, así como otras entidades fueron partícipes de la estructura de este proyecto, con la finalidad de desarrollar afinidad entre la empresa, el estado y la Universidad, como se muestra en la Figura 4.



Ilustración: Equipo del Proyecto Energyalgae.

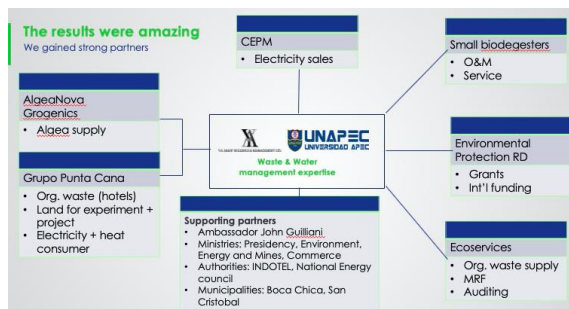


Figura 4: Estructura de Proyecto Unapec-Maof
Fuente: UNAPEC

La finalidad de este Proyecto se enfoca en establecer una planta piloto de energía para producir 1 MW de electricidad (y más de 1 MW de calefacción). No obstante, el proyecto se subdivide en dos fases. La primera fase se basa en la experimentación del uso de sargazo y desechos sólidos en biogás y la segunda fase en la transformación a energía eléctrica.

En la primera fase se basa en recolectar y usar desechos orgánicos domésticos, desechos animales y algas marinas (Sargazo) para producir energía limpia y productos útiles adicionales.

Las materias primas para producir combustible incluyen:

- Algas marinas (Sargazo).
- Estiércol de vaca, ave, cerdo y cabra, entre otros.
- Desperdicios orgánicos y alimenticios domésticos.
- Grasas y pulpas de la industria alimentaria.

La recogida de estos residuos se utilizará para:

- Comercialización de energía "verde" para el uso de la red eléctrica nacional, para calefacción y refrigeración en hoteles cercanos. Además, la planta producirá compost de clase A para uso agrícola.
- Se preparará un programa de gestión de residuos de acuerdo con las necesidades especiales del lugar seleccionado para el proyecto. Esta actividad puede estar relacionada con todos los aspectos del ciclo de tratamiento de residuos, p. Ej. recogida y separación, estaciones de transferencia, transporte, vertedero y reciclaje.

1. Primera Fase del proyecto

La primera fase está orientada hacia la instalación de los equipos (Biodigestores, materia prima disponible, espacio territorial para la experimentación) y la experimentación del proceso de digestión anaeróbica para la producción de biogás.

1.1 Colección y Procesamiento

La empresa AlgeaNova, ubicada en Punta Cana, República Dominicana, se especializa en barreras flotantes anti-sargazo y ha estado desarrollando soluciones innovadoras para recolectar sargazo en el mar, mantenimiento, procesamiento, valorización y protección marina desde 2018 como se muestra en la figura 5.



Figura 5: Equipo de recolección de algas
Fuente: Algeanova

En colaboración con el grupo hotelero Grupo Punta cana, AlgeaNova instaló una barrera flotante anti-sargazo de 4,2 km de largo en diciembre 2018. Su barrera garantiza playas y costas libres de sargazo (Figura 6) ayuda a preservar no solo los sectores de hoteles y turismo, sino que también ayuda a preservar el frágil ecosistema de playa y la pesca tradicional. Su sistema de barrera flotante tiene la ventaja de desmontarse fácil y rápidamente en caso de huracanes o condiciones climáticas extremas. El éxito de AlgeaNova ha permitido al equipo ofrecer sus servicios en todo el Caribe.

Su participación en el proyecto está enfocado a suministrar el sargazo recolectado en la playa, como biomasa para el experimento.



Figura 6. Barreras de contención
Fuente: Algeanova

1.2 Gestión de residuos sólidos

Ecoservices es una empresa dedicada a la gestión de residuos República Dominicana, certificada juntamente con ISO 9001 y 14001, en calidad y gestión Ambiental. Miembros de ECORED, el Clúster Turístico de Altagracia y el Consejo Provincial de Desarrollo del Ministerio del Medio Ambiente, con el permiso ambiental 2724/15, se establecieron en la República Dominicana en 2010, pero con más de 30 años de desarrollo internacional. Cuenta con la experiencia necesaria para crear programas para el desarrollo sostenible de las empresas y el turismo en la República Dominicana a través de la gestión de residuos sólidos y líquidos, el reciclaje y la disposición final efectiva, certificación y auditoría ambiental, venta de productos biodegradables y zafacones, energías renovables, variolización de residuos de energía, biocombustibles, ahorro de energía y mejora de la producción limpia. Tienen sus operaciones en el área de Bávaro, Punta Cana, Romana y proyectos asociados en Santo Domingo y la parte norte del país.

Esta empresa con toda la experiencia que tiene en la gestión de residuos sólidos en la región este y con la relación que tienen con muchos hoteles del grupo Punta Cana estará gestionando la cantidad de residuos sólidos necesarios como insumos para la fase de experimentación del Proyecto.

1.3 Experimentación

En Octubre de 2019 se inició la fase de experimentación de producción de biogás mediante sargazo en colaboración con el Grupo Punta Cana, empresa Maof, Algeanova y la Universidad Apec. Esta última, encargada del experimento, monitoreo y logística instrumental

con la colaboración de los actores mencionados anteriormente.

Este experimento consiste en un sistema de cinco pequeñas unidades de biodigestores (HomeBiogas) para probar diferentes formulaciones compuestas de una mezcla de sargazo y desechos orgánicos de hoteles locales, para encontrar una combinación que permita optimizar la producción de biogás.



Ilustración: Equipo de Proyecto Energyalgae.
Fuente: Unapec

Los resultados obtenidos en este proyecto piloto servirán de base para diseñar e implementar la planta piloto modelo de co-digestión de 1 MW más grande en Punta Cana utilizando sargazo y desperdicios de alimentos de los hoteles como materia prima que podría ser replicable en todo el Caribe. La instalación tiene la intención de recibir aproximadamente 28,000 toneladas / año de sargazo y 32,000 toneladas / año de insumos de desperdicios de alimentos orgánicos para generar 1 MW de energía. La electricidad y el calor que se generarán serán retroalimentados a la red para su uso en toda el área de concesión.

La experiencia acumulada de los expertos del equipo de Y.A. MAOF asegurará el éxito y la sostenibilidad de este primer proyecto de biogás en Punta Cana:

- Basado en su amplia experiencia en medio ambiente emprendimiento, MAOF está continuamente iniciando y participando en una variedad de proyectos y procesos regulatorios en Israel
- El fundador y CEO tiene más de 20 años de experiencia en servicios ambientales, especializada en tratamiento de residuos, residuos gestión, reciclaje, rehabilitación de paisajes, tierras peligrosas, contaminadas suelos.

El gerente del proyecto es el ex Senior Director General Adjunto del Ministerio de Protección del medio ambiente en Israel y Jefe de extensión de MASHAV en Arava Instituto y fue el investigador principal para un extenso sistema de

biogás a pequeña escala proyecto para ayudar a las comunidades beduinas fuera de la red.

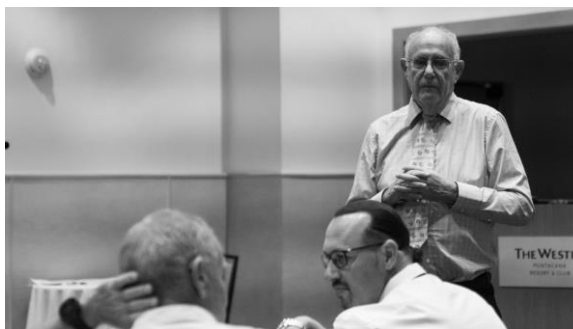


Ilustración: Equipo de Proyecto Energyalgae
Fuente: Unapec

La instalación de los equipos a utilizar en el experimento consiste en cinco biodigestores, esquematizado en la Figura 7.

Este experimento consiste probar diferentes mezclas de sargazo y desechos orgánicos, con el fin de encontrar aquella que permita obtener mejor rendimiento de producción de biogás. Para esta primera fase, se iniciará con el sargazo y estiércol y luego se combinara con los desechos sólidos. Para activación del sistema se necesita activar cada uno de los biodigestores con 100 litros de agua y de estiércol mezclados (vaca, cerdo, caballo, cabra, oveja). Los pasos y procedimientos para la instalación de los biodigestores, así como toda la información de activación de los sistemas se pueden encontrar en www.homebiogas.com.



Figura 7: Sistema Biodigestor Compacto HOMEBIOGAS 2.0
Fuente: Unapec

El tiempo de activación depende de la descomposición llevada a cabo por las bacterias. Una vez se establece la biodigestión anaeróbica, inicia la producción de biogás y se comprueba con el encendido de llama inflamable en la estufa

que viene con el sistema biodigestor compacto 2.0. Desde que se tiene este resultado, se reduce la cantidad de alimentación de los biodigestores a 20 litros de estiércol mezclados con 20 litros de agua diario. Es importante que esta mezcla sea bien disuelta para que la biodigestión anaeróbica pueda realizarse más rápidamente. De igual forma, el estiércol debe ser fresco para que facilite la descomposición de las bacterias.

Una vez realizada la activación del sistema, se procede a la alimentación utilizando las diferentes combinaciones de sargazo y estiércol. Cada uno de los biodigestores tiene una combinación diferente para verificar el rendimiento de producción de biogás de acuerdo con las cantidades y mezclas. Se procede a pesar las cantidades de cada uno de ellos de acuerdo con el procedimiento de activación y al protocolo utilizado en esta primera parte experimento, que se muestra en la figura 8 y 9.



Figura 8: Sargazo al aire libre
Fuente: Algeanova



Figura 9: Peso de sargazo
Fuente: Algeanova

Para la instalación del sistema, se obtuvo el diseño de la empresa MAOF. El criterio de diseño está enfocado a tener 5 combinaciones de diferentes biomásas (Sargazo y estiércol) para verificar el rendimiento en la producción de biogás. En cada uno de los sistemas se tiene pesada la cantidad de material específica y unas válvulas de manera independiente para cada sistema que permite verificar la producción de biogás de forma individual. Cada sistema tiene una estufa a la salida para verificar la producción de biogás. De igual forma, cada salida de los biodigestores tiene un recipiente donde se colectan los lixiviados para ser examinados y ver su utilización para el compostaje. A

continuación, se presenta en la Figura 10, el diseño del sistema.



Figura 10: Diseño del sistema
Fuente: Maof

El protocolo del sistema como se muestra en la Figura 11, consiste en la alimentación de los biodigestores con mezclas de sargazo y estiércol en diferentes porcentajes. La finalidad es verificar el porcentaje que permita mayor producción de biogás durante 30 días. La duración de la experimentación se debe al tiempo necesario para evidenciar los porcentajes de cada sistema. Con este protocolo se busca validar la utilización de sargazo para producción de biogás. El estiércol solo se utiliza para la activación de los sistemas y para mantener el proceso de biodigestión anaeróbica.

Sistema	Construcción del sistema	Iniciación	Alimentación Sargassum/Estiércol	Duración de experimentación (30 días)
Biodigestor 1	Llenar el sistema con agua hasta las indicaciones del procedimiento	Mezclar 100 litros de agua + 100 litros de estiércol. Rellenar 14 días hasta que tenga gas	50/50	30
Biodigestor 2			75/25	30
Biodigestor 3			75/25	30
Biodigestor 4			100/0	30
Biodigestor 5			25/75	30

Figura 11: Protocolo del sistema
Fuente: Maof

Una vez transcurrido el tiempo para la descomposición de las bacterias mediante el proceso de biodigestión anaeróbica, se tiene como resultado la producción de biogás, que se realiza a través del metano (CH₄) producido en el interior de los biodigestores y otros gases, que son pasados por unos filtros a la salida de cada biodigestor. Como se muestra en la figura 12, se evidencia un abultamiento en la parte superior de los biodigestores donde está la cantidad de gases producidos. Los indicadores de pH, Mass flow, CH₄, CO₂ y H₂S, se midieron diariamente en cada uno de los cinco biodigestores, con el fin de evaluar el proceso.



Figura 12: Gases acumulados
Fuente: Unapec

1.4 Procedimiento de medición

La temperatura es un factor importante en el proceso de descomposición de las bacterias. Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros procesos biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que, a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás [10].

Los microorganismos metanogénicos son mucho más sensibles a las variaciones de pH que los otros organismos de la comunidad microbiana anaeróbica. El pH óptimo de trabajo del biodigestor se encuentra en el rango entre 6.8 y 7.4, siendo el pH neutro 7 el ideal. Para que el proceso de biodigestión se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6.0 ni subir de 8.0. Esto es porque el valor del pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición.

Con el fin de poder mantener la temperatura constante en el experimento (37° C) utilizamos un calentador (Heather) de 500 vatios para cada biodigestor. No obstante, esto generaba demanda de energía de 1000 vatios, que debíamos suministrar en el sistema. Para conseguir la temperatura adecuada y que se mantenga dentro de los biodigestores, fue necesario diseñar un sistema de alimentación de energía mediante paneles solares combinado con un sistema de

calentamiento de agua basado en gas como se muestra en la figura 13.

El sistema de alimentación consiste en dos paneles solares de 330 vatios, una batería de 12 voltios DC, un inversor con salida de 120AC y un controlador solar Mppt (por sus siglas en inglés, maximum power point tracker). Tiene una eficiencia de 99% y la corriente de carga oscila entre 20-40A. Con este sistema se alimenta todos los dispositivos y equipos necesarios para las mediciones de los biodigestores.

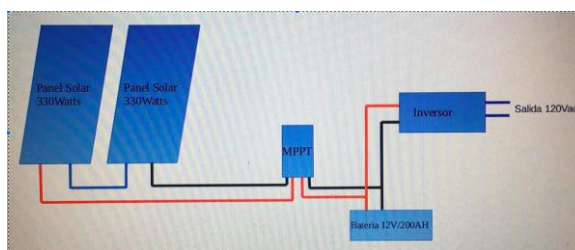


Figura 13: Sistema de alimentación de energía
Fuente: Unapec

El sistema de calentamiento de agua es un calentador de agua automático de almacenamiento con una capacidad de 40 galones y 38000 Btu/hr de entrada. Este calentador de agua Bradford White utiliza un desviador de tiro y tiene ventilación atmosférica. Ver figura 14.

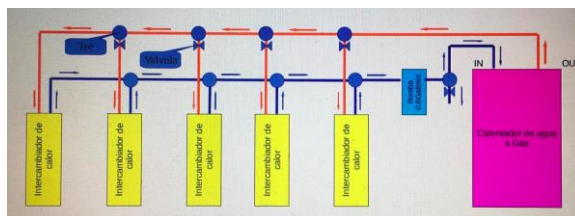


Figura 14: Sistema de calentamiento de agua
Fuente: Unapec

El funcionamiento del sistema de calentamiento de agua consiste en la circulación de agua caliente a los biodigestores para alcanzar la temperatura adecuada. Para esto, se utiliza una bomba de agua de 22,7 litros por minuto, donde se introduce el agua al calentador y este a su vez, lleva el agua a una temperatura entre 45⁰-65⁰c para que circule por todo el sistema. Con esta modalidad, se puede manejar la temperatura de cada biodigestor con la abertura o cierre de cada válvula que está a la entrada de cada biodigestor.

¹ El sulfuro de hidrógeno (H₂S) es un gas que se encuentra comúnmente durante la perforación y producción de petróleo crudo y gas natural. El gas se produce como

Para la circulación de agua caliente en el interior de los biodigestores se utiliza un intercambiador de calor de acero inoxidable para mantener la temperatura deseada, como se muestra en la Figura 15.



Figura 15: Intercambiador de calor
Fuente: Unapec

Durante el día, la radiación solar ayuda a tener una temperatura por encima de los 35⁰ C, de manera que el intercambiador de calor trabajaría en horas de menor radiación solar.

Para obtener la información de la temperatura se utiliza sensores de temperatura PT-100, encargados de medir la temperatura en el interior de los biodigestores; un medidor de masa de baja presión, el cual se utiliza para medir el flujo de gas a la salida del sistema; un medidor de pH para medir el nivel de oscilación de los biodigestores, un Datalogger, que permite la adquisición de datos, donde los sensores de temperatura envían la señal de medición de cada biodigestor y un analizador de biogás, el cual sirve para medir los indicadores de CH₄, CO₂, H₂S¹. Los dispositivos y aparatos utilizados para la captura de los datos se presentan en las siguientes ilustraciones:



Analizador de biogás geo tech 5000, mide CH₄/CO₂/O₂,



Aparato de adquisición de datos

resultado de la descomposición microbiana de los materiales orgánicos en ausencia de oxígeno.



Medidor de masa de baja presión



Medidor de PH

Discusiones y Resultados

Una vez obtenidos todos los datos de los sensores de temperatura, así como el flujo de biogás y los demás indicadores durante el periodo de experimento mencionado en el protocolo, se procedió a su análisis. Es importante señalar que se realizaron promedios de las mediciones semanales en cada biodigestor para verificar el comportamiento de las combinaciones de sargazo y estiércol. Se mantuvo una temperatura entre 32^o y 35^o, con un pH que oscila 7.5 y 7.8.

En las Figuras 16, 17 y 18, se observa el comportamiento de las concentraciones de los diferentes indicadores del biodigestor 1 por semana. Se tiene mayor concentración de H₂S en la primera semana y fue disminuyendo paulatinamente. De igual forma, el flujo de gas oscila entre 5 y 6 slpm (litro estándar por minuto). El nivel de concentración en porcentaje tanto para el CH₄ y CO₂, se mantuvo entre 50% y 30% respectivamente. El porcentaje de O₂ es despreciable.

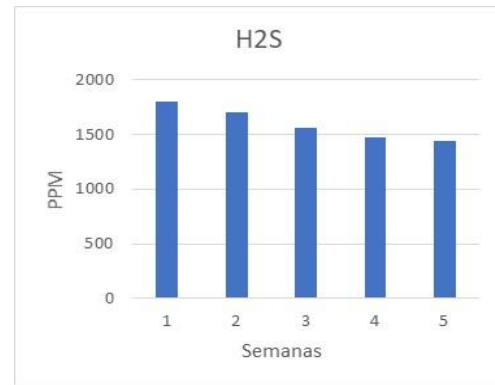


Figura 16: Concentración de H₂S en el Biodigestor 1

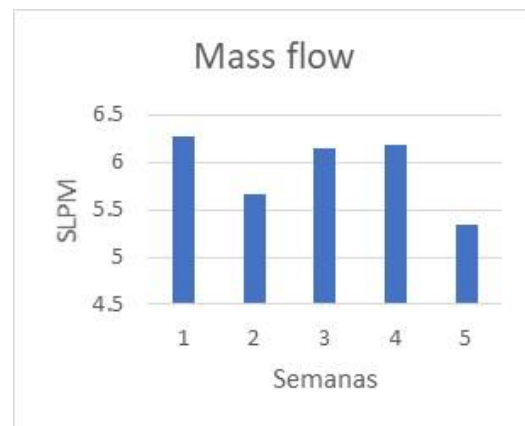


Figura 17: Parámetro Mass Flow del Biodigestor 1

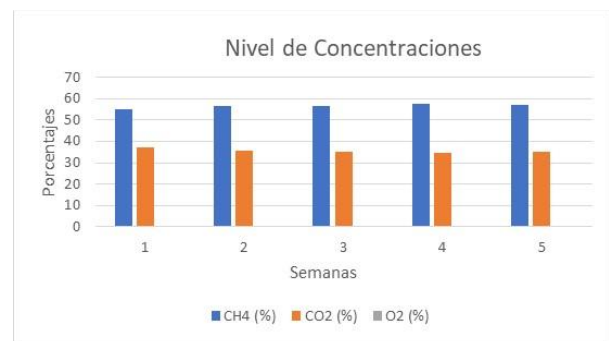


Figura 18: Parámetros del Biodigestor 1

En las Figuras 19, 20 y 21 se observa el comportamiento de las concentraciones de los diferentes indicadores del biodigestor 2 por semanas. Se tiene una concentración de H₂S por encima de los 1000 ppm durante todas las semanas. El flujo de gas tuvo mayor slpm en la semana 3 y 4, manteniendo un nivel entre 5.6 y 6 slpm en las restantes semanas. Con respecto al nivel de concentraciones de CH₄, CO₂ y O₂, se mantuvieron por encima de 50% para CH₄ y por encima de 30% para CO₂, sin mucha variación.

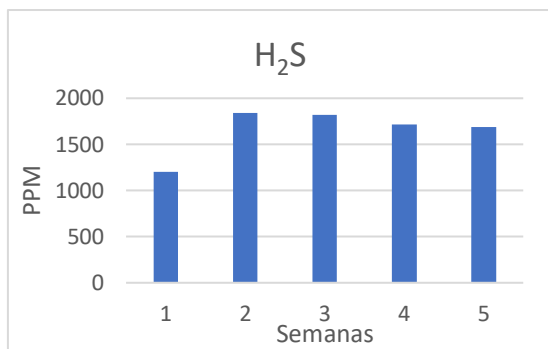


Figura 19: Concentración de H₂S en el Biodigestor 2

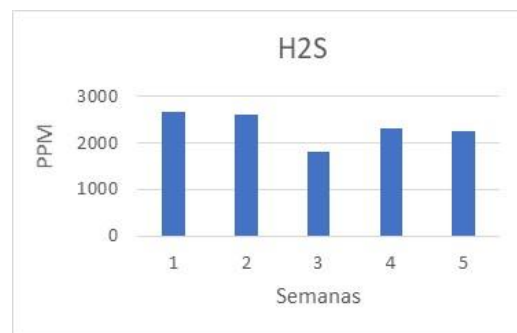


Figura 22: Concentración de H₂S en el Biodigestor 3

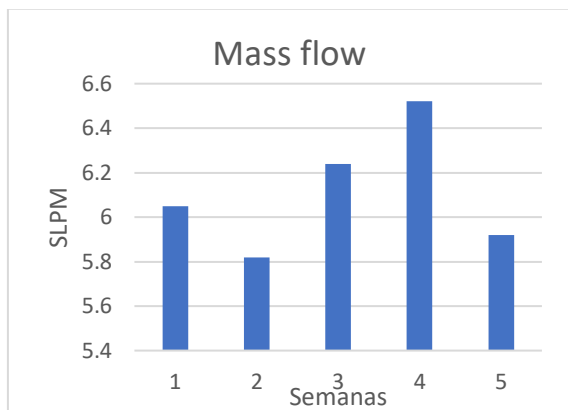


Figura 20: Mass Flow en el Biodigestor 2

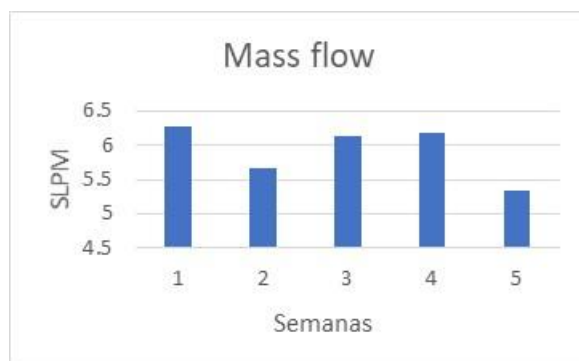


Figura 23: Mass Flow en el Biodigestor 3

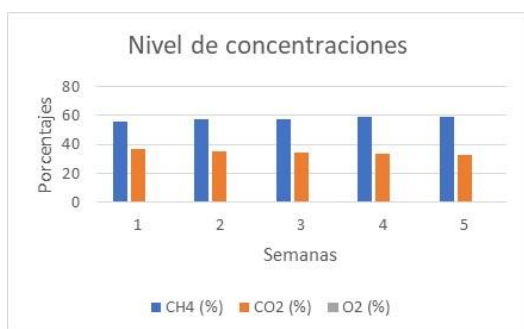


Figura 21: Parámetros del Biodigestor 2

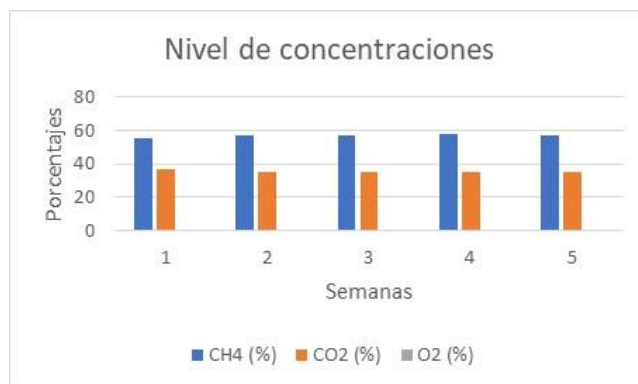


Figura 24: Parámetros del Biodigestor 3

En las Figuras 22, 23 y 24, se observa el comportamiento de las concentraciones de los diferentes indicadores del biodigestor 3 por semanas. Se tiene una mayor concentración de H₂S durante las primeras dos semanas de ppm, y luego una disminución en la semana 3, manteniéndose para las semanas restantes. Con respecto al flujo de gas, se tiene un nivel por encima de 5 slpm durante las primeras cuatro semanas, reduciendo solo en la quinta semana. Los niveles de concentración de CH₄, CO₂ y O₂ son muy similares al biodigestor 2.

En las Figuras 25, 26 y 27, se observa el comportamiento de las concentraciones de los diferentes indicadores del biodigestor 4 por semanas. Se tiene una reducción paulatina de H₂S, sin embargo, el nivel de ppm que presenta es mucho mayor que los demás biodigestores. Con respecto al flujo de gas hubo mayor consistencia en los niveles de slpm, ya que se mantuvo por encima de 6 slpm durante tres semanas. Los porcentajes de nivel de concentraciones de CH₄, CO₂ se mantiene por debajo del 60%, así como el O₂ que es muy mínimo.

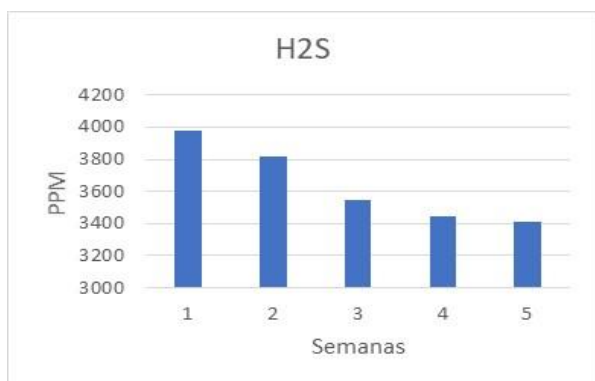


Figura 25: Concentración de H₂S en el Biodigestor 4

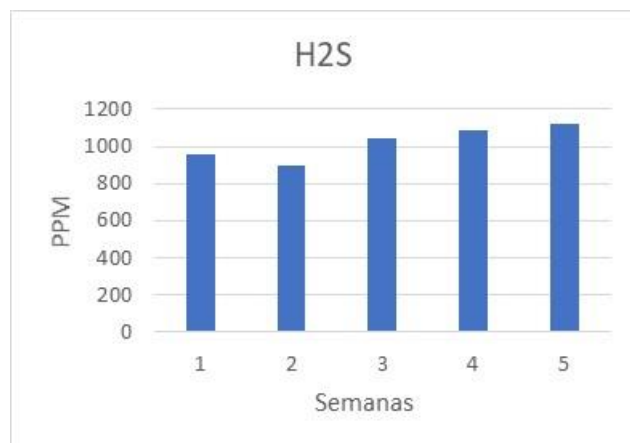


Figura 28: Concentración de H₂S en el Biodigestor 5

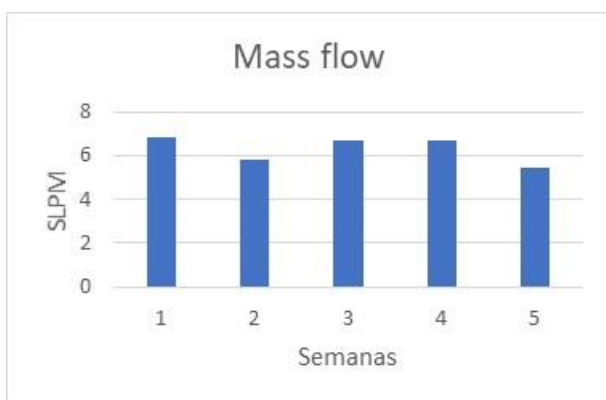


Figura 26: Mass Flow en el Biodigestor 4

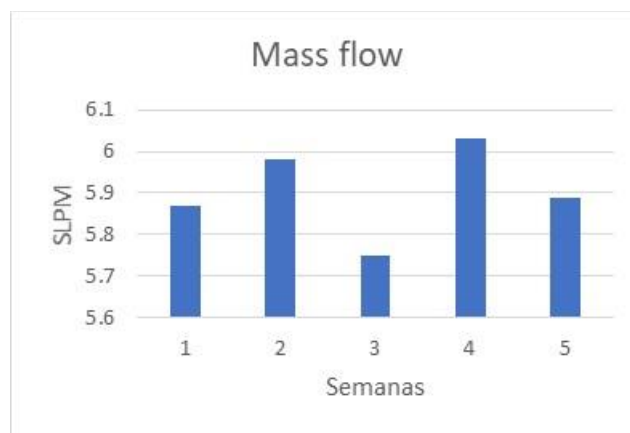


Figura 29: Mass Flow en el Biodigestor 5

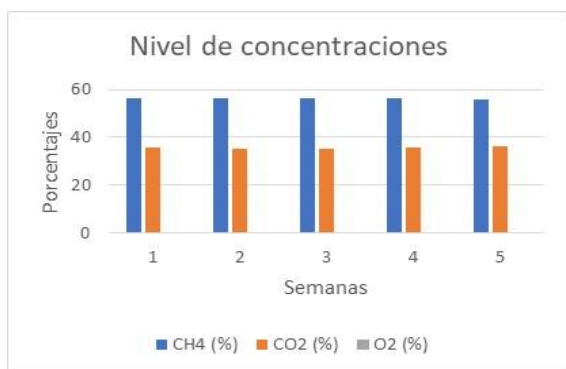


Figura 27: Parámetros del Biodigestor 4

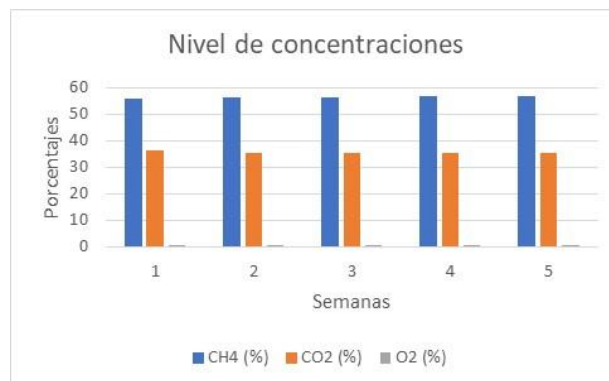


Figura 30: Parámetros del Biodigestor 5

En las Figuras 28, 29 y 30, se observa el comportamiento de las concentraciones de los diferentes indicadores del biodigestor 5 por semanas. Se presenta una disminución de concentración de H₂S por debajo de los 1200 ppm. El nivel de flujo de gas fluctúa entre los 5.7 y 6 slpm respectivamente. Los niveles de concentración de CH₄, CO₂ y O₂ presentan porcentajes más consistentes debido a que la cantidad de H₂S se mantuvo por debajo de los 1200 ppm a diferencia de los demás biodigestores.

Una vez analizados los valores obtenidos para los parámetros de este experimento, donde se evaluó la producción de biogás mediante la variación en la composición de la biomasa (sargazo y estiércol) se concluye que:

1. El biodigestor 5 con una combinación de 25/75, es el que presentó consistencia de producción de CH₄.
2. El sargazo utilizado presenta altos niveles de azufre y arsénio, lo cual se evidencia en las altas concentraciones de H₂S.

3. La mayor producción de gas se produjo al atardecer, específicamente en el biodigestor 5.
4. Se realizó pruebas con sargazo seco-triturado y se obtuvo mejor comportamiento de descomposición que el lavado.
- 5.
2. Segunda fase del proyecto: líneas Futuras

Ahora que se ha determinado que la mezcla que permite obtener mayor consistencia y rendimiento de biogás es la utilizada en el biodigestor 5, se realizarán nuevos experimentos para seguir mejorando la producción. Los mismos se plantean de la siguiente manera:

- Se evaluará la influencia de la temperatura en la producción de biogás, estableciendo diferentes temperaturas en cada biodigestor y midiendo el biogás producido.
- Una vez elegida una temperatura óptima de trabajo, en cada biodigestor se probarán diferentes formas de introducir el sargazo, es decir, lavado, lavado-cortado y seco-triturado. Esto tiene la finalidad de determinar si existe alguna relación del pretratamiento de éste con la producción de biogás.
- Adicionalmente, se realizará dicho experimento probando diferentes combinaciones de sargazo con residuos sólidos provenientes de hoteles, partiendo de los porcentajes realizados en este experimento.
- Finalmente, con los resultados de estos experimentos, validar el diseño de una planta de 1MW de energía limpia.

Conclusión

Teniendo en cuenta los casos analizados tanto en Costa Rica como en Argentina, podemos concluir que se pueden utilizar una gran variedad de sustratos para alimentar biodigestores que generan buenos rendimientos de biogás. Como se evidencia en este estudio, es de suma importancia el conocimiento del lugar donde se va a colocar la tecnología y de sus comunidades, para poder aprovechar residuos existentes como alimento para el biodigestor y así solucionar sus problemas, como el del sargazo en el océano o el estiércol de vaca en el tambo. A su vez, es de

suma importancia que la comunidad pueda hacer uso y valoración de la energía generada. El funcionamiento de biodigestor necesita de operadores debidamente capacitados y que conozcan la tecnología, para tener mayor probabilidad de éxito. Por último, destacamos el proyecto de biorremediación de sargazo, el cual ayudará a la restauración del ecosistema marino y aliviará los problemas que causa la descomposición del sargazo para los pobladores de la costa. Se evidencia en este estudio la importancia de mantener la temperatura constante de trabajo para lograr altos rendimientos en la generación de Biogás. Insertar en el experimento los desechos sólidos combinados con sargazo haciendo el mismo ejercicio del experimento anterior. Queda pendiente en nuestros futuros estudios definir la mejor temperatura para la degradación del sargazo y la mejor forma de pretratarlo para su biodigestión.

Agradecimientos

C.V.C. agradece a Marcelo Cuello por los datos sobre el biodigestor de Monte Oscuridad, a Tarcisio Shaad por la información sobre el funcionamiento y las optimizaciones realizadas en su biodigestor y a Pablo Torricella por la información brindada del biodigestor en el centro de distribución de tierra y vivienda.

Agradecimientos

A.R.C. y la Universidad Apec agradece a la empresa Y.A.Maof por la transferencia tecnológica y conocimiento compartido en este proyecto, así como al Grupo Punta Cana, Algeanova, Ecoservices por el apoyo de logística, organización y programación en todo el proyecto. De igual forma, a la empresa Anaergia por las informaciones y datos suministrados.

Bibliografía

- [1] Martínez, J; Fernández, A. “Cambio climático, una visión desde México”. ISBN. 968-817-704-0, 2004.
- [2] “CO₂ and Greenhouse Gas Emissions - Our World in Data. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions#citation>. [Accessed: 23-Jun-2020].
- [3] Salvador, A.R. “Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles.” Rev. R. Acad. Cienc.

Exact. Fís. Nat. (Esp) Vol. 104, Nº. 2, pp 331-345, 2010.

[4] Casanovas, G.; Della Vecchia, F.; Reymundo, F.; Serafini, R. “*Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores.*” ISBN 978-92-5-131559-0

[5] M. Garfí, J. Martí-Herrero, A. Garwood, and I. Ferrer, “Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60. Elsevier Ltd, pp. 599–614, 01-Jul-2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.071.

[6] M. Vidali, “Bioremediation. An overview*,” *Pure Appl. Chem.*, Vol. 73, No. 7, pp. 1163–1172, 2001.

[7] Doyle, E. and Franks, J. (2015) *Sargassum Fact Sheet*. Gulf and Caribbean Fisheries Institute.

[8] Louime, C.; Fortune, J.; Gervais, G. “*Sargassum* Invasion of Coastal Environments: A Growing Concern” *American Journal of Environmental Sciences*.V.13 (1), 58-64. 2017.

[9] Milledge, J.J.; Harvey, P.J. Potential process ‘hurdles’ in the use of macroalgae as feedstock for biofuel production in the British Isles. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2016, 91, 2221–2234

[10] María Teresa Varnero Moreno. *Manual de Biogás* FAO. Santiago de Chile, 2011. ISBN 97895-306892-0