DIGESTIÓN ANAEROBIA EN CONTINUO DE RESIDUOS DEL SECTOR PRIMARIO DE LA ISLA DE TENERIFE

Titulación: Grado en Ingeniería Química Industrial.

Departamento en Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica.

Paula Luis Herrera.

Septiembre, 2021

Tutores:

- Candela Díaz García.
- Douglas J. Escalante Ayala

Universidad de La Laguna

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis tutores Candelaria Díaz García y Douglas J. Escalante Ayala, por todo el tiempo dedicado y la ayuda prestada durante la realización de este Trabajo Fin de Grado, así como a todos los investigadores, profesores y personal de laboratorio que me ha ayudado durante la realización de la parte experimental.

Quisiera agradecer también a mi familia, a mi pareja, y a mis amigos; gracias a todos por el apoyo que me han dado este año, y durante el resto de mi formación académica.

Por último, me gustaría dar las gracias a Virginia Torres Bujalance, por su apoyo y su ayuda durante este curso.

Universidad de La Laguna

Índice de Contenido

1. INTRODUCCIÓN 6

1.1. ENERGÍA. 8

1.1.1. Energías Renovables. 8

1.1.2. Biocombustibles. 9

1.1.3. Biogás. 10

1.1.4. Obtención del biogás. 11

1.1.5. Uso del biogás. 12

1.1.6. Proyección futura sobre el uso de combustibles. 12

1.1.7. Desarrollo sostenible. 13

1.1.8. Economía circular. 15

1.1.9. Huella de Carbono. 17

1.2. RESIDUOS. 18

1.2.1. Tipos de residuos. 19

1.2.2. Tratamiento de residuos. 20

1.2.3. Residuos del sector primario. 21

1.3. SITUACIÓN EN CANARIAS Y EN LA ISLA DE TENERIFE. 22

1.3.1. Plan Integral de Residuos de Canarias. 27

2. OBJETIVOS 29

3. MATERIALES Y MÉTODOS. 33

3.1. Materias primas. 35

3.2. Material de laboratorio. 36

3.3. Preparación de muestras. 37

3.4. Instalación Experimental. 39

3.5. Montaje y puesta a punto del dispositivo. 42

3.5.1. Preparación de la disolución de NaOH. 43

3.6. Análisis de la composición del gas obtenido. 44

3.7. Estudio de contenido en Sólidos Totales, Volátiles y Fijos de los residuos y las muestras de residuos. 46

3.8. Análisis elemental. 48

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN. 51

4.1. Cuantificación de los residuos y selección de estos. 53

4.2. Análisis del contenido en las diferentes fracciones de sólidos de los residuos y mezclas de estos. 60

4.3. Análisis elemental de los residuos y las mezclas de estos. 61

4.4. Producción del gas obtenido. 64

4.5. Composición del gas obtenido: 70

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓNES. 73

6. BIBLIOGRAFÍA. 80

7. ANEXOS 86

Índice de Figuras

Figura 1. Clasificación de la Energía. Figura de elaboración propia. 8
Figura 2. Proceso de formación de biogás (Bidosol, 2021). 11
Figura 3. Objetivos del Desarrollo Sostenible (Europapress,2021) 14
Figura 4. Economía circular (Parlamento Europeo, 2015). 17
Figura 5. Residuos según su peligrosidad. Elaboración propia. 19
Figura 6. Residuos según su composición. Elaboración propia. 19
Figura 7. Residuos según su origen. Elaboración propia. 20
Figura 8. Porcentaje de uso de energía eléctrica por islas. Obtenido del Anuario energético de Canarias (ISTAC). 23
Figura 9. Sectores económicos de Canarias. Gráfico de elaboración propia a partir de los datos recogidos del ISTAC. 26
Figura 10. Reactor de 3 L de capacidad. Imagen de realización propia. 39
Figura 11. Vista superior del Reactor de 3L. Imagen de elaboración propia. 40
Figura 12. Instalación completa. Imagen de elaboración propia. 41
Figura 13. Cromatógrafo Agilent 7820 A. Imagen tomada del catálogo del fabricante. 44
Figura 14. Crisoles con muestra antes de su colocación en la estufa. 47
Figura 15. Imagen espectrofotómetro de masas (página de la marca analysis, 2020) ..48
Figura 16. Porcentajes de diferentes residuos procedentes de la actividad ganadera en Canarias en el año 2019. 55
Figura 17. Porcentajes de diferentes residuos procedentes de la actividad ganadera en la isla de Tenerife en el año 2019. 55
Figura 18. Porcentajes de diferentes cultivos de la actividad agrícola en la Comunidad Autónoma de Canarias en el año 2019. 57
Figura 19. Porcentajes de diferentes cultivos de la actividad agrícola en la Isla de Tenerife en el año 2019. 58
Figura 20. Análisis Elemental de la mezcla de residuos empleada en el experimento E2 con el espectrofotómetro. 63
Figura 21. Producción de gas del experimento E1. 65
Figura 22. Producción de gas del experimento E2. 66
Figura 23. Producción de gas del experimento E4. 66
Figura 24. Producción de gas del experimento E6. 67
Figura 25. Producción de gas en los diferentes experimentos. 67
Figura 26. Relación entre los datos experimentales y los datos simulados a partir de las ecuaciones de ajuste. 70
Figura 27. Cromatografía de gases correspondiente al experimento E4. 71

Índice de Tablas

Tabla I. Resultados Experimentos de digestión anaerobia E1 – E3 38
Tabla II. Tabla II: Tiempos de residencia de los gases de interés en el cromatógrafo. 45
Tabla III. Parámetros cromatógrafo..... 46
Tabla IV. Purines producidos por las diferentes cabezas de ganado en Canarias en el año 2019) 54
Tabla V. Purines producidos por las diferentes cabezas de ganado en la isla de Tenerife en el año 2019. 54
Tabla VI. Cultivos del sector agrícola en la Comunidad Autónoma de Canarias en t/año. 56
Tabla VII. Cultivos del sector agrícola en la Isla de Tenerife en t/año. 57
Tabla VIII. Contenido de las diferentes fracciones de sólidos de cada uno de los residuos y las mezclas de estos..... 61
Tabla IX. Análisis Elemental de residuos, mezclas de residuos y digestato correspondiente al experimento VI. 62
Tabla X. Producción total de cada uno de los experimentos realizados 64

RESUMEN

Resumen.

El marco estratégico de Energía y Clima del Gobierno de España establece la hoja de Ruta del Hidrógeno renovable como solución sostenible clave para la descarbonización de la economía mundial. El hidrógeno renovable es parte de la solución para lograr la obligatoria neutralidad climática en 2050. Este documento recoge las soluciones basadas en un modelo renovable para las islas y sistemas energéticos aislados que dependen en gran medida del transporte aéreo y marítimo como gran potencial para que estas regiones puedan alcanzar la neutralidad climática garantizando la sostenibilidad como destino turístico. Evidentemente la Comunidad Autónoma de Canarias forma parte de estos territorios, por lo que los proyectos enfocados hacia la descarbonización de la economía deben ser primordiales en los marcos regulatorios del gobierno. Además, la participación de los diversos agentes económicos, administrativos y de los ciudadanos es imprescindible para alcanzar en nuestra comunidad a corto plazo una economía verde de alto valor añadido. El hidrógeno verde o hidrógeno renovable se podría obtener, entre otros mediante la transformación del biogás, y es en este punto en el que entra a formar parte el trabajo que aquí se presenta, cuyo objetivo principal es la valorización energética de los residuos del sector primario de la Isla de Tenerife, dada la repercusión histórica y actual que ha tenido este sector económico en Canarias, y la necesidad de apostar por energías renovables, en aras de contribuir con la búsqueda del desarrollo sostenible y una economía circular en las islas. Para ello se ha realizado la cuantificación de distintos cultivos en aras de estimar la generación aproximada de residuos procedentes de la agricultura, así como la cuantificación de residuos del sector ganadero, seleccionando diferentes residuos de ambos sectores para llevar a cabo un proceso de digestión anaerobia en continuo en un reactor tipo mezcla perfecta, controlándose, en todo momento el pH y la temperatura. Los resultados obtenidos indican que, a partir de las mezclas de residuos seleccionados, el gas producido es exclusivamente CO_2, sospechando que los inóculos utilizados son posiblemente responsables de ello, por lo que, se concluye que el análisis microbiológico de los mismos es imprescindible para asegurar la existencia la población de bacterias específicas que garantice la producción de biogás.

En un principio se había planteado la realización de un mayor número de experimentos, pero debido a la situación actual de pandemia, que dura más de año y medio, y de la adaptación a la actividad académica en formato semi – presencial, no han podido realizarse cuantos ensayos se establecieron.

Abstract.

The Spanish Government's Energy and Climate strategic framework establishes the Renewable Hydrogen Roadmap as a key sustainable solution for the decarbonization of the world economy. renewable hydrogen as one of the solutions to obtain the all-important climate neutrality by 2050. This document includes guidelines based on a renewable model to secluded energy systems that depends on air and sea transport to make it sustainable as a tourist destination. Canary Islands is one of them. So, it could be very important to reduce the carbon footprint in Canary Islands. Furthermore, the participation of the various economic and administrative actors and citizens is essential to achieve a quality green economy in the short term. The green hydrogen or renewable hydrogen is obtained in several ways, including the transformation of biogas, which is directly related to this project. The main objective of this project is the energy recovery of waste from agriculture and livestock farming on the island of Tenerife, due to the importance of agriculture and livestock farming sector in Canary Islands' economy, and it is needed to use renewable energies to contribute to sustainable development and circular economy in the Canary Islands. On this project, the quantification of different crops has been carried out to estimate the approximate generation of waste from agriculture, as well as the quantification of waste from the livestock sector, selecting different waste from both sectors to carry out a continuous anaerobic digestion process in a continuous stirred – tank reactor (CSTR) with pH and temperature control. Experimental results indicate that only CO2 was produced. It is assumed that it is the inoculum that is responsible for the production of CO2 alone, suspecting that the inoculums used are possibly responsible for it. Microbiological analysis is essential to

ensure the existence of a specific bacterial population to guarantee the production of biogas.

It had been planned to carry out a larger number of experiments, but due to the current pandemic situation and the adaptation to the academic activity in a semi-face-to-face format, it has not been possible to carry out all of them.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ENERGÍA.

La energía se puede clasificar de varias formas (Instituto Tecnológico de Canarias S.A, 2008):

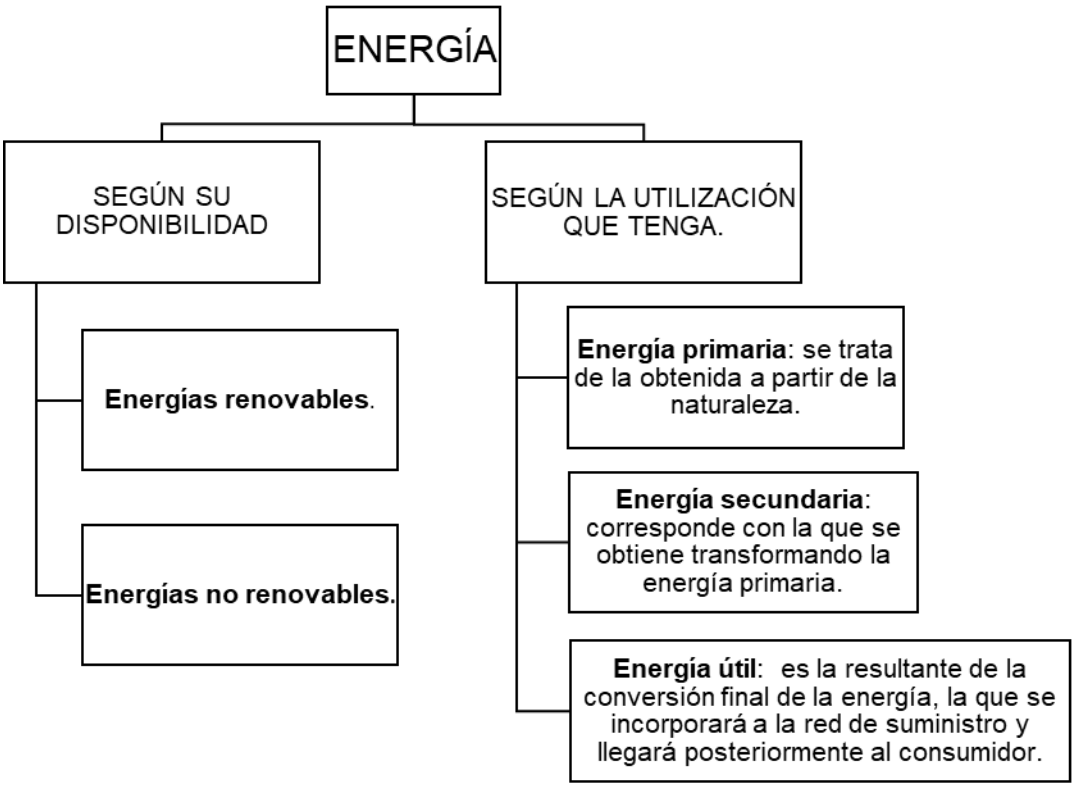


Figura 1. Clasificación de la Energía. Figura de elaboración propia.

1.1.1. Energías Renovables.

"*La energía renovable es una fuente de energía nueva y rentable que protege de volatilidad a los mercados energéticos y a los usuarios, apoya la estabilidad económica y estimula el crecimiento sostenible*" (International Renewable Energy Agency, 2020).

El término de energías renovables recoge los siguientes tipos de energía:

- Energía solar.
- Energía eólica.
- Energía hidráulica y mareomotriz.
- Energía derivada de la biomasa.

La biomasa, como fuente de energía renovable, se utiliza para producir biogás y otros combustibles; además de los muchos usos no relacionados con el aprovechamiento energético, como podría ser la obtención de compost.

La biomasa comprende a la materia orgánica total que es originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de Energía (RAE, 2021).

Dentro del marco estratégico de Energía y Clima establecido por el Gobierno de España, se encuentra también la ruta del hidrógeno, donde se opta por la utilización de este como energía Renovable, con objeto de garantizar la neutralidad climática en vista al 2050. El hidrógeno verde o renovable, se podría obtener, entre otros, a partir del biogás. (Ministerio para la Transición Ecológica y el reto Demográfico, 2020).

1.1.2. Biocombustibles.

Los combustibles son sustancias que, en presencia de oxígeno y de una fuente de ignición, son capaces de liberar energía.

Actualmente, el combustible que más se utiliza es el petróleo, seguido del carbón, el gas natural y los biocombustibles.

Hasta el momento, los combustibles fósiles, que son los derivados del petróleo, suponen la principal fuente de producción de energía; de hecho, constituyen un 90% del consumo a nivel mundial. Esta cifra resulta especialmente alarmante, si se tiene en cuenta el impacto negativo que tiene tanto el proceso de fabricación, como la posterior utilización de estos sobre el medioambiente; siendo el sector de la producción de energía, el que más contribuye en la contaminación atmosférica y en la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Los biocombustibles son un tipo de combustible fabricados a partir de materia orgánica. Estos suelen ser mezclados con otro tipo de combustibles en una pequeña proporción (entorno al 5 o 10%).

Los biocombustibles se presentan como una alternativa sostenible a los combustibles fósiles, ya que presentan una clara ventaja en relación con estos: la reducción de gases contaminantes y de GEI.

Los biocombustibles más utilizados son:

- Biodiésel: se trata de un tipo de biocombustible fabricado partiendo de algún tipo de aceite vegetal o animal. Se suele sintetizar a partir de semillas de girasol, soja, canola o jatropha.
- Bioetanol: se trata de un alcohol que se sintetiza a partir de determinados vegetales, como la caña de azúcar o el maíz.
- Biogás: se trata de un gas combustible que se adquiere en un proceso de digestión anaerobia de residuos orgánicos.

1.1.3. Biogás.

Como se ha visto, el biogás es un gas combustible, considerado como fuente de energía renovable, incluido dentro de la energía derivada de la biomasa; que se adquiere como producto de un proceso de digestión de materia orgánica en ausencia de oxígeno. Este gas está compuesto de CH_4 y CO_2 en una proporción de 40 – 60, además de otros gases en proporciones muy pequeñas, aunque su composición puede variar dependiendo del sustrato a digerir.

El biogás surge como una alternativa al conocido “gas natural” que proviene, en contraposición a este, de fuentes de combustibles fósiles; ya que, el biogás tiene propiedades similares a las del gas natural.

El biogás sirve, además, como materia base para la fabricación de determinados biocombustibles, y se puede comprimir y almacenar posteriormente, si se necesitase.

1.1.4. Obtención del biogás.

El biogás se forma a través de un proceso de digestión anaerobia, uno de los procesos más eficientes para la reducción de los GEI. El principal sustrato para este proceso son el carbono y el nitrógeno que contiene la materia orgánica.

La digestión anaerobia es un proceso que radica en la degradación de materia orgánica en ausencia de oxígeno.

La fabricación de biogás consta de cuatro etapas fundamentales donde actúan diferentes tipos de bacterias (Salvador, 2010) (*Figura 2):*

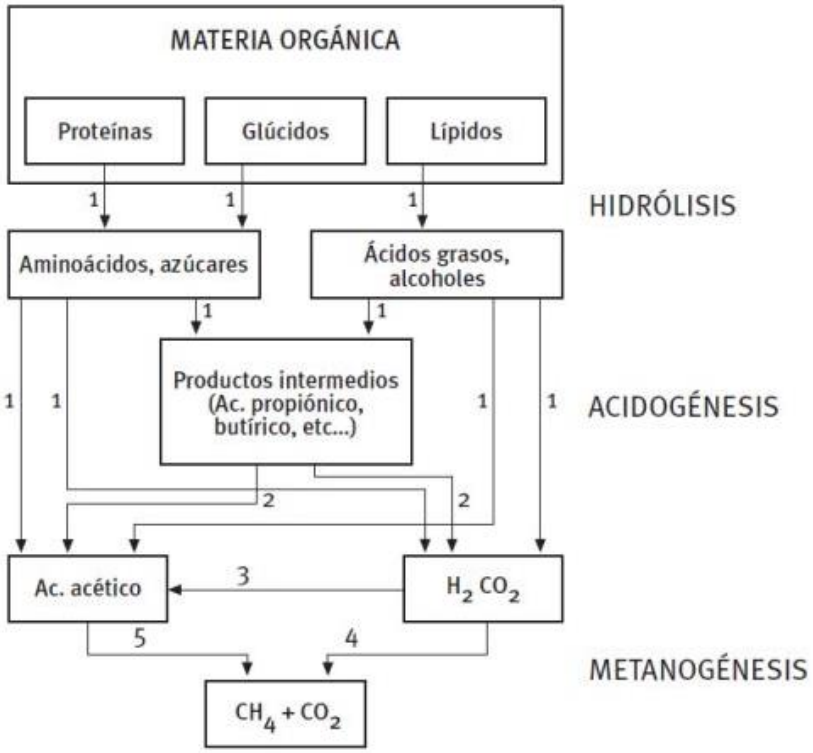


Figura 2. Proceso de formación de biogás (Bidosol, 2021).

1) Primera etapa: etapa hidrolítica → las baterías hidrolíticas metabolizan las moléculas orgánicas más grandes.
2) Segunda etapa: etapa acidogénica → en esta etapa ocurre la formación del CO_2.
3) Tercera etapa: etapa acetogénica → las bacterias características metabolizan los compuestos que no han podido metabolizarse en la etapa anterior.

4) Cuarta etapa: etapa metanogénica → se trasforma el ácido acético producido en la etapa anterior, en metano y dióxido de carbono, y parte del dióxido de carbono, en metano y agua.

Tras este procedimiento, el gas obtenido se envía a una planta de procesado donde se limpia para eliminar las impurezas.

Las principales fuentes para la obtención del biogás son los residuos agrícolas, ganaderos y agroindustriales, los lodos de depuradora, e, incluso la fracción orgánica de los residuos domésticos.

De manera general, el proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás se realiza en vertederos o en reactores cerrados, a los que se conoce por el nombre de "digestores anaerobios".

1.1.5. Uso del biogás.

Los usos más comunes conocidos del biogás son los expuestos a continuación:

- Producción de calor o vapor.
- Generación de electricidad o combinación de esta con calor.
- Uso como combustible de vehículos, aunque esta aplicación se encuentra limitada por las dimensiones necesarias para el almacenamiento de la sustancia.

1.1.6. Proyección futura sobre el uso de combustibles.

Como se ha comentado, el petróleo sigue siendo la fuente de energía que encabeza de uso energético a nivel mundial; no obstante, parece plausible que en los próximos años crezca considerablemente el uso de energía del tipo renovable, por un lado, por el inevitable agotamiento de las reservas de petróleo, que supone una fuente no renovable, y, por otro lado, por la creciente preocupación por parte de la sociedad por la conservación y el cuidado del medioambiente.

Durante el pasado año 2020, hubo un claro descenso de las emisiones de CO_2 a la atmósfera, que, en cierto modo, pudo estar provocado por la parada de gran parte de

la actividad económica debido a la llegada de la pandemia del COVID -19. En concreto, en España, por primera vez en décadas hubo un descenso de los niveles de emisión de GEI, alcanzando cifras que no se veían desde 1973, que supone un claro incentivo para seguir buscando la disminución de emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.

Además, cabe destacar que 2020 ha sido un año en el que el uso de Energías Renovables también ha aumentado notoriamente, mientras que el uso del carbón se redujo en un 20%.

La Unión Europea por su parte, tiene como objetivo en vista al año 2050, la disminución de hasta un 55% de los Gases de Efecto Invernadero. Se espera que, para ese año, la mitad de la energía consumida en el mundo sea Energías Renovables.

1.1.7. Desarrollo sostenible.

En las últimas décadas, ha habido un aumento de consumo de materias primas, de tal envergadura que se sabe que podrá comprometer los recursos disponibles para las generaciones futuras. Esto, unido al continuo crecimiento de la generación de residuos hace que sea necesario un cambio de rumbo en el consumo de estos recursos a todos los niveles. Todo lo mencionado ha llevado a una respuesta por parte de numerosas entidades, tal como el proyecto denominado *"Agenda 2030"* (Naciones Unidas, 2015*)*. Este proyecto supone una nueva hoja de ruta que expone diecisiete objetivos para propulsar la implantación de prácticas fundamentadas en el Desarrollo Sostenible (DS). Dentro de estos objetivos, el número 7, se basa en la búsqueda de una energía asequible y no contaminante, lo que involucra directamente el tema que ocupa este Trabajo Fin de Grado.

Los otros puntos relacionados con el DS, que se encuentran en el programa de "*Agenda 2030*", son los expuestos a continuación (*Agenda 2030, Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030)*:

1. Poner fin a la pobreza.
2. Hambre cero.
3. Salud y bienestar.

4. Educación de calidad.
5. Igualdad de Género.
6. Agua limpia y Saneamiento.
7. Energía asequible y no contaminante.
8. Trabajo decente y crecimiento económico.
9. Industria, Innovación e infraestructura.
10. Reducción de las desigualdades.
11. Ciudades y Comunidades sostenibles.
12. Producción y consumo responsables.
13. Acción por el clima.
14. Vida submarina.
15. Vida de ecosistemas terrestres.
16. Paz, justicia e instituciones sólidas.
17. Alianzas para lograr los objetivos.

Figura 3. Objetivos del Desarrollo Sostenible (Europapress,2021)

El concepto *Desarrollo Sostenible*, tiene sus inicios en los años sesenta, época en la que comienza a causar preocupación el efecto negativo de la actividad de la industria en el Medioambiente; y, a partir de entonces, ha ido evolucionando hasta la actualidad.

Así, este concepto ha sido definido numerosas veces, siendo quizá, la definición más acertada y la que se usa con más frecuencia, la atribuida a las Naciones Unidas, que lo contextualiza como "el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las propias".

El movimiento que hay entorno al desarrollo sostenible, incluye, por lo tanto:

1) Sostenibilidad económica.
2) Sostenibilidad Ambiental.
3) Sostenibilidad social.

El principio clave del desarrollo sostenible desarrollo sostenible que subyace a todos los demás es la integración de estos tres conceptos (Rachel Emas, 2015*)*

1.1.8. Economía circular.

A partir de la idea del DS, surge el concepto de *Economía Circular* (EC), que supone un avance a nivel científico, económico y político. El modelo basado en esta economía circular tiene como objetivo favorecer el desarrollo económico, protegiendo, a su vez, el Medioambiente y previniendo la contaminación, para ayudar a que sea posible llevar a cabo un desarrollo sostenible.

La EC surge como una alternativa al modelo lineal de gestión de recursos y residuos, que se conoce desde hace tiempo, basado en el principio "coger, hacer, tirar".

La filosofía que mueve la EC está siendo aplicada actualmente por numerosas empresas e industrias, cambiando su política de gestión de recursos y residuos, así como por muchos países que han creado protocolos para contribuir con su aplicación. Un ejemplo bastante actual de ello, lo tenemos en España, donde desde el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, se ha creado un "Plan de apoyo a la implementación de la normativa de residuos, programa de economía circular y plan de impulso al Medio ambiente-PIMA residuos", que consta de unas ayudas que tienen como objeto acelerar las inversiones necesarias para mejorar la gestión de los residuos en España y garantizar el cumplimiento de los nuevos objetivos comunitarios en materia

de gestión de residuos municipales, y de envases y residuos de envases, fundamentalmente. Se tienen nuevos objetivos de preparación para la reutilización y reciclado de residuos: 55% en 2025, 60% en 2030 y 65% en 2035.

Este modelo económico, político y ambiental pretende tener como principal finalidad la reducción de los residuos al mínimo.

En este ámbito, cabe mencionar el nombre de William McDonough, creador del concepto "*Cradle to Cradle*" ("De la cuna a la cuna"), siendo este uno de los principios que definen el concepto de la EC, y el de su colaborador Michael Braungart. McDonough y Braungart definieron tres elementos básicos para aplicar el paradigma de la EC (Prieto-Sandoval, Jaca, & Ormazabal, 2017):

1) Conversión de residuo en recurso.
2) Uso de las energías renovables.
3) Cierre de los ciclos de energía y materiales.

Estos tres puntos pueden vincularse directamente con la producción de energía a partir de los residuos pertenecientes a la biomasa, por lo que se puede afirmar caramente que la producción de biogás es un mecanismo de reutilización de residuos amigable con la filosofía de la Economía Circular y el Desarrollo Sostenible.

Figura 4. Economía circular (Parlamento Europeo, 2015).

1.1.9. Huella de Carbono.

Directamente relacionado con el DS y la EC, está la "Huella de Carbono" (HC).

La HC es una medida que aporta información sobre las emisiones de los Gases de Efecto Invernadero, generados por una persona, empresa, actividad, producto, evento o entidad territorial, tanto de forma directa como indirecta.

Los principales GEI, son:

1) Dióxido de Carbono (CO_2).
2) Metano (CH_4).
3) Óxidos de Nitrógeno (NO_x).
4) Hidrofluorocarbonados (HFC).
5) Perfluorocarbono.
6) Hexafloruro de azufre.

La HC se mide en CO_2 equivalente. Se utiliza esta medida porque este es el gas más abundante dentro de los, ya vistos, GEI. Esta unidad, a su vez se contabiliza por toneladas de CO_2.

Existen numerosas herramientas para el cálculo de este parámetro, que está basado en la siguiente expresión:

$$HC = Datos\ de\ actividad * Factor\ de\ emisión$$

En ella, los "*Datos de actividad*" corresponden con el nivel de la actividad generadora de GEI, el "*Factor de emisión*", por su parte, definen la cantidad de emisiones correspondientes a cada actividad (Gobierno de Canarias, 2021).

Las emisiones de GEI sufrieron una disminución durante el año 2020, debido a la Pandemia ocasionada por la COVID – 19; no obstante, han vuelto a subir, tanto que se estima que en el 2021 el crecimiento será del 4,8 %.

Actualmente, los países que lideran el ranking mundial, en cuanto a emisiones, son China, en primer lugar, seguida de Estados Unidos e India. En Europa, el mayor emisor de GEI es Alemania, y en América Latina, la lista la encabeza México.

Los expertos sobre el cambio climático consideran que los valores actuales medios por habitante de la HC se encuentran aún muy por encima de lo que deberían estar para la necesaria sostenibilidad. Así, la media mundial se sitúa en torno a 6 tn de CO_2 equivalente, aunque, como hemos visto, está distribuida de manera desigual entre los países, siendo en los países más desarrollados mayor que en los que están en vías de desarrollo. Por todo esto, apremia la necesidad de una reducción en la generación de los GEI.

1.2. RESIDUOS.

Según la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, estos se definen como aquellos materiales o productos cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentran en estado sólido o semisólido, líquido o gaseoso y que se contienen

en recipientes o depósitos; pueden ser susceptibles de ser valorizados o requieren sujetarse a tratamiento o disposición final conforme a lo dispuesto en la misma Ley.

1.2.1. Tipos de residuos.

Los residuos se pueden clasificar según su peligrosidad, según sus características y origen, o bien, según su composición.

Figura 5. Residuos según su peligrosidad. Elaboración propia.

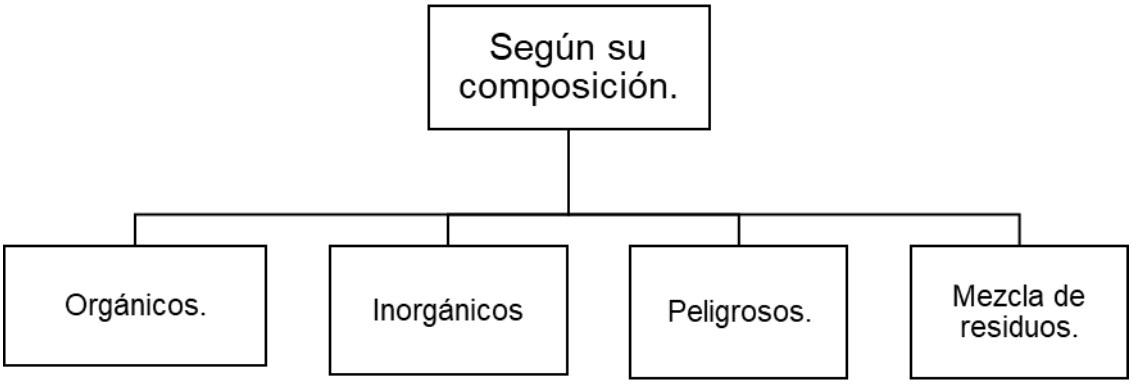


Figura 6. Residuos según su composición. Elaboración propia.

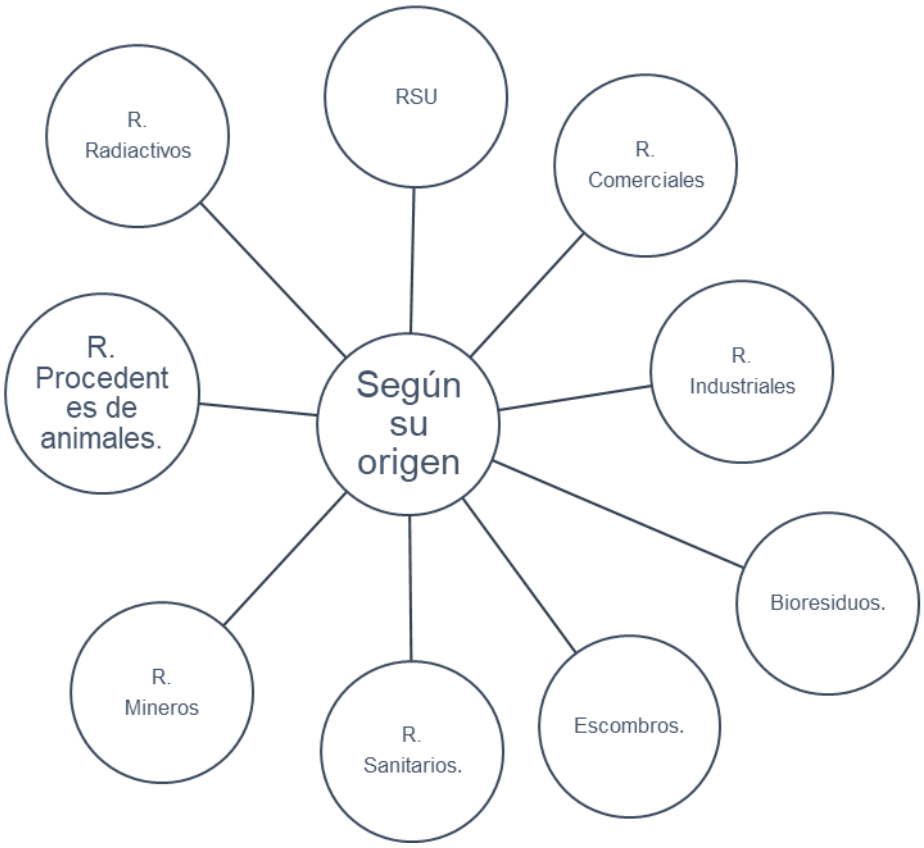


Figura 7. Residuos según su origen. Elaboración propia.

1.2.2. Tratamiento de residuos.

El tratamiento de los residuos parte de la premisa de reciclar todo el residuo o la mayor parte de este.

Los sistemas de tratamiento de residuos incluyen la operación o conjunto de operaciones que tienen por objetivo modificar las características físicas, químicas o biológicas de un residuo (Fundación Ecolec (s.f), s.f.)

El tratamiento de los residuos tiene como finalidades:

1) Reducir o neutralizar las sustancias peligrosas que pudieran contener los residuos.
2) Recuperar materias primas que tengan cierto valor.
3) Facilitar el uso como fuente energética.

Existe varios tipos de tratamiento de residuos que dependen de varios factores, por ejemplo, el tipo de residuo a tratar. Algunos de ellos, son los que se expondrán a continuación:

- Preparación para reutilización.
- Compostaje.
- Biometanización.
- Tratamiento biológico.
- Incineración.
- Pirólisis.
- Gasificación.
- Tratamiento de plásticos.
- Tratamiento de metales.
- Tratamiento de papel y cartón.
- Tratamiento de escombros.
- Tratamiento de materiales voluminosos.
- Tratamiento de aparatos eléctricos y electrónicos.
- Tratamiento de vidrio.
- Depósito en vertedero.

1.2.3. Residuos del sector primario.

Las actividades que pertenecen al sector primario son:

- Agricultura.
- Ganadería.
- Pesca.
- Minería.
- Explotación forestal.

La agricultura y ganadería, en concreto, son actividades que se han dado históricamente en España y que han experimentado un crecimiento exacerbado en las últimas décadas, de hecho, España ocupa el cuarto puesto en cuanto a explotaciones

agrícolas y ganaderas de Europa, siendo solo superada por Rumanía, Polonia e Italia. Junto al crecimiento del número y extensión de las explotaciones agrícolas y ganaderas, ha llegado el aumento de la generación de residuos procedentes de este sector.

Con la llegada de la Crisis Sanitaria generada por la COVID – 19, que ha traído consigo una crisis económica con repercusión internacional, muchos sectores económicos, entre ellos el sector primario, se han visto afectados de forma negativa.

No obstante, se prevé que vuelva a cobrar importancia y a aumentar su producción, conforme vaya mejorando la situación y, en vista a la importancia de las industrias alimentarias, cuyos proveedores pertenecen a este sector. En consecuencia, a este aumento de la actividad agrícola y ganadera, aún aumentará más la cantidad de residuos que se generan.

De modo que, el tratamiento y/ o eliminación de los residuos pertenecientes al sector agrícola y al sector ganadero, resulta ser una medida que se deba aplicar de forma inminente.

1.3. SITUACIÓN EN CANARIAS Y EN LA ISLA DE TENERIFE.

El sistema energético en Canarias, actualmente formado por seis subsistemas, es un sistema poco estable. Esto se debe, según un informe de energía de Las Palmas de Gran Canaria, a factores como su pequeño tamaño, su orografía, lo que dificulta una conexión entre islas, así como la existencia de unas tecnologías orientadas a la utilización de combustibles fósiles que no permiten una diversificación de la manera de obtención de energía (ElDiario.es, 2018). Un claro indicativo de la inestabilidad que caracteriza al sistema energético del archipiélago se refleja en los “ceros energéticos” que se han producido en la última década, sumando en ese periodo temporal un total de cinco, el último contabilizado el 15 de julio de 2020.

En Canarias, la situación energética ha evolucionado desde la época prehispánica en la que la principal fuente de energía se basaba en la fuerza humana, pasando por los molinos de agua y de viento, e, incluso, la leña, hasta la actualidad, en la que el petróleo

supone la mayor fuente de energía en las islas. Los combustibles fósiles, que lideran la lista de las fuentes de obtención de energía, llegaron al archipiélago durante el desarrollo de la Revolución Industrial.

La generación y el consumo energético, tal y como ocurre a nivel internacional y nacional, también ha ido en aumento en los últimos años dentro de las islas. De hecho, el pasado mes de mayo de 2021, se generó un total de $6{,}4 \times 10^5$ MW/h en todo el Archipiélago Canario, lo que supone $5{,}5 \times 10^4$ MW/h más que o generado en el mismo periodo del año anterior. Actualmente la isla que más energía eléctrica consume es la Isla de Tenerife, que concentra casi un 50% de la energía total del territorio insular, tal y como queda reflejado en la *Figura 8.*

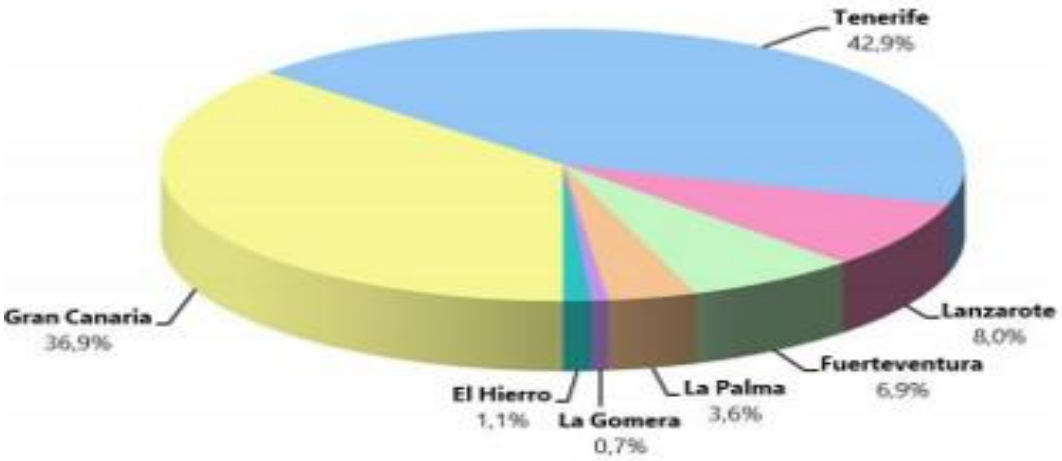


Figura 8. Porcentaje de uso de energía eléctrica por islas. Obtenido del Anuario energético de Canarias (ISTAC).

Tanto en el panorama internacional como en el ámbito insular, la mayor parte de la energía se destina a la generación de electricidad y a transportes; aunque en Canarias cobra más importancia este último, debido especialmente a su localización y a que el turismo ha supuesto el principal motor económico, a pesar de verse considerablemente afectado a raíz de situación que ha generado la crisis de la COVID – 19, ya que se espera que este sector vuelva a crecer, superando, incluso, los valores que había alcanzado antes de la aparición de este agente y de la crisis económica y sanitaria que ha traído consigo.

La mayor parte de la energía que se consume en Canarias está generada a partir de combustibles fósiles, siendo las Energías Renovables una minoría en la actualidad. De la energía total contabilizada en el año 2019, las energías renovables contribuyeron solo en el 25,5 % de la generación energética total, a pesar de los múltiples recursos con los que cuentan las islas para generar energías "limpias", como la solar, la eólica, hidráulica, y, especialmente, la mareomotriz.

En relación con esto, cabe destacar la peculiaridad en la Isla de El Hierro, que es la isla con menor superficie y población dentro del archipiélago, con tan solo 11340 habitantes (año 2020*)*, y que, además, registra las menores cifras en cuanto a llegada de turistas de Canarias. En esta isla se ha llevado a cabo un Proyecto, propulsado por el *Grupo Endesa* y la sociedad *Gorona del Viento S.A* (Gorona del Viento, 2021)*,* que es la compañía mayoritaria de generación y distribución energética en el archipiélago, que tiene como objetivo hacer de la menor de las islas Canarias, la primera isla en ser 100% renovable, como una idea para contribuir con el DS. Se trata de una central en la que se utilizan la energía eólica y la energía hidráulica de manera combinada, esta central se construyó en 2014, y recibe el nombre de "*Gorona del Viento".* Dicha central que genera electricidad a partir de energía totalmente renovable abastece actualmente a toda la isla de El Hierro.

Canarias cuenta con un flujo de residuos orgánicos que supone un problema, no solo para el medioambiente, sino también para la salud de las personas. Ello lleva a pensar en la posibilidad de una explotación de otras energías alternativas en el resto de las islas del archipiélago, como pueden ser las derivadas de la biomasa. No obstante, en Canarias no existe a penas tecnología de aprovechamiento de este tipo de energía. De hecho, la primera planta para la producción de biogás a partir de residuos ganaderos se ha abierto recientemente en Agüimes (municipio de Gran Canaria), en noviembre de 2020 (Gobierno de Canarias, 2020). Cierto es que con la ya mencionada crisis del COVID – 19, ha habido un descenso en los residuos producidos, no solo en el sector agrícola, sino de forma general, no obstante, en consecuencia, de la esperada recuperación de la economía, se conjetura la vuelta a la "normalidad" en cuanto a la generación de residuos se refiere, ya que, además, el Gobierno de Canarias ha creado un plan de ayudas para

amortiguar el impacto desencadenado por la pandemia en este tipo de sectores económicos.

A nivel Insular, en la isla de Tenerife, existe un proyecto denominado "*Tenerife 2030*", que abarca todos los campos relacionados con la implantación de una economía circular que promocione el desarrollo sostenible. En lo referido a la energía, el programa "*Tenerife 2030*", espera aumentar en un 40% de aquí a los próximos años, el uso de Energías Renovables.

Como se ha comentado, el ámbito económico del Archipiélago Canario cuenta con un panorama peculiar, ya que la economía tiene como principal motor el turismo, que ha crecido de forma exponencial, aumentando hasta un 120% en los últimos 50 años, exceptuando el descenso debido a la crisis sanitaria y económica que ha supuesto la pandemia ocasionada por el Coronavirus; de hecho, se espera que, una vez este vaya desapareciendo, los valores vuelvan a crecer.

Además, el archipiélago cuenta en la actualidad con siete *Reservas de la Biosfera*, nombradas por la UNESCO (*Gobierno de Canarias, 2021),* de las 45 que se encuentran en todo el territorio nacional, por lo que la preservación del entorno se vuelve, sin duda, un aspecto muy importante.

La llegada del turismo, sin embargo, ha supuesto un aspecto negativo sobre el medioambiente. Este impacto comprende desde el uso excesivo de combustibles contaminantes, usados en aviones y barcos (principales medios de trasporte para acceder a las islas), hasta el aumento de las basuras y la erosión del medio, y la sobreexplotación de los parajes naturales. En cuanto a la energía utilizada en trasporte, el archipiélago se encuentra por encima de la media nacional, con un 72% de su energía primaria utilizada por la industria del transporte.

Por otra parte, Canarias cuenta con una organización llamada PMUN (Agencia Canaria de Protección del Medio Natural), que se crea como una entidad con el objeto de proteger el Medioambiente a nivel insular y autonómico en colaboración con otros organismos que operen dentro del Archipiélago (APMUN, 2021).

Actualmente, el sector económico con más representación en el Archipiélago, como ya se ha comentado, es el sector servicios, dentro de dónde queda englobado el turismo, que supone un 86,16% del total, según los datos recogidos del ISTAC (Instituto de Estadística de Canarias). El sector primario, sin embargo, se sitúa en el último lugar, con un 3,24% de representación con respecto al total, tal y como se observa en la *Figura 9.*

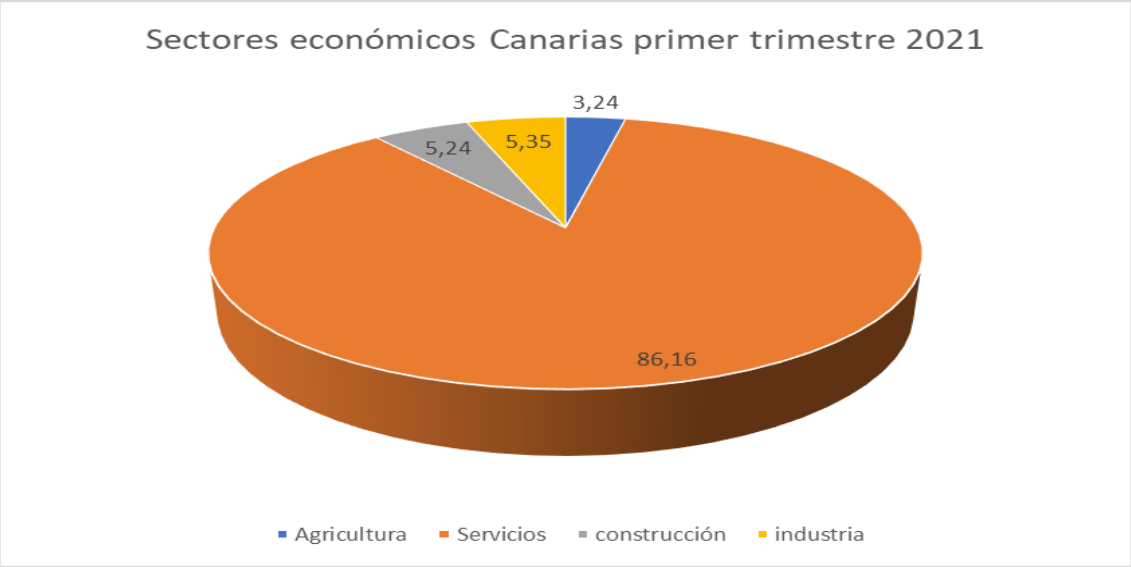


Figura 9. Sectores económicos de Canarias. Gráfico de elaboración propia a partir de los datos recogidos del ISTAC.

Sin embargo, a diferencia de otros sectores económicos, el sector turístico, no destaca por su labor dentro de la apuesta por el DS y la EC, por lo que genera una gran cantidad de residuos, que luego no son tratados como recursos; lo que, debido a su importante representación dentro de los sectores económicos, implica que habrá un volumen significativo de residuos en las islas.

Esto, unido a la situación energética previamente explicada, hace que se vuelva imprescindible una buena gestión de residuos y su aprovechamiento como posibles recursos, además de un cambio en la estrategia energética y medioambiental.

1.3.1. Plan Integral de Residuos de Canarias.

El Plan Integral de Residuos de Canarias (PIRCAN), es un documento elaborado y aprobado por el Gobierno de Canarias, que contempla la planificación de la gestión de los residuos generados dentro de la Comunidad Autónoma de Canarias de acuerdo con lo que se establece en la "*Ley de Residuos y suelos Contaminados*". Supone una herramienta mediante la cual se coordinan todas las actividades relativas a los residuos según su clasificación (Consejería de Política Territorial y Medioambiente, s.f.)

El PIRCAN nace en 1997 y se basa en las directrices europeas sobre Gestión de Residuos y Medioambiente.

El mencionado plan, abarca los siguientes tipos de residuos:

- Residuos Sólidos Urbanos.
- Residuos Industriales.
- Residuos Sanitarios.
- Residuos Agrícolas y Ganaderos.
- Residuos Forestales.

Además del PIRCAN, existen unos documentos denominados "*Planes Insulares directores de Residuos Sólidos Urbanos*", que estarán elaborados por el Cabildo de cada isla (*Portal de Noticias del Gobierno de Canarias, 2021).*

La última edición de este documento es el *PIRCAN 2020-2026.*

2. OBJETIVOS

.

En base a la propuesta de Trabajo Fin de Grado a raíz de la gran preocupación por el medioambiente por el progresivo aumento de la generación de residuos en general, y particularmente en la isla de Tenerife, sumando el efecto nocivo que ejercen éstos sobre el ambiente y la salud de la población, el objetivo principal de este trabajo es la valorización energética de los residuos procedentes del sector primario de la isla de Tenerife (agricultura y ganadería).

Como objetivos específicos, se han establecido:

1) Análisis del flujo de residuos, tanto en la Isla de Tenerife como en la Comunidad Autónoma de Canarias, y su evolución a lo largo de los últimos años.
2) El estudio cuantitativo y cualitativo de la producción de gas a partir de un proceso continuo de digestión anaerobia empleando diferentes mezclas de residuos del sector primario procedentes de la isla de Tenerife.
3) El estudio del efecto de diferentes inóculos sobre la producción y calidad de gas producido, así como su tiempo medio de generación.
4) Caracterización de los residuos y de las mezclas de éstos, mediante la determinación de Sólidos Totales, Sólidos Volátiles y Sólidos Fijos, así como el análisis elemental de cada una de las muestras.
5) El análisis del posible aprovechamiento del digestato para ser utilizado, entre otros, como compost o fertilizante.

3. MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1. Materias primas.

Los residuos del sector primario utilizados en este trabajo abarcan:

- Residuos de plátano (PL)
- Residuos de higos (H)
- Residuos de pencas (P)
- Residuos de almendras y bellotas (AB)
- Purines de conejo (CO)
- Purines de vaca (VA).
- Lodos procedentes de la línea de lodos de la depuradora de la industria "*Compañía Cervecera de Canarias".*

Los residuos agrícolas y ganaderos se recogieron en una finca situada en la localidad de Geneto, perteneciente al municipio de San Cristóbal de La Laguna (Isla de Tenerife), mientras que los lodos activos han sido cedidos por la empresa perteneciente al sector de la industria de alimentaria: "*Compañía Cervecera de Canarias"*, cuya sede se encuentra en el Barrio de la Salud, perteneciente al municipio de Santa Cruz de Tenerife, capital de la Isla de Tenerife.

Estos residuos han seleccionado específicamente por dos razones principales: en primer lugar, por la cantidad de sólidos volátiles que poseen, lo que los hace susceptibles especialmente para producir biogás, y, en segundo lugar, por el porcentaje de representación que tienen dentro de la producción total de residuos procedentes del sector primario que existe en la isla de Tenerife, según los datos recogidos tanto por el Gobierno de Canarias por el Instituto Canario de Estadística.

Por otra parte, los productos químicos empleados han sido los recogidos en los ensayos de fermentación anaerobia:

- Hidróxido sódico en lentejas (sosa cáustica): NaOH (s)
- Ácido Clorhídrico al 37 %: HCl.
- Buffer (disolución de fosfato (pH= 7,4)): $(PO_4)^{3-}$.

- Carbonato cálcico: $CaCO_3$(s).
- Cloruro de amonio (NH_4Cl) (s).
- Nitrógeno gas al 99% (Air Liquide) y agua destilada.

3.2. Material de laboratorio.

El material de laboratorio y los componentes de la instalación experimental donde se han realizado los experimentos, han sido:

- Reactor de 3L de capacidad, con agitación, que se expondrá en el siguiente apartado.
- Lector digital de volumen de gas producido (Marca Ritter).
- Medidor de pH.
- Medidor de temperatura.
- Panel de control de vigilancia de pH y temperatura de la instalación.
- Calentador con “set point”.
- Ordenador.
- Motor para agitación.
- Bomba tipo pistón, para dosificar disolución de NaOH al 10% (Marca SEL).
- Vasos de precipitado de 100 ml, 250 ml y 500 ml, y de 5L.
- Probetas de 250 ml, 500 ml y 1000 ml.
- Embudos.
- Espátula, cucharas y varillas.
- Pipetas.
- Triturador.
- Molino de bolas.
- Bomba de vacío.
- Crisoles de cerámica.
- Jeringa para gases de 1ml.
- Martillo de goma.
- Agitador de paletas.
- Cromatógrafo de gases.

- Estufa.
- Mufla.

3.3. Preparación de muestras.

El procedimiento en la preparación de las muestras sometidas a digestión anaerobia ha sido el siguiente:

1) En primer lugar, los residuos seleccionados de plátano, pencas, higos y cáscaras de almendras y bellotas se pesan y se cortan de forma individual en pedazos de un tamaño uniforme y lo suficientemente pequeño para luego ser triturados, con ayuda de un martillo, un procesador de alimentos y el molino de bolas, las cáscaras de almendras y bellotas.
2) A continuación, se pesa la cantidad necesaria de cada residuo según lo establecido para el ensayo.
3) El siguiente paso es mezclar los componentes. En el caso de los tres últimos experimentos, se han mezclado los componentes en un recipiente de 5L, empleando un motor con un agitador de paletas.
4) Se introduce la mezcla junto al inóculo en el reactor. En el caso del penúltimo experimento, el inóculo se introdujo dos días antes del resto de los componentes de la mezcla, con el fin de buscar su aclimatación.

Se han realizado seis experimentos de digestión anaerobia, cuyas características quedan resumidas en la *Tabla I.*

Tal y como se detalla en la tabla I, para la realización de los experimentos E4, E5 y E6, se realizó la mezcla de los residuos con los componentes químicos antes de ser introducidos en el reactor para asegurar su homogenización. Para ello se utilizó un motor con un vástago.

Además, cabe destacar que durante la preparación de los ensayos E5 y E6 no se pudo contar con los residuos procedentes de los higos.

Tabla I. Características de experimentos de digestión anaerobia.

Velocidad de agitación = 1400 rpm - P = 1atm -T= 31ºC									
Datos del experimento				Composición de los residuos (g)			Composición del inóculo (g)		Observaciones
EXP	Contenido en ST (g)	Masa total de residuos (g)	pH inicial	PL	P+H	AB	Tipo	Peso (g)	
E1	100	353	6,17	215,73	79,22	11,66	(CO+VA)	47	
E2	350	1492	5,81	763	522,57	40	(CO+VA)	166,6	Repetición del experimento anterior con más cantidad de residuos, para comprobar veracidad de resultados.
E3	350	1516	6,04	763	522,57	40	Lodos	190	No produjo.
E4	350	1516	6,24	763	522,57	40	LO	150	Mezcla de residuos, inóculo y prod. Químicos realizada con sistema de agitación motorizado.
E5	350	1265	6,10	768	457	40	LO	120	Se repitió el modo de proceder del experimento anterior, además la proporción de lodo fue casi el doble. A falta de materia prima (higos), se modificaron las cantidades de residuos. Aclimatación previa del lodo. No produjo.
E6	350	1516	5,87	763	522,57	40	LO	150	Se repitió el experimento IV para comprobar los resultados. Res. Higo no disponible.

3.4. Instalación Experimental.

La instalación experimental cuenta con un reactor de vidrio de 3 L de capacidad encamisado. Este está provisto de una tapa de teflón con unos orificios para colocar los siguientes instrumentos:

- Un medidor de pH.
- Un medidor de temperatura.
- Un dosificador de la disolución de NaOH que queda conectado a una bomba tipo pistón.
- Accesorio en "T" unido por un lado a una válvula de extracción de gases, y por el otro, a la salida de este hacia el medidor de volumen.

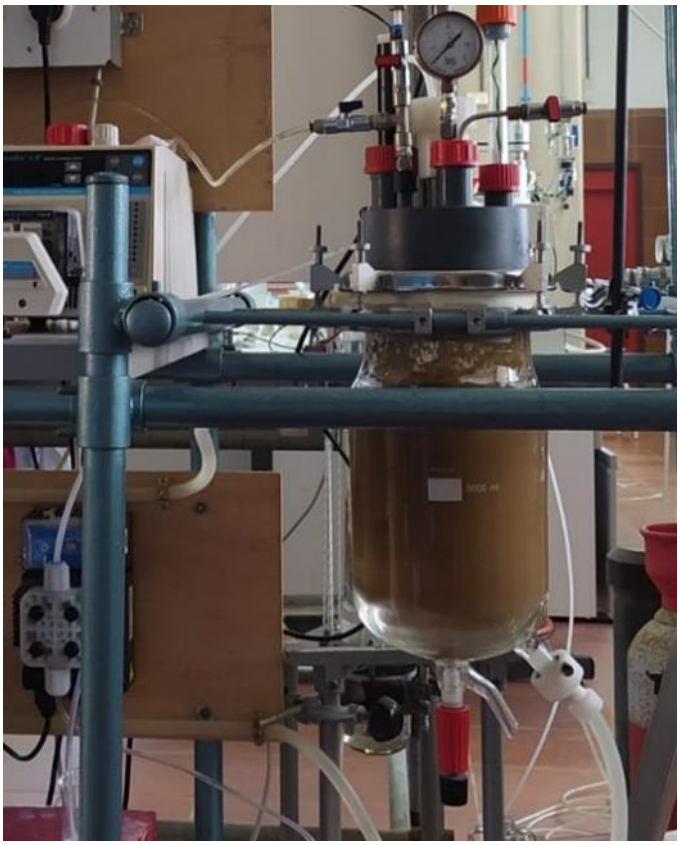


Figura 10. Reactor de 3 L de capacidad. Imagen de realización propia.

Figura 11. Vista superior del Reactor de 3L. Imagen de elaboración propia.

El reactor está encamisado, circulando agua como líquido calefactor a 31ºC (set point) para asegurar en este valor la temperatura de la mezcla de reacción en todo momento. Además, cuenta con un sistema de agitación que está conectado a un motor que mantiene constante la velocidad, que está en torno a 1400 rpm.

El seguimiento de las variables Temperatura y pH, se realiza mediante un panel de control. La lectura del gas medido se realiza mediante un contador de gas "MilliGascounter", de la marca Ritter, que permite obtener el volumen acumulado.

Además, para evitar que el líquido del reactor, o el condensado que pueda generar el gas en la conducción, puedan introducirse accidentalmente en el medidor de volumen, o que, en el caso contrario, el líquido que se encuentra dentro del compartimento del mismo pueda retroceder hacia el reactor, se ha instalado, justo a la

entrada del medidor, una pequeña columna de adsorción con cristales de sílice, y una válvula “check”, de manera que solo permita el paso de los fluidos en uno de los sentidos.

La monitorización de la producción de gas y del correcto funcionamiento del sistema se lleva a cabo mediante un ordenador. El conteo de volumen de gas medido se realiza con una hoja de cálculo en la que se ha implementado un algoritmo para que calcule automáticamente la cantidad de gas producido con relación a la materia orgánica introducida; mientras que la monitorización de las variables Temperatura y pH se realizará con la ayuda del Software suministrado por el proveedor.

Figura 12. Instalación completa. Imagen de elaboración propia.

3.5. Montaje y puesta a punto del dispositivo.

El montaje del reactor descrito anteriormente se lleva a cabo de forma sistemática, según el siguiente procedimiento:

1) Se comprueba la estanquidad del sistema. Se hace introduciendo gas nitrógeno en el reactor (0,5 kg/cm^2 de presión) y se comprueba que el manómetro situado en la cabeza del reactor está indicando dicha presión. Luego se abre la válvula de salida de gases y se permite que ese nitrógeno abandone el compartimento, comprobando que el manómetro alcanza de nuevo el valor de la presión atmosférica.
2) Se chequea la posible fuga y el buen funcionamiento de las válvulas.
3) Se comprueba y se purga la bomba, forzándola a que descargue sobre un vaso de precipitado, donde se asegura la correcta salida de la disolución de NaOH y se eliminan posibles impurezas que puedan quedar en el conducto de salida de la bomba.
4) Se observa el buen funcionamiento del reactor y la medida de todas sus variables.

A continuación, se verifica el ok del sistema, y se procede al montaje del reactor, introduciendo en primer lugar la mezcla de residuos, y a continuación el inóculo. En el experimento E5, se introdujo primero el inóculo en aras de su aclimatación previa, y unos días más tarde, la materia orgánica.

A la mezcla se le añade los siguientes compuestos en el orden siguiente:

- NH_4Cl (0,08 g NH_4Cl/g muestra)
- Disolución Buffer (0,167 ml Buffer/g muestra)
- $CaCO_3$ (9 mg $CaCO_3$/g muestra)

Tanto el $CaCO_3$ como el NH_4Cl, se disolverán en agua destilada, contabilizando dicha cantidad para no exceder el volumen de 1,5 L, ya que no se podrá sobrepasar este valor cuando se introduzca en el reactor para su correcto funcionamiento.

Una vez se introduce la mezcla, se cierra el reactor, asegurando el estanco de la tapa. En caso necesario, si el pH en el interior no lograse estabilizarse, se añade NaOH, hasta que se alcance el valor aproximado de pH neutro. Se ha comprobado que, al cerrarlo y crear una atmósfera libre de oxígeno, este pH aumenta ligeramente.

Para desplazar el aire que se encuentra en el interior del reactor y crear una atmósfera inerte, en primer lugar, se hace vacío mediante la utilización de una bomba de vacío y, en segundo lugar, se introduce gas nitrógeno (N_2) a una presión de 0,5 kg/cm^2. Este se mantiene en el interior del reactor durante unos segundos y luego se elimina abriendo la válvula de salida del reactor y comprobando que la presión en el interior de este vuelve a ser igual a la atmosférica.

Tanto el vacío como la inyección de gas nitrógeno, se hace a través del orificio de salida de gases del reactor.

El siguiente paso es poner en marcha el motor para que empiece la agitación, con una velocidad de 1400 rpm. La potencia de agitación de la mezcla se determinará en base a dos premisas principales:

- Promover una correcta producción de gas.
- Evitar la formación de espumas.

Una vez finalizado y chequeado el montaje, se pone en marcha el software se crea una nueva “hoja de cálculo” donde se indicará la cantidad de sólidos totales que tiene la muestra, para que se vaya contabilizando el volumen producido.

3.5.1. Preparación de la disolución de NaOH.

Como se había comentado y se observa en las imágenes, una bomba de pistón es la encargada de bombear el hidróxido sódico al reactor en caso de que su pH sea inferior al establecido.

Esta disolución de NaOH 1,25 M previamente preparada, se sitúa en un pequeño depósito el cual se conecta a la bomba.

Se ha preparado 4L de disolución, para la que se colocan 200 g de NaOH.

3.6. Análisis de la composición del gas obtenido.

La composición del gas obtenido se realizó mediante cromatografía de gases, utilizando un cromatógrafo de gases marca Agilent, modelo 7820 A, con un detector de conductividad térmica, que emplea como gas portador helio (He), dicho cromatógrafo incorpora dos columnas de separación, conectadas en paralelo, una del tipo Molsieve, y la otra PPQ. En la *Figura 13 se* muestra una la imagen del equipo utilizado.

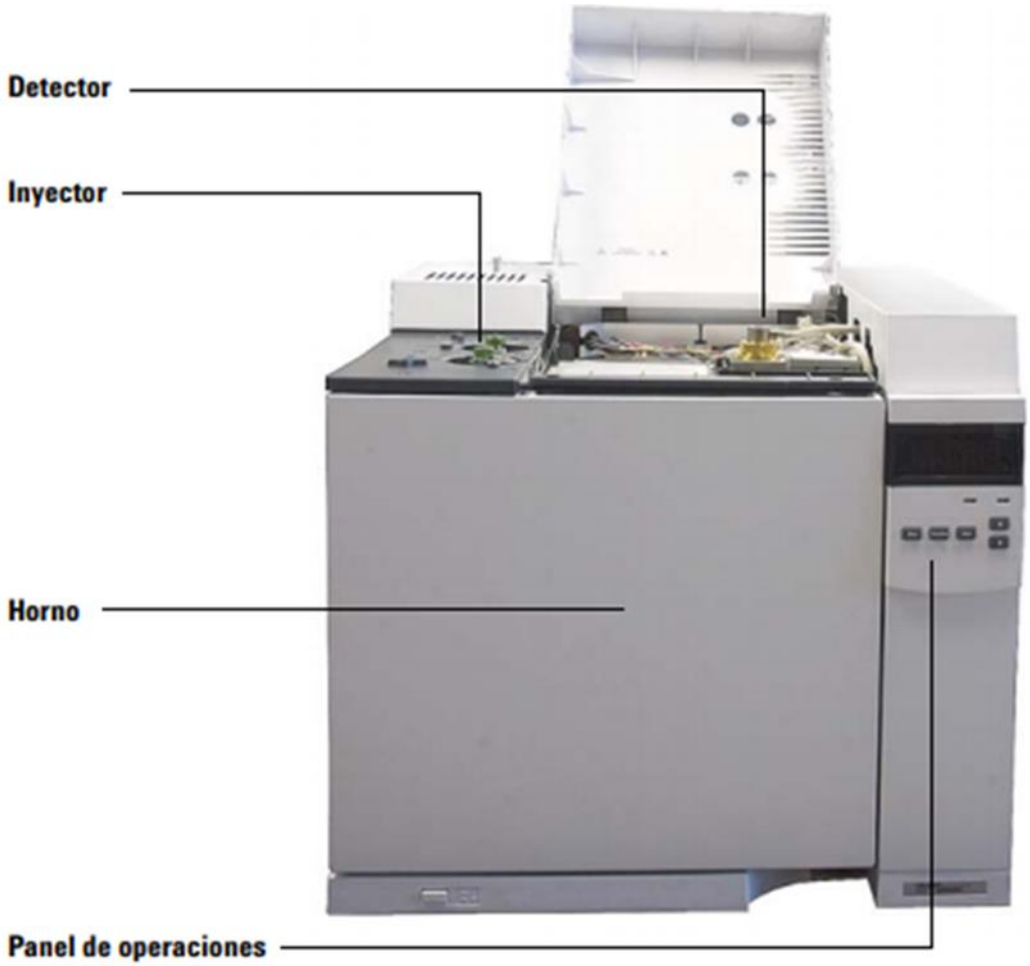


Figura 13. Cromatógrafo Agilent 7820 A. Imagen tomada del catálogo del fabricante.

El cromatógrafo consta de:

- Inyector o entrada para la muestra de gas.

- Separador, formado por dos columnas ubicadas en paralelo para la separación de gases, en la primera columna se detectan los gases permanentes, el hidrógeno (H_2), el oxígeno (O_2), el nitrógeno (N_2), el metano (CH_4) y el monóxido de carbono (CO), mientras que en la segunda columna se detectan el aire, el metano, el dióxido de carbono (CO_2) y algunos hidrocarburos livianos, hasta C2.
- Detector donde se determina que gases se encuentran presentes en la muestra a analizar. Los tiempos de detección de los gases de interés para este TFG (tiempos de residencia), se encuentran reflejados en la tabla II.

Tabla II. Tabla II: Tiempos de residencia de los gases de interés en el cromatógrafo.

Componente	t de residencia (min)
Nitrógeno	0,668
Dióxido de Carbono	4,434
Metano (1ª columna)	0,776
metano (2ª columna)	3,95

El cromatógrafo se maneja desde el panel de operaciones, desde el cual se puede controlar las variables de éste.

Para el análisis de gases se utiliza el software proporcionado por el proveedor del cromatógrafo, donde se programa el método, y otro para el seguimiento y recogida de resultados.

El análisis de cada muestra gaseosa de residuos se realiza por duplicado, de forma manual, inyectándose la muestra gaseosa, a través del inyector, empleando una jeringa para gases, que contiene una válvula para evitar su perdida; una vez introducidos se presiona la tecla de run y, se espera durante 15 segundos antes de sacar la jeringa del inyector. La secuencia de análisis durará seis minutos y medio.

Las variables de operación del cromatógrafo y sus valores estándar se encuentran recogidos en la siguiente tabla (*Tabla III).*

Tabla III. Parámetros cromatógrafo

Parámetro	Valor
Temperatura inyector	175 ºC
Presión inyector	9 psi
Temperatura detectora	180 ºC
Caudal de referencia.	36 mL/min
Caudal de "make up"	2 mL/min
Temperatura del horno.	40 ºC
Componente en la fase móvil	Helio

3.7. Estudio de contenido en Sólidos Totales, Volátiles y Fijos de los residuos y las muestras de residuos.

El estudio de las fracciones sólidas de algunas de las muestras de residuos, así como de sus componentes individuales, fue realizada en los laboratorios del departamento de Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica, mediante los siguientes pasos:

1) Peso de crisoles previamente lavados y secados.
2) Peso de crisoles con la muestras (se emplea un peso de aproximadamente 2g de muestra).
3) Secado de las muestras en la estufa, a 105ºC durante un periodo de 24 horas.
4) Peso de crisoles tras sacarlos de la estufa.
5) Calcinado de la muestras en la mufla, a 550ºC durante 3 horas.
6) Peso de los crisoles con la muestras calcinadas.

Figura 14. Crisoles con muestra antes de su colocación en la estufa.

Estos análisis fueron también realizados por duplicado, determinando el contenido en Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles (SV) y Sólidos Fijos (SF), según las expresiones que se tienen a continuación:

$$\%ST = \frac{B - A}{M} * 100$$

$$\%SV = \frac{B - C}{B - A} * 100$$

$$\%SF = \frac{C - A}{B - A} * 100$$

Dónde:

- A: Peso del crisol vacío (g)
- B: Peso del crisol + muestra tras pasar por la estufa a 105ºC (g)
- C: Peso del crisol + muestra tras salir de la mufla a 550ºC (g)
- M: Peso de la muestra (g)

3.8. Análisis elemental.

El contenido en Carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S), fue también determinado para algunas muestras de residuos, así como para las mezclas seleccionadas. Se realizó en los laboratorios del SEGAI, empleando un espectrofotómetro de masas, donde las muestras se oxidan completamente y de forma instantánea. (SEGAI, 2021).

El dispositivo con el que se lleva a cabo el análisis elemental es el Espectrómetro de masas *Micromass AutoSpec* y el analizador *Elemental CNHS FLASH EA 1112. (Figura 15).*

Figura 15. Imagen espectrofotómetro de masas (página de la marca analysis, 2020)

Para la realización de este análisis, las muestras representativas de los componentes y de las mezclas que se añaden al sistema de digestión, se deshidratan durante 12 horas en la estufa a una temperatura de 105ºC, y posteriormente se

pulverizan empleando un molino de bolas o un triturador. La cantidad de muestra empleada en estos análisis es inferior a 4 mg.

.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. Cuantificación de los residuos y selección de estos.

Tanto la comunidad autónoma de Canarias como la isla de Tenerife, en particular, son territorios en los que el sector primario, dentro del que se encuentra la ganadería y la agricultura, ha tenido gran importancia a lo largo de los años, y a pesar de que este sector ha perdido auge y en los últimos años se ha visto eclipsado por el sector terciario, sigue siendo un pilar fundamental en la economía de las islas.

En cuanto al sector ganadero, es importante destacar que, a pesar de que este ha carecido de importancia en las islas en comparación con otros sectores económicos, la situación ha dado un cambio en los últimos años debido a las ayudas por parte de la Unión Europea, lo que ha supuesto un aumento en la población ganadera de las islas (GEVIC, 2021). La ganadería es, pues, una actividad fundamental en la isla; tanto es así, que se ha creado el Plan Territorial Especial de Ordenación de la Actividad Ganadera de Tenerife (PTEOAG), con objeto de sectorizar y regular la actividad ganadera. Entre los productos mayoritarios del sector ganadero en las islas se puede encontrar: la leche, la carne, los huevos, la miel, la lana y el estiércol. En el presente trabajo se ha realizado una búsqueda bibliográfica del censo ganadero existente en la Comunidad Autónoma de Canarias en aras de estimar la producción de residuos que han podido generarse. Para ello se consultan diferentes fuentes, destacándose la del ISTAC y la del Gobierno de Canarias, así como en publicaciones del ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (ISTAC, 2020), (Agencia Extremeña de Energía (s.f), 2008) (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación , 2020). En las islas se contabilizaron, durante el año 2019, un total de 381.239 cabezas de ganado, de las cuales el 25 % (95.878) fueron registradas solo en la Isla de Tenerife.

Los resultados medios del número de cabezas, así como de sus residuos o purines producidos en el año 2019, en Canarias y Tenerife, quedan reflejados en la *Tabla IV* y la *Tabla V,* respectivamente. El cálculo de estos purines se ha realizado con los datos medios de las producciones de cada tipo de ganado, recogidos en las fuentes citadas con anterioridad.

Tabla IV. Purines producidos por las diferentes cabezas de ganado en Canarias en el año 2019)

Ganado	Número de cabezas	Producción por cabeza (t/año) PROMEDIO	Purines totales ($x10^3$) (t(año)	% del total
Vaca	19.408	18,338	355,90	84,93
Cabra	206.066	0,002	0,33	0,08
Cerdo	42885	0,629	26,97	6,44
Oveja	44.405	0,600	26,64	6,36
Conejo	29.938	0,164	4,92	1,17
Ave	34.290	0,068	2,32	0,55
Caballo	3.252	0,600	1,95	0,47

Tabla V. Purines producidos por las diferentes cabezas de ganado en la isla de Tenerife en el año 2019.

Ganado	Número de cabezas	Producción por cabeza (t/año)	Purines totales ($x10^3$) (t(año)	% del total
Vaca	3.624	18,338	66,46	75,18
Cabra	31.305	0,002	0,05	0,06
Cerdo	21.919	0,629	13,78	15,59
Oveja	5970	0,600	3,58	4,05
Conejo	15.540	0,164	2,55	2,89
Ave	15.705	0,068	1,062	1,20
Caballo	1.520	0,600	0,91	1,03

Estos resultados se han representado en las *Figura 16* y *figura 17,* donde puede observarse claramente que es el ganado vacuno el que origina más del 75 % de los excrementos o purines, tanto en la Isla de Tenerife como en la Comunidad Autónoma de Canarias. Sin embargo, el número de cabezas de cabra, o ganado caprino es el que predomina de forma general en las islas.

Esta cuantificación de residuos del sector ganadero en la isla de Tenerife, del orden de unas 70 toneladas anuales, en el pasado año 2019, es suficientemente importante como para estudiar su potencial desde un punto de vista energético.

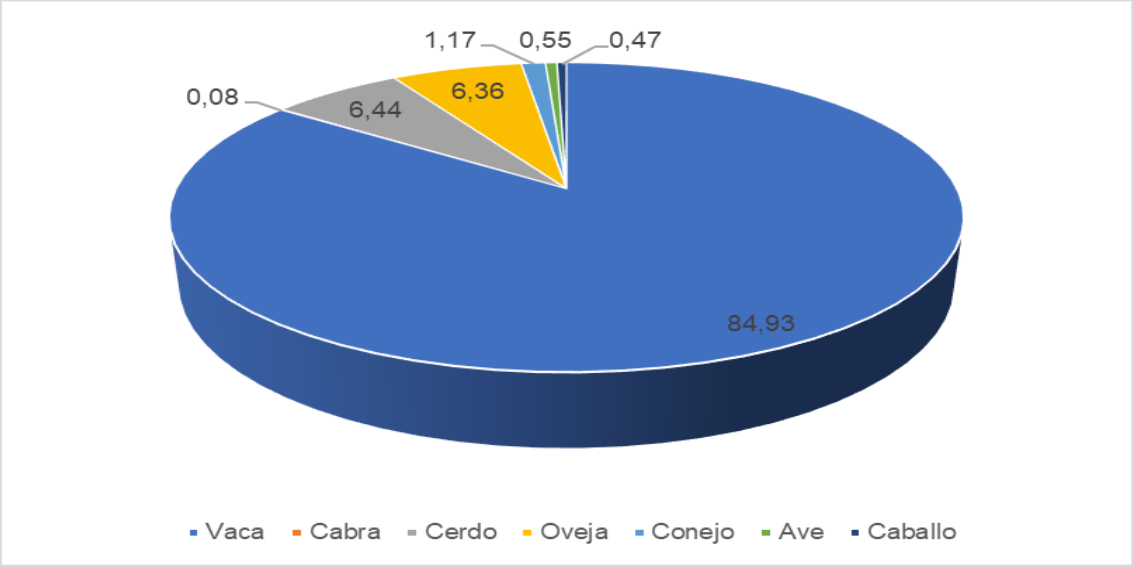


Figura 16. Porcentajes de diferentes residuos procedentes de la actividad ganadera en Canarias en el año 2019.

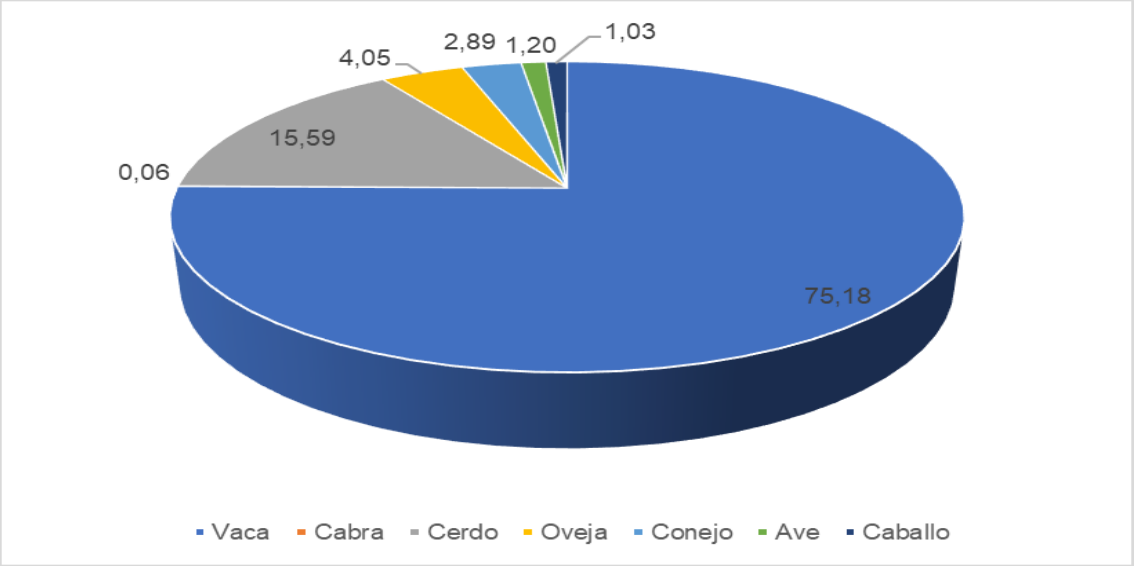


Figura 17. Porcentajes de diferentes residuos procedentes de la actividad ganadera en la isla de Tenerife en el año 2019.

En lo referido al sector agrícola, el censo de superficie utilizada para el desarrollo de esta actividad, en 2019, registra unas 40000 hectáreas en Canarias, correspondiéndole a la isla de Tenerife un total de 16000 Ha, lo que supone un 40% de la superficie agrícola total del archipiélago solo en la isla de Tenerife. Esta actividad

agrícola se regulariza a través de cooperativas que se distribuyen a lo largo del Archipiélago.

En el caso de los residuos procedentes de la agricultura, a falta de datos concretos sobre la producción de estos, se realiza una estimación a partir de la información recogida en el Instituto de Estadística de Canarias (*ISTAC, 2020)* en cuanto a las producciones de cada tipo de cultivos, así como de datos proporcionados por distintas cooperativas de agricultores establecidas en las diferentes islas. Es el caso de la Cooperativa de Frontera, que se ubica en la Isla de El Hierro, o la de Medianías, en la Isla de Tenerife. Los resultados de los distintos tipos de cultivos en el periodo entre 2012 y 2019 se presentan en las *Tablas VI* y *VII.*

Tabla VI. Cultivos del sector agrícola en la Comunidad Autónoma de Canarias en t/año.

Cultivos	Productividad (t/año)		
	Año		
	2012	2015	2019
Cereales	1578	3217	2652,8
Leguminosas	331	249	314,8
Tubérculos	128478	206981	169678,1
Hortalizas	260429	286534	286534
Cítricos	17204	20227	19030,2
Otros Frutales	416680	427048,5	450543,2
• Chumbera (Higos y pencas)	411	506	471,6
• Plátanos	371139	381968	398722,5
• Almendras + Bellotas	243	249	213,1
Viñedo	16523	18407	11911,5
Olivares y leñosos	437	846	544,2
Total, de todos los grupos de cultivos.	841660	963509,5	941208,8

Estos resultados de producciones de los diferentes cultivos son suficientemente importantes como para considerar que los residuos generados justifiquen, al igual que lo comentado anteriormente en el caso de los residuos del sector ganadero, su valorización energética.

Los porcentajes de cada tipo de cultivo respecto al total en el año 2019, queda reflejado en las *Figuras 18 y 19.*

Tabla VII. Cultivos del sector agrícola en la Isla de Tenerife en t/año.

Cultivos	Productividad (t/año)		
	Año		
	2012	2015	2019
Cereales	1175	670	644,3
Leguminosas	125	63	92,4
Tubérculos	52661	319427	94174,4
Hortalizas	76113	82857	99954,2
Cítricos	3171	4287	3249,6
Otros Frutales	174576,4	184428,2	185629,3
• Chumbera (Higos y pencas)	77	115	62,6
• Plátanos	157887	170375	167774,6
• Almendras + Bellotas	19	23	30,2
Viñedo	11979	11077	6766,4
Olivares y leñosos	36	110	88
Total, de todos los grupos de cultivos.	319836,4	602919,2	390598,6

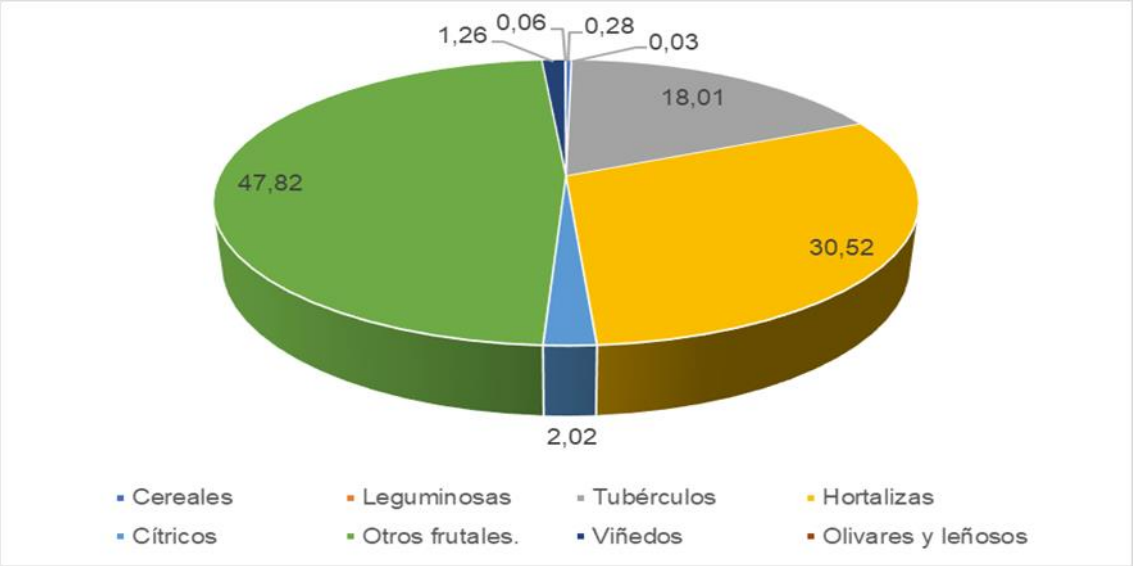


Figura 18. Porcentajes de diferentes cultivos de la actividad agrícola en la Comunidad Autónoma de Canarias en el año 2019.

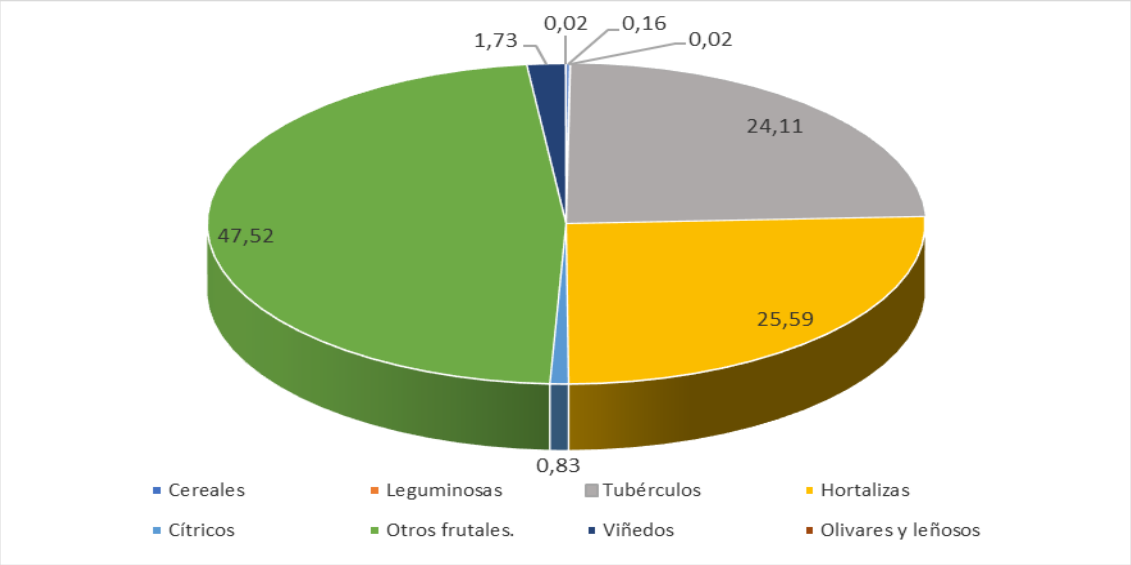


Figura 19. Porcentajes de diferentes cultivos de la actividad agrícola en la Isla de Tenerife en el año 2019.

Se han representado solo los resultados del año 2019 dadas las pequeñas variaciones respecto al 2012 y 2015, suponiendo ligeros aumentos del orden del 2% en el caso de Canarias y del 10% en el caso de Tenerife.

Las gráficas circulares muestran claramente que aproximadamente el 50% de los cultivos corresponden al grupo de *"otros frutales",* por lo que se decide escoger residuos de estos cultivos para llevar a cabo en el trabajo que aquí se presenta.

Además, en la *tabla VII*, se observa que el cultivo del plátano conforma aproximadamente el 90% del total de este grupo de cultivos, por lo que se deduce notoriamente que los residuos de esta fruta serán los que se encuentren en mayor cuantía.

Los residuos procedentes de las chumberas (conjunto de pencas e higos), también formando parte de este grupo de cultivos, se han escogido, por un lado, por la gran superficie que ocupan las plantaciones en Canarias, teniendo pocas posibilidades de aprovechamiento, pero también porque, además, a largo plazo provocan que el terreno donde se cultivan pase a ser no apto para el desarrollo de otras plantaciones. Por otro lado, resultados que se muestran más adelante indican que estos residuos poseen un

contenido elevado en sólidos volátiles, por lo que en principio pueden ser muy adecuados para su estudio en procesos de digestión anaerobia. Por ello si los resultados de este Trabajo de Fin de Grado empleando estos residuos fuesen lo suficientemente buenos se podría justificar la recogida de estos residuos con esa doble finalidad: su valorización energética y evitar que los terrenos en los que hayan estado cultivadas se vuelvan infértiles.

En tercer lugar, las cáscaras de almendras y bellotas fueron también seleccionados para, por un lado, dar salida a estos residuos en aras de contribuir a la sostenibilidad de las islas, y por otro, analizar su posibilidad como vector energético para la producción del gas dado, al igual que el caso de los residuos de higos, poseen alto valor en la fracción de sólidos volátiles respecto a su contenido en sólidos totales.

Los resultados de la cuantificación de los residuos de plátanos en el año 2019 fueron estimados por el grupo de investigación de Catálisis Heterogénea, obteniéndose, aproximadamente, unas 47500 t de este residuo. Esta cifra es suficientemente alta para estudiar el potencial de este residuo desde un punto de vista energético, contribuyendo además a la economía circular del proceso productivo. Este trabajo se enfoca hacia la utilización de mezclas de residuos en la que el plátano es el componente mayoritario pero los demás, como se comenta más adelante, contienen altas fracciones de sólidos volátiles por lo que las mezclas ensayadas pueden conducir a materias de partida excelentes para obtener energías renovables en nuestras islas.

Por otra parte, teniendo en cuenta los datos analizados del sector ganadero que indican alta producción de los purines del ganado vacuno, y a pesar de que, como es bien sabido, estos purines se utilizan para abonar la tierra y para construir los lechos de estos animales, en este trabajo se han empleado purines bovinos y de conejo procedentes de una granja cercana a la facultad

Los resultados de la utilización de estos purines como inóculos en muestras agrarias para la producción y calidad de gas se exponen más adelante. Se comparan con los obtenidos empleando otro inóculo como es el lodo anaerobio de la depuradora de una fábrica alimentaria, concretamente de una industria cervecera en Canarias. Se ha

decidido usar lodos, por su supuesto contenido en metano lo que debería dar lugar a la aparición de bacterias metanogénicas, responsables principalmente de la producción de biogás en procesos de digestión anaerobia a partir de residuos orgánicos.

4.2. Análisis del contenido en las diferentes fracciones de sólidos de los residuos y mezclas de estos.

En el apartado de "*Materiales y métodos"* se describe el procedimiento realizado para la determinación de las fracciones sólidas de los residuos y las mezclas de estos.

En la *Tabla VIII*, se presentan los resultados de los contenidos de los Sólidos Volátiles (SV), Sólidos Fijos (SF), y Sólidos Totales (ST) de distintos residuos individuales, así como de las mezclas de residuos empleados en los experimentos de digestión anaerobia realizados en este trabajo; además, se presentan los resultados que corresponden al denominado digestato, entendiéndose por este, el sólido que queda tras la realización de la digestión. Esta muestra de digestato pertenece al ensayo E6, realizado al final del periodo del trabajo experimental.

No fue posible analizar el resto de digestatos debido, en algunos casos, a la situación de pandemia del COVID - 19 que dificultó el acceso al laboratorio tras los ceses de producción, y en otros, a la dificultad de la separación de la mezcla resultante.

En la *Tabla VIII* se muestra la nomenclatura utilizada para cada residuo.

Como se sabe, la fracción de sólidos volátiles es la parte más susceptible de la materia residual para su trasformación en biogás.

Para la configuración de las mezclas correspondientes a los diferentes experimentos, se ha tenido en cuenta los SV medidos de cada uno de los residuos, de tal manera que la mezcla final tuviese el mayor porcentaje de esta fracción de sólidos posibles. Por ello, debido a su alto porcentaje en SV, se ha escogido los residuos de higos picos (91,02%) y de Almendras y Bellotas (95,91%), siendo estos dos últimos los que mayor porcentaje presentan del conjunto analizado con valores del 91,02 % y 95,91% respectivamente. A continuación, también con porcentajes elevados en SV, se

escogieron los residuos de plátano, con un contenido de SV 75,71 %, y los residuos de pencas, con un 74,60 %.

Tabla VIII. Contenido de las diferentes fracciones de sólidos de cada uno de los residuos y las mezclas de estos.

	SV (%)	SF (%)	ST (%)
RESIDUOS INDIVIDUALES			
Plátano (PL)	75,71	24,29	25,04
Calabacín (C)	77,78	22,22	2,99
Higo pico (H)	91,02	8,98	16,20
Almendras y Bellotas (AB)	95,91	4,09	79,54
Pencas (P)	74,60	25,40	21,00
Manzanas (MZ)	37,01	62,99	18,91
Lechugas (L)	33,49	66,51	72,81
Hojas de parra y vid (PV)	88,42	11,58	75,33
INÓCULOS			
Bosta de vaca (VA)	75,38	24,62	21,12
estiércol de conejo (CO)	89,11	10,89	63,13
Lodo (LO)	27,82	72,18	18,80
MEZCLAS DE RESIDUOS			
Mezcla experimento I (E1)	92,79	7,21	22,00
Mezcla experimento II (E2)	94,24	5,76	21,89
Mezcla experimento III (E3)	90,51	9,49	29,34
Mezcla experimento IV (E4)	95,18	4,82	28,50
Mezcla experimento V (E5)	90,95	9,05	20,04
Mezcla experimento VI (E6)	70,07	29,93	25,41
Digestato (DIG)	66,29	33,71	21,32

No se has escogido los residuos de hojas de parra y vid, ni de calabacín, a pesar de los valores significativos de sus fracciones de SV, debido a la dificultad que supone su obtención en el primer caso, y, en el caso del calabacín, de la baja representación con respecto al total de los residuos.

4.3. Análisis elemental de los residuos y las mezclas de estos.

De forma similar a lo presentado anteriormente en relación al contenido de sólidos de los residuos individuales y las mezclas de los mismos, fueron realizados los análisis elementales de las muestras para determinar sus contenidos de C, H, N y S existentes en las muestras.

Este análisis se realizó solo de los residuos seleccionados para preparar las mezclas de reacción utilizadas para llevar a cabo los experimentos de digestión anaerobia.

Tal y como se comentó en el apartado de *Materiales y Métodos*, dichos análisis se realizaron en las instalaciones del Servicio General de Apoyo a la Investigación (SEGAI). Los resultados obtenidos se muestran en la *Tabla IX.* Son resultados promedios correspondientes a las muestras por duplicado. La nomenclatura de las muestras es la indicada en la *Tabla VIII.*

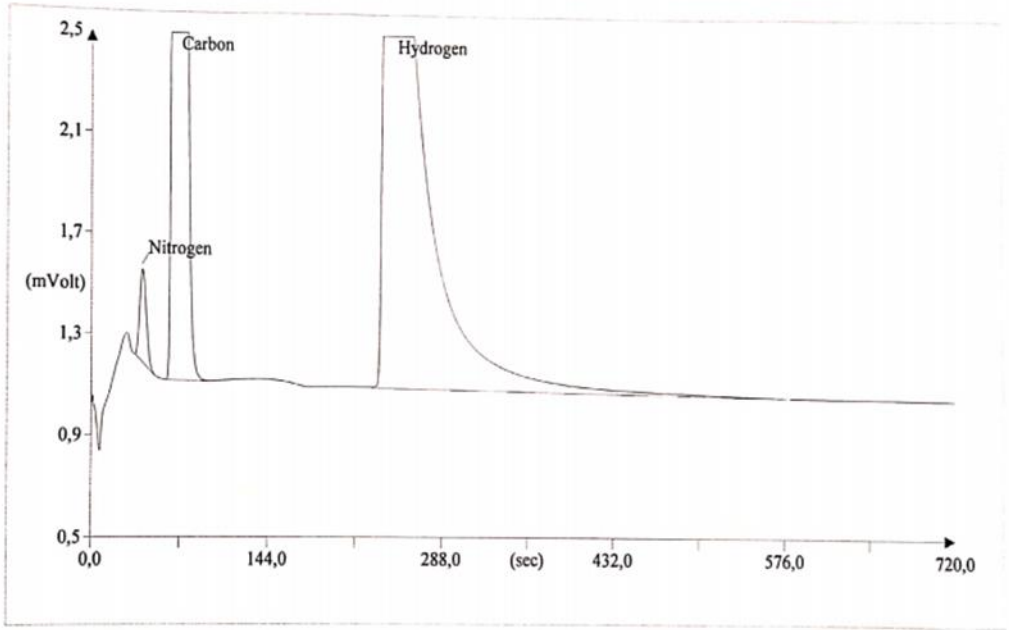
Tabla IX. Análisis Elemental de residuos, mezclas de residuos y digestato correspondiente al experimento VI.

MUESTRA	C	N	H	S	C:N
PL	35,37	1,13	6,71	-	31,44
H	34,79	1,75	5,14	0,29	19,93
AB	52,73	3,13	7,56	-	16,85
P	37,68	1,28	6,26	-	29,43
VA	39,62	2,735	5,46	-	14,48
CO	44,33	1,795	6,55	-	24,7
LO	29,3	2,76	4,06	-	10,62
E1	41,15	1,79	5,86	-	22,99
E2	37,39	1,06	6,56	-	35,27
E4	31,61	2,755	4,41	-	11,47
E5	41,98	1,465	5,2	-	28,66
E6	36	3,04	4,56	-	11,86
DIG	42,82	1,23	5,24	-	36,64

En esta tabla se observa que el residuo de almendras y bellotas es el que presenta un mayor contenido en carbono, mientras que sorprende el lodo empleado, que corresponde con el de menor porcentaje. Por otra parte, conocer la relación C:N es fundamental para establecer las mezclas idóneas desde el punto de vista de su valorización energética, ya que, como se ha dicho anteriormente, el C y el N son los principales nutrientes para que las bacterias correspondientes transformen los residuos en biogás. Lo ideal es que este valor se encuentre en el rango que abarca de 20:1 a 30:1; si este valor es superior, se ralentiza la producción de biogás, prolongándose esta en el tiempo; mientras que si esta relación es menor a 8:1, no habrá actividad bacteriana (Bennardi, 2020). De la tabla anterior se puede observar que, en todos los casos, excepto

los correspondiente a los experimentos *E4* y *E6*, se encuentran por encima de 20:1, y en ningún caso se obtiene resultados que se encuentren por debajo de la relación que provocase la indeseable inhibición de la actividad bacteriana. Sin embargo, se sabe que no es este parámetro el único responsable de la producción de gas durante la digestión anaerobia. Respecto al contenido en S de los residuos de higos, se sospecha que las muestras recogidas de higos pudieran estar cercanas a carreteras donde circulasen vehículos.

El hecho de no aparecer en la *Tabla IX* los resultados del análisis elemental de la mezcla de residuos correspondiente al experimento E3, se debe a la decisión de no analizarla por no haberse producido gas.



Elemento	Tpo retención sec	Area (.1*uV*sec)	K Factor µV*sec/µg	Concentrac %
Nitrogen	42	22935	1992305	1.08
Carbon	69	1757005	4392523	37.38
Hydrogen	247	953666	13619340	6.54

Figura 20. Análisis Elemental de la mezcla de residuos empleada en el experimento E2 con el espectrofotómetro.

A título de ejemplo, en la *Figura 20* se muestra el gráfico obtenido directamente del espectrofotómetro donde se han realizado los análisis elementales de las muestras.

En este caso corresponde a la mezcla de residuos empleada en el experimento E2, donde se puede observar, claramente, los picos correspondientes a los elementos C, H y N.

4.4. Producción del gas obtenido.

Los resultados experimentales correspondientes a la producción de gas, expresados en L/ kg (litros de gas/ kg de residuos alimentados al reactor) de cada uno de los experimentos y al tiempo total de producción, quedan reflejados en la *Tabla X.* En las *Figuras 21 a 24* se muestran estas producciones de gas, P, en el tiempo, t, de cada uno de los experimentos, observándose un comportamiento similar en todos los casos, resultando las típicas curvas sigmoideas esperadas. Puede observarse que la duración de los experimentos abarca un periodo medio que se encuentra entre 20 y 30 días.

Tabla X. Producción total de cada uno de los experimentos realizados

Experimento	Tiempo de producción (días)	Producción de gas (L/kg)
E1	3	4
E2	3	11
E3	Sin producción	-
E4	8	18
E5	Sin producción	-
E6	4	6

Estos resultados experimentales se recogen en las tablas A1 a A6 del ANEXO.

El análisis de estos resultados se puede realizar a partir la *Figura 25*, en la que se han representado conjuntamente todos los datos experimentales. Puede observarse que el periodo máximo de producción, exceptuando el ensayo E4, abarca, alrededor de los tres días. En el caso del E4, la producción de este es superior, y en torno a una semana, aunque este resultado podría deberse a la necesidad de tener más datos en el intervalo de tiempo que abarca entre los 2 y los 8 días, ya que este periodo coincide con un fin de semana largo, en el que no fue posible el acceso al laboratorio.

Las variaciones en las producciones finales de gas se podrían atribuir, entre otras causas, a diferencias de cantidades iniciales de residuos introducidas en el reactor, y por tanto al consumo del sustrato.

Es el caso de los experimentos **E1 y E2** que, como se describe en el apartado de *"Materiales y Métodos"*, estos son iguales, exceptuando la cantidad de materia de partida. En el experimento E2 se triplicó cantidad de materia total inicial de residuos, produciendo en torno a un 150% más de gas que el E1, por lo que, se sospecha que E1 dejó de producir en el momento en el que se consumió toda la materia orgánica o sustrato, susceptible a ser transformado en gas.

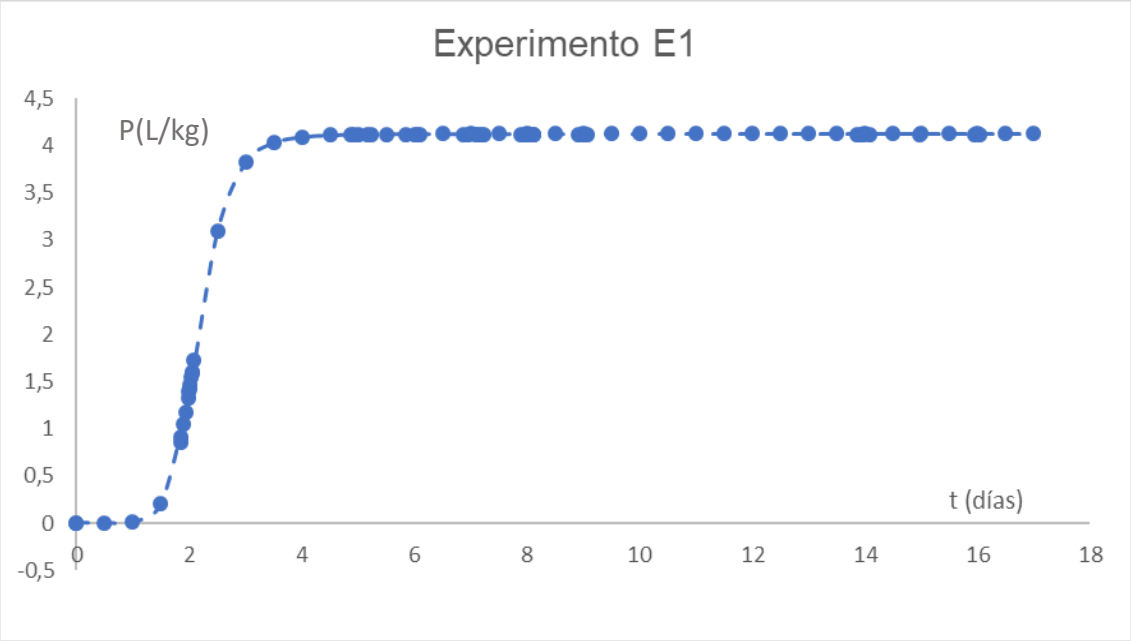


Figura 21. Producción de gas del experimento E1.

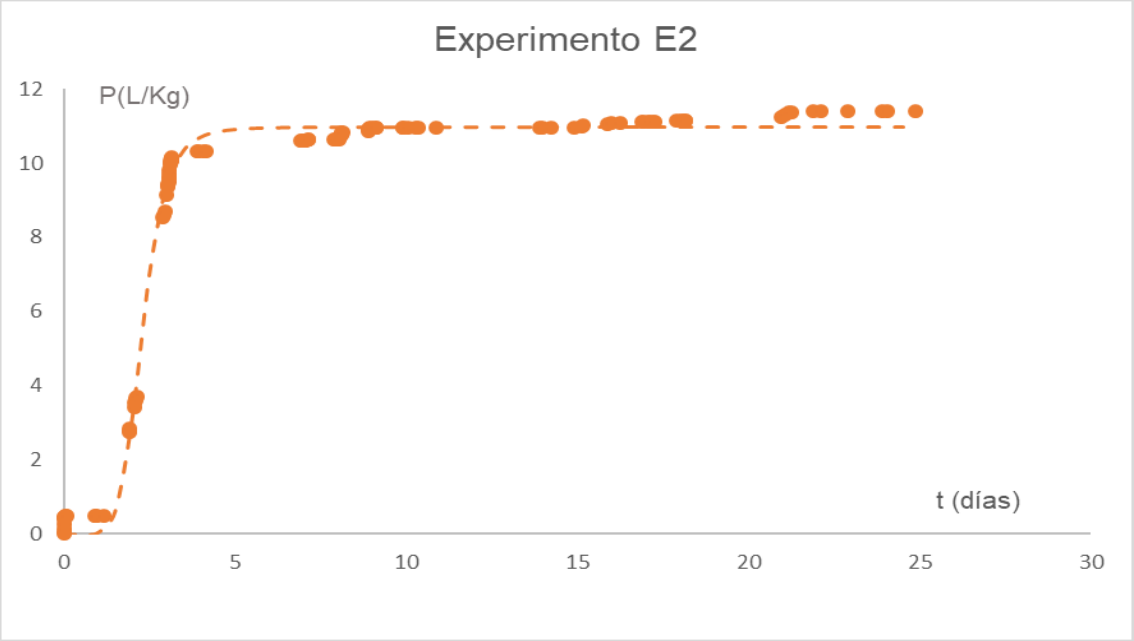


Figura 22. Producción de gas del experimento E2.

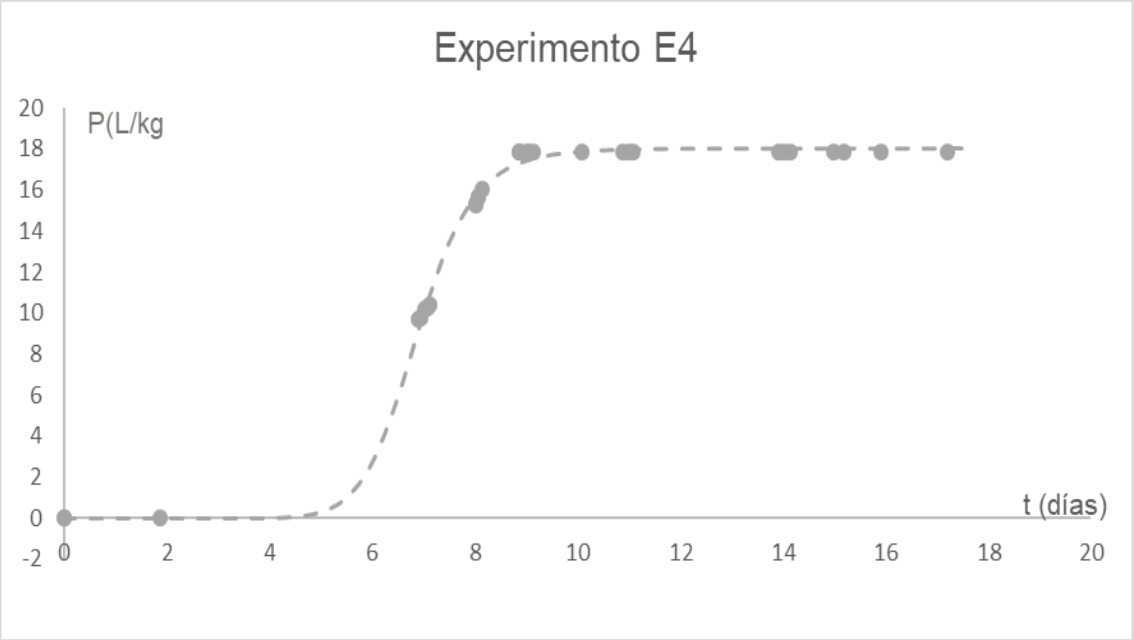


Figura 23. Producción de gas del experimento E4.

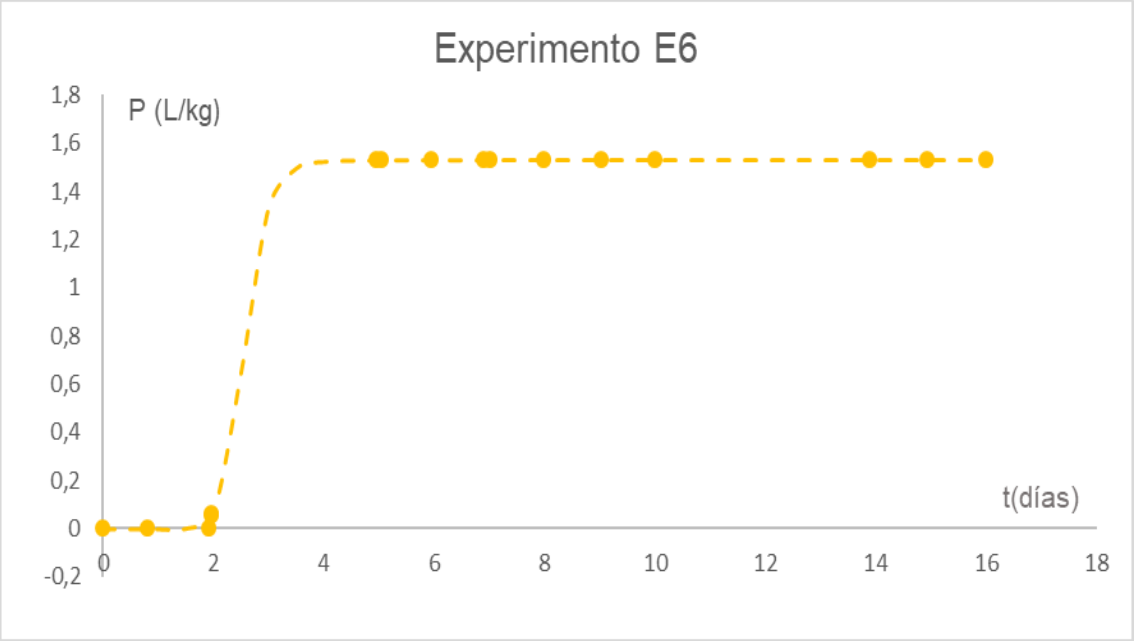


Figura 24. Producción de gas del experimento E6.

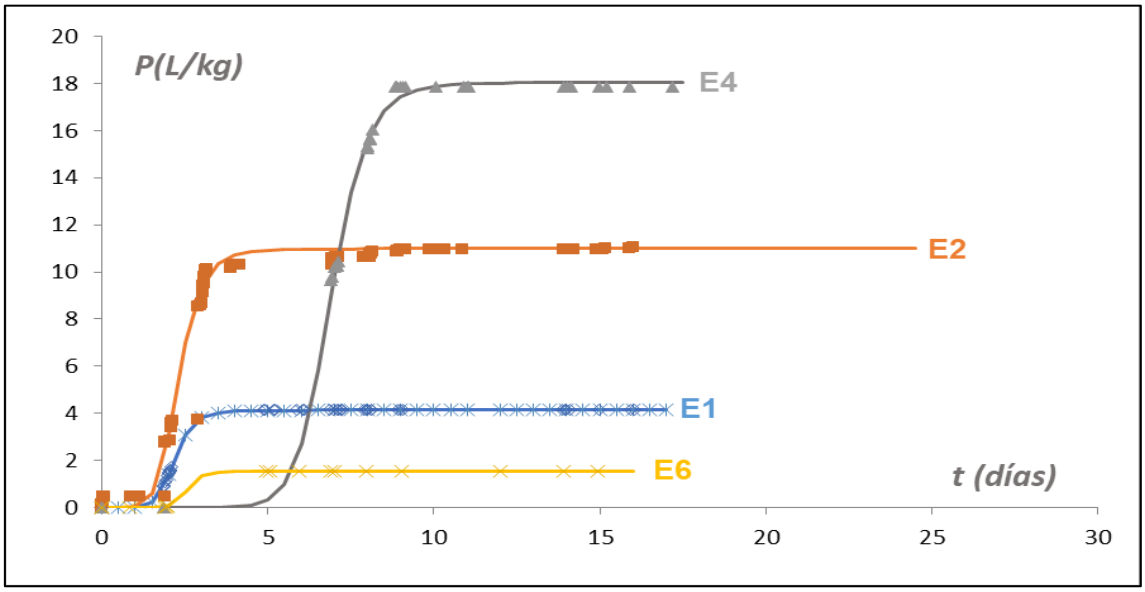


Figura 25. Comparativa de la producción de gas en los diferentes experimentos.

Las diferencias en las producciones de gas observadas de los ensayos **E4 y E6**, realizados prácticamente de igual forma entre sí, se podría explicar, por un lado, por el hecho de que el ensayo E6 no contenía residuos de higos, residuos con alto contenido

en SV, como se comentó anteriormente y del orden del 90%, y, por otro, al hecho de que el pH del sistema en este segundo caso, en todo momento se mantuvo en el valor inferior del rango óptimo para el correcto proceso de digestión anaerobia. El valor de este pH se mantuvo en torno a 6,5.

Por otra parte, el alto valor del contenido en SV del digestato, que se indica en la *Tabla IX* y, que pertenece al ensayo E6, conduce a la necesidad de estudiar desde el punto de vista microbiológico estos sistemas, pues podría ser fundamental la adición de bacterias adecuadas para que pudiera llevarse a cabo de forma eficiente la transformación de los sólidos volátiles en gas.

Aun así, desde el punto de vista medioambiental, este digestato podría ser utilizado como compost atendiendo a la relación C:N, ya que, según datos bibliográficos, para que una muestra sea apta como compost, esta debe encontrarse a razón de 25:1 a 40:1 ; en el caso de la muestra que nos ocupa, este valor es de 36,64, por lo que podría emplearse con este fin y así contribuir a la economía circular de las islas.

En relación con los experimentos **E2 y E4,** que parten aproximadamente de la misma cantidad de residuos totales, podría pensarse que el procedimiento de la preparación de la mezcla de residuos es clave en los resultados finales, dado el aumento de la producción de gas de E4, entorno al 80% superior al E2.

En los experimentos E3 y E5, no se observó producción alguna. En el caso del experimento E3, se comprobó que el pH inicial era relativamente bajo, e igual a 5,81, por lo que se decidió añadir sosa hasta llegar a un valor en torno a 7 unidades de pH, agregándose un total de 29 g de NaOH (lentejas) de forma progresiva hasta alcanzar ese pH neutro. Sorprendió que este valor fue ascendiendo muy lentamente hasta alcanzar valores en torno a 9 unidades de pH, por lo que se atribuyó a este alto valor de pH la anulación de la esperada producción de gas, por intoxicación o muerte de la población bacteriana del sistema. En cuanto al experimento E5, se podría atribuir la falta de producción de gas al cambio en el procedimiento de la puesta en marcha del sistema, dando por hecho que la previa aclimatación de este lodo no garantiza una eficiencia del proceso de digestión anaerobia en las condiciones experimentales de este trabajo.

Se sabe que el correcto desarrollo del proceso de digestión anaerobia por parte de las bacterias responsables implica unas condiciones aproximadas de pH y temperatura, que, como se comenta en el apartado de "*Materiales y Métodos*", son controladas y monitorizadas siempre en este trabajo. En esta línea, el pH debe situarse en un rango entre 6,5 y 8,5; y la temperatura aproximadamente en 31 °C.

Dado que el comportamiento de estos sistemas es similar al obtenido en otros ensayos realizados previamente en otros trabajos en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Química a partir de otros residuos, los resultados experimentales de producción de gas, P (L/kg), en el tiempo, t (días), han sido ajustados a ecuaciones del mismo tipo, dadas por:

$$P = \frac{a}{1+(\frac{t}{b})^c} \qquad [1]$$

Obteniéndose en todos los casos buenos ajustes como demuestran los coeficientes de regresión indicados a continuación para cada uno de los ensayos frente a las ecuaciones correspondientes:

- Experimento E1:

$$P = \frac{4{,}12}{1+\frac{t}{2{,}18}^{-7{,}90}} \qquad R^2 = 0{,}9999$$

- Experimento E2:

$$P = \frac{10{,}98}{1+\frac{t}{2{,}30}^{-6{,}65}} \qquad R^2 = 0{,}9945$$

- Experimento E4:

$$P = \frac{18{,}04}{1+\frac{t}{6{,}89}^{-12{,}58}} \qquad R^2 = 0{,}9971$$

- Experimento E6:

$$P = \frac{1{,}53}{1+\frac{t}{2{,}56}^{-12{,}16}} \qquad R^2 = 0{,}999$$

En la *Figura 26* se muestra la buena concordancia entre los resultados experimentales y simulados mediante las ecuaciones anteriores:

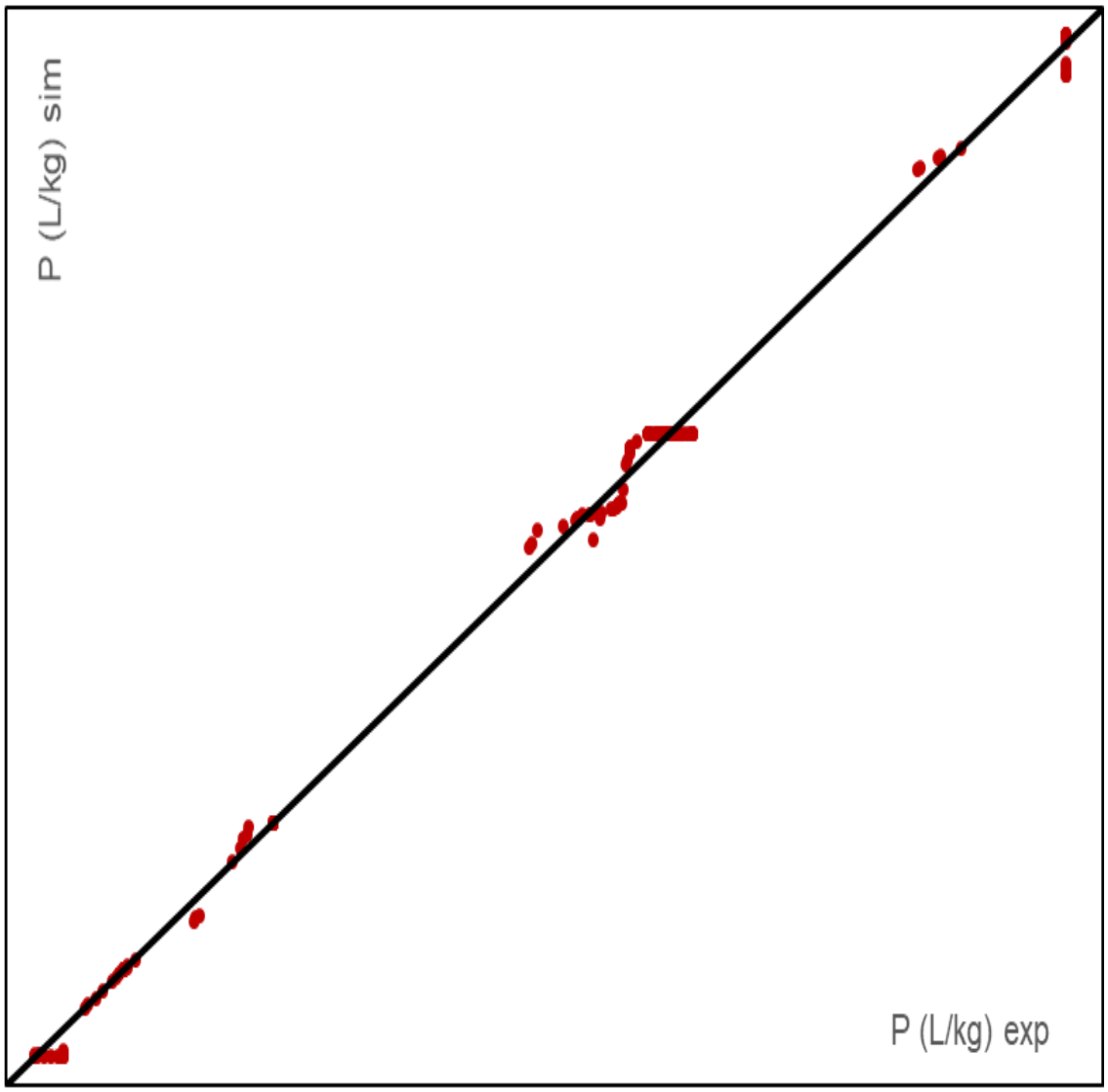


Figura 26. Relación entre los datos experimentales y los datos simulados a partir de las ecuaciones de ajuste.

4.5. Composición del gas obtenido.

La composición del gas se ha determinado mediante cromatografía tal y como se ha descrito en el apartado de *Materiales y Métodos.*

En todos los casos se obtuvo exclusivamente CO_2 (dióxido de carbono). Resultados que podrían atribuirse principalmente a las características biológicas de los inóculos empleados, de manera que la población bacteriana presunta sea, mayoritariamente, bacterias acetogénicas y no metanogénicas, responsable, estas últimas, de la producción del biogás; por lo que sugiere la caracterización del inóculo, no solo químicamente, sino también desde el punto de vista microbiológico.

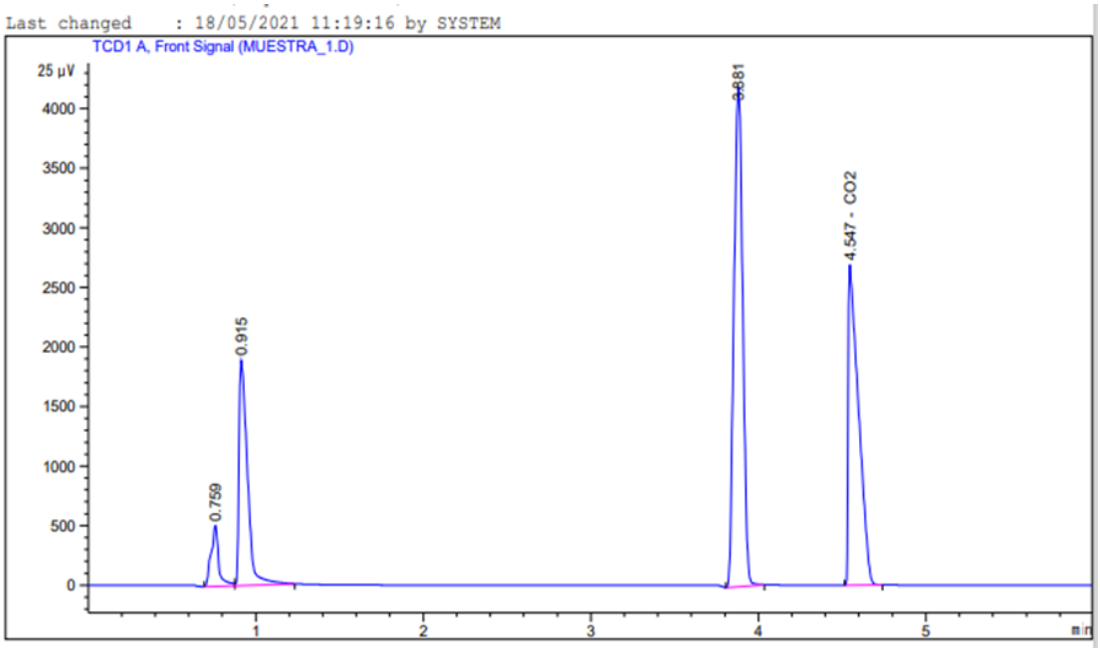


Figura 27. Cromatografía de gases correspondiente al experimento E4.

A título de ejemplo, la *Figura 27* representa los resultados cromatográficos de la muestra recogida el 18 de mayo de 2021 que corresponde al experimento E4, donde puede observarse los cuatro picos correspondientes al Oxígeno, Nitrógeno, Aire y CO_2 atendiendo a sus tiempos de retención.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓNES.

Como resultado de este trabajo se obtienen a las siguientes **conclusiones**:

1. De la cuantificación de residuos del sector ganadero en toda la Comunidad Autónoma de Canarias, en torno al 80% corresponde al ganado vacuno.
2. La cuantificación de plantaciones de cultivos en Canarias prácticamente no ha variado en la última década de este siglo, por lo que, la producción de residuos de estos cultivos puede afirmarse constante en esta última década.
3. En torno al 50% de los cultivos agrícolas de Canarias en general y de Tenerife en particular, son cultivos procedentes del grupo de *otros frutales*, entre los que destacan el plátano, las chumberas y las almendras y bellotas.
4. Los residuos de almendras y bellotas, chumberas y plátanos presentan altos contenidos en SV. Valores entre el 75 y el 95% del contenido de sólidos totales.
5. Respecto a los inóculos utilizados, el purín de conejo presenta también alto contenido en la fracción de Sólidos Volátiles, del orden del 90%. Por el contrario, el lodo utilizado contiene un bajo porcentaje de esta fracción.
6. En las mezclas de residuos que carecen de higos picos, se reduce el contenido en Sólidos volátiles en, aproximadamente, un 30%.
7. En cuanto a la relación C:N, los residuos empleados se encuentran en el intervalo apto para que se haga efectiva la producción de biogás.
8. A partir de los residuos empleados, la producción de gas cesa entre los 3 y los 8 días desde su comienzo.
9. El gas producido a partir de las mezclas de residuos agrarios y ganaderos utilizados en este trabajo se ha compuesto exclusivamente de CO_2, por lo que se concluye que en estos casos la etapa metanogénica no tiene lugar.
10. El digestato resultante, desde el punto de vista de la relación C:N, podría emplearse como compost.
11. El procedimiento de preparación de las mezclas de residuos es fundamental para la producción de gas, de manera que se debe garantizar la homogenización perfecta de los residuos y los productos químicos, factor clave para la producción de gas.

12. El análisis microbiológico de las muestras es importante para conocer previamente la población bacteriana existente.

También se proponen una serie de **recomendaciones**:

1. Modificar el reactor de manera que sea continuo en relación con la entrada de residuos para garantizar que la materia orgánica o sustrato no se agote.
2. Realizar el control del contenido en sólidos de las materias previamente a su introducción en el digestor y una vez finalizada la digestión, para poder dar una buena interpretación a los datos experimentales.
3. Optimizar el proceso de separación del digestato, a partir de operaciones básicas como filtración, centrifugación, etc.

As a result of this work, the following **conclusions** have been reached:

1. Around 80% of the waste from the livestock sector in the Canary Islands corresponds to the cattle sector.
2. The quantification of crop plantations in the Canary Islands has remained practically unchanged over the last decade, so it can be stat+d that the production of crop residues has been constant over the last decade..
3. The crops of other fruit trees represent about 50% of all crops in the Canary Islands. In this group, bananas, prickly pears and almonds and acorns crops stand out.
4. The residues of almonds and acorns, bananas and prickly pears have a high content of Volatile Solids. Its value is between 70 and 90%.
5. In relation to the inoculate used, rabbit slurry has a high content of volatile solids, 90%. In contrast to this, the mud used contains a low percentage in VS.
6. Volatile solids content is reduced by an approximate percentage of 30% in mixtures without pick figs residues.
7. The C:N ratio of the mixtures used is within the correct values for the gas production to become effective.
8. Gas production ends between 3 and 8 days from the beginning with the experimental mixtures.
9. The gas produced from the mixtures of used agricultural and livestock wastes has been composed exclusively of CO2. It is concluded in these results that the methanogenic stage is not happen.
10. The resulting digestate could be used as compost because of its C:N ratio.
11. The method for the preparation of the waste mixtures is essential for the production of gas. Perfect homogenisation of waste and chemicals must be ensured, a procedure which then would appear to make a significant contribution to production.
12. Microbiological analysis of samples is important to know the existing bacterial population.

Some **suggestions** are also proposed:

1. Optimize the digestate separation process from basic separation operations such as filtration, centrifugation, etc.
2. Modifying the reactor to make the waste input continuous.
3. Carry out a control of the analysis of total solids, fixed solids and volatile solids, before introducing the digester and once the digestion is finished, in order to give a good interpretation to the experimental data.

6. BIBLIOGRAFÍA.

Agencia Extremeña de Energía (s.f). (2008). *Los residuos Ganaderos.* Obtenido de www.formatebio.es

APMUN. (2021). *Agencia Canaria de Protección del Medio Rural*. Obtenido de http://www.acapmn.org/

Bennardi, D. O. (2020). *DIGESTIÓN ANAERÓBICA: OBTENCIÓN DE BIOGÁS.*

Biodisol. (21 de mayo de 2021). Obtenido de https://www.biodisol.com/que-es-el-biogas-digestion-anaerobia-caracteristicas-y-usos-del-biogas/

Consejería de Política Territorial y Medioambiente. (s.f.). *Plan Integral de Residuos de Canarias*. Obtenido de https://www.gobiernodecanarias.org/cambioclimatico/que_es_cambio_climatico/huella-carbono/

ElDiario.es. (27 de julio de 2018). Tenerife aspira a cubrir el 40% del consumo energético de la isla a través de las renovables. Las Palmas de Gran Canaria.

ELSEVIER. (2012). Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal biomass waste: Focusing on biogas production and GHG reduction. China.

Europapress. (2021). *Objetivos del desarrollo sostenible*.

Fundación Ecolec (s.f). (s.f.). *Ecolec Fundación*. Obtenido de https://ecolec.es/informacion-y-recursos/tratamiento-de-residuos/

GEVIC. (4 de septiembre de 2021). Ganadería en Canarias. Comunidad Autónoma de Canarias.

Gobierno de Canarias. (4 de noviembre de 2020). "Inagurada en Agüimes la primera planta de produccion de biogás a partir de residuos ganaderos".

Gobierno de Canarias. (2021). *Huella de Carbono.* Obtenido de https://www.gobiernodecanarias.org/cambioclimatico/que_es_cambio_climatico/huella-carbono/

Gorona del Viento. (2021). *Gorona del Viento El Hierro S.A.* Obtenido de www.goronadelviento.es

Instituto Tecnológico de Canarias S.A. (2008). *Energías Renovables y Eficiencia energética.*

International Renewable Energy Agency. (6 de Abril de 2020). *IRENA.* Obtenido de www.irena.org

ISTAC. (2020). *Instituto Canario de Estadística*. Obtenido de www.ISTAC.com

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación . (2020). *Ganadería y Medioambiente*. Obtenido de https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/requisitos-y-condicionantes-de-la-produccion-ganadera/ganaderia-y-medio-ambiente/

Ministerio para la Transición Ecológica y el reto Demográfico. (Octubre de 2020). *Marco estratégico de Energía y Clima. Ruta del Hidróeno.*

Organizacion de las Naciones Unidas (s.f). (2021). *Objetivos del desarrollo Sostenible*. Obtenido de https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible

Parlamento Europeo. (2 de febrero de 2015). *Noticias del Parlamento Europeo*. Obtenido de https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios

Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (Agosto de 2017). Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación.

Rachel Emas, F. I. (2015). *The Concept of Sustainable Development: Definition and Defining.* Obtenido de https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5839GSDR%202015_SD_concept_definiton_rev.pdf

RAE. (20 de julio de 2021). *Real Academia de la lengua Española*. Obtenido de www.rae.es

Salvador, A. (2010). *Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles.*

SEGAI. (2021). *Servicio de Espectrometría de Masas y Análisis elemental.* Obtenido de https://www.ull.es/servicios/segai/servicios/espectrometria-masas-analisis-elem/

7. ANEXOS

EXPERIMENTO I RESIDUOS: PL, PC+H, AB, CO+VA MASA TOTAL: 353g SÓLIDOS TOTALES: 100 g pH inicial: 6,55.

Fecha / hora	Volumen de gas (acum) (mL)	Tiempo (días)	Producción de gas (acum)(l/kg)	pH
2020				
25 noviembre /11:23:00	0	0	0	7,01
27 noviembre /7:37:00	299,92	1,84	0,86	7,02
“ / 8:00:00	319,48	1,86	0,92	7,01
“ / 8:49:00	368,38	1,89	1,06	“
“ / 9:53:00	407,50	1,94	1,17	“
“ / 10:59:00	462,92	1,98	1,33	“
“ / 11:32:00	495,52	2,01	1,42	“
“ / 11:48:00	511,82	2,02	1,47	“
“ / 12:22:00	537,90	2,04	1,54	“
“ / 12:36:00	554,20	2,05	1,59	“
“ / 12:45:00	557,46	2,06	1,60	“
“ / 13:30:00	603,10	2,09	1,73	“
30 noviembre / 8:03:00	1437,66	4,86	4,12	“
“ / 9:11:00	“	4,91	“	“
“ / 15:14:00	“	5,16	“	“
“ / 16:54:00	“	5,23	“	“
01 diciembre / 7:57:00	“	5,86	“	“
“ / 12:24:00	“	6,04	“	“
“ / 13:56:00	“	6,11	“	“
02 diciembre /8:17:00	“	6,87	“	“
“ / 10:16:00	“	6,95	“	“
“ / 13:30:00	“	7,09	“	“
“ / 14:27:00	“	7,13	“	“
“ / 15:42:00	“	7,18	“	“
“ / 16:55:00	“	7,23	“	“
03 diciembre 8:37:00	“	7,88	“	“
“ / 10:25:00	“	7,96	“	“
“ / 10:52:00	“	7,98	“	“
“ / 11:40:00	“	8,01	“	“
“ / 13:57:00	“	8,11	“	“
“ / 14:16:00	“	8,12	“	“
04 diciembre / 9:01:00	“	8,90	“	“
“ / 11:37:00	“	9,01	“	“
“ / 13:04:00	“	9,07	“	“

EXPERIMENTO I (continuación). RESIDUOS: PL, PC+H, AB, CO+VA MASA TOTAL: 353g SÓLIDOS TOTALES: 100 g pH inicial: 6,55.				
Fecha y hora	Volumen de gas (acum) (mL)	Tiempo (días)	Producción de gas (acum)(l/kg)	pH
09 diciembre / 8:12:00	1437,66	13,87	4,12	7,01
“ / 9:55:00	“	13,94	“	“
“ / 10:47:00	“	13,97	“	“
“ / 13:29:00	“	14,09	“	“
10 diciembre / 10:27:00	“	14,96	“	“
11 diciembre / 10:01:00	“	15,94	“	“
“ / 12:20:00	“	16,04	“	“

EXPERIMENTO II RESIDUOS: PL, PC+H, AB, CO+VA MASA TOTAL: 1492g SÓLIDOS TOTALES: 350 g pH inicial: 5,81.				
Fecha / hora	Volumen de gas (acum) (mL)	Tiempo (días)	Producción de gas (acum)(l/kg)	pH
2021				
22 febrero / 10:26:00	0	0,00	0,00	5,81
“ / 10:30:00	19,56	0,00	0,04	“
“ / 10:34:00	65,2	0,01	0,15	“
“ / 10:38:00	120,62	0,01	0,27	“
“ / 10:42:00	179,3	0,01	0,41	“
“ / 10:47:00	198,86	0,01	0,45	5,84
“ / 10:51:00	202,12	0,02	0,46	5,90
“ / 10:57:00	205,38	0,02	0,46	5,97
“ / 11:23:00	211,90	0,04	0,48	6,08
“ / 11:35:00	“	0,05	“	6,21
“ / 12:11:00	“	0,07	“	6,34
23 febrero /7:41:00	“	0,89	“	6,46
“ / 8:51:00	“	0,93	“	6,71
“ / 9:10:00	“	0,95	“	6,79
“ / 14:01:00	“	1,15	“	6,84
24 febrero / 7:55:00	1219,24	1,90	2,76	6,89
“ / 8:09:00	1232,28	1,90	2,79	6,90
“ / 8:17:00	1258,36	1,91	2,85	6,91
“ / 11:24:00	1506,12	2,04	3,41	6,93
“ / 12:13:00	1568,06	2,07	3,55	“
“ / 12:44:00	1594,14	2,10	3,60	6,94
“ / 12:51:00	1623,48	2,10	3,67	“
“ / 13:18:00	1639,78	2,12	3,71	6,96
25 febrero / 7:32:00	3781,60	2,88	8,55	“
“ / 8:04:00	3801,16	2,90	8,60	6,97
“ / 9:39:00	3843,54	2,97	8,69	“
“ / 10:18:00	4048,92	2,99	9,16	“
“ / 11:08:00	4143,46	3,03	9,37	6,99
“ / 11:13:00	4153,24	3,03	9,39	“
“ / 11:21:00	4163,02	3,04	9,41	“
“ / 11:49:00	4195,62	3,06	9,49	7,00
“ / 11:56:00	4238	3,06	9,58	“
“ / 12:00:00	4251,02	3,07	9,61	“
“ / 12:10:00	4299,94	3,07	9,72	7,01
“ / 12:19:00	4335,80	3,08	9,80	“

EXPERIMENTO II (continuación) RESIDUOS: PL, PC+H, AB, CO+VA MASA TOTAL: 1492g SÓLIDOS TOTALES: 350 g pH inicial: 5,81.				
Fecha y hora	Volumen de gas (acum) (mL)	Tiempo (días)	Producción de gas (acum)(l/kg)	pH
25 de febrero/ 12:00:00	4251,02	3,07	9,61	7,01
“ / 12:10:00	4299,94	3,07	9,72	“
“ / 12:19:00	4335,80	3,08	9,80	“
/ 12:48:00	4410,78	3,10	9,97	“
“ / 12:57:00	4427,08	3,10	10,01	“
“ / 13:12:00	4446,64	3,12	10,06	7,03
“ / 13:19:00	4449,90	3,12	10,06	“
“ / 13:26:00	4459,68	3,13	10,08	“
“ / 13:35:00	4462,94	3,13	10,09	“
“ / 13:44:00	4475,98	3,14	10,12	“
“ / 13:57:00	4479,24	3,15	10,13	“
“ / 14:00:00	4489,02	3,15	10,15	“
26 febrero / 7:27:00	4557,48	3,88	10,31	“
“ / 8:18:00	4557,48	3,91	10,31	“
“ / 11:50:00	4557,48	4,06	10,31	“
“ / 13:34:00	4557,78	4,13	10,31	“
01 marzo / 8:26:00	4687,88	6,92	10,60	“
“ / 8:59	4687,88	6,94	10,60	“
“ / 9:35	4691,14	6,96	10,61	“
“ / 11:15	4691,14	7,03	10,61	“
“ / 12:05	4691,14	7,07	10,61	“
“ / 13:17	4697,66	7,12	10,62	“
“ / 13:32	4697,66	7,13	10,62	“
02 marzo / 7:31	4704,18	7,88	10,64	“
“ / 8:41	4707,44	7,93	10,65	“
“ / 11:06	4707,44	8,03	10,65	“
“ / 12:16	4743,30	8,08	10,73	“
“ / 12:24	4753,08	8,08	10,75	“
“ / 12:30	4759,60	8,09	10,76	“
“ / 12:44	4779,16	8,10	10,81	“
“ / 13:12	4795,46	8,12	10,84	“
“ / 13:56	4795,46	8,15	10,84	“
03 marzo / 7:33	4805,24	8,88	10,87	“

EXPERIMENTO II (continuación) RESIDUOS: PL, PC+H, AB, CO+VA MASA TOTAL: 1492g SÓLIDOS TOTALES: 350 g pH inicial: 5,81.				
Fecha y hora	Volumen de gas (acum) (mL)	Tiempo (días)	Producción de gas (acum)(l/kg)	pH
03 marzo / 7:57	4818,28	8,90	10,90	7,03
“ / 8:09	4828,06	8,90	10,92	“
“ / 8:18	4834,58	8,91	10,93	“
“ / 8:37	4841,10	8,92	10,95	“
“ / 10:20	“	9,00	“	“
“ / 13:32	4841,10	9,13	10,95	“
04 marzo / 7:34	“	9,88	“	“
“ / 8:23	“	9,91	“	“
“ / 11:58	4844,36	10,06	10,95	“
“ / 16:38	“	10,26	“	7,01
“ / 18:35	“	10,34	“	“
05 marzo / 7:29	“	10,88	“	“
08 marzo / 7:52	“	13,89	“	“
“ / 9:36	“	13,97	“	“
“ / 15:44	“	14,22	“	“
09 marzo / 7:41	“	14,89	“	“
“ / 13:05	4860,66	15,11	10,99	“
“ / 14:44	4867,18	15,18	11,01	“
10 marzo / 7:44	4893,26	15,89	11,07	“
“ / 10:14	4899,78	15,99	11,08	“
“ / 16:29	“	16,25	“	“
11 marzo / 7:27	4909,56	16,88	11,10	“
“ / 8:05	4912,82	16,90	11,11	“
“ / 11:49	“	17,06	“	“
“ / 13:09	4916,08	17,11	11,12	“
“ / 15:18	4919,34	17,20	11,12	“
“ / 16:28	“	17,25	“	“
12 marzo / 7:30	4929,12	17,88	11,15	“
“ / 10:14	4932,38	17,99	11,15	“
“ / 12:25	“	18,08	“	“
“/ 13:45	“	18,14	“	“
“ / 14:00	“	18,15	“	“
15 marzo / 9:27:00	4964,98	20,96	11,23	“

EXPERIMENTO II (continuación) RESIDUOS: PL, PC+H, AB, CO+VA MASA TOTAL: 1492g SÓLIDOS TOTALES: 350 g pH inicial: 5,81.				
Fecha y hora	Volumen de gas (acum) (mL)	Tiempo (días)	Producción de gas (acum)(l/kg)	pH
15 marzo / 12:11:00	4994,32	21,07	11,29	7,01
“ / 14:09:00	5030,18	21,15	11,37	“
“ / 16:31:00	“	21,25	“	7,00
16 marzo / 7:31:00	5036,70	21,88	11,39	“
“ / 12:42:00	“	22,09	“	“
17 marzo/ 7:30:00	“	22,88	“	“
18 marzo / 8:00:00	“	23,90	“	“
“ / 11:43:00	“	24,05	“	“

EXPERIMENTO III RESIDUOS: PL, PC+H, AB, Lodos MASA TOTAL: 1516 g SÓLIDOS TOTALES: 350 g pH inicial: 6,54				
Fecha y hora	Volumen de gas (acum) (mL)	Tiempo (días)	Producción de gas (acum)(l/kg)	pH
2021				
14 abril / 11:53:00	NO PRODUCE	0,0	NO PRODUCE	6,54
= / 13:25:00		0,1		7,34
15 abril / 7:35:00		0,8		7,41
16 abril / 7:47:00		1,8		7,39
19 abril / 7:46:00		4,8		7,29
“ / 10:44:00		66,0		7,04
“ / 14:55:00		66,1		7,01
20 abril / 12:00:00		6,0		“
“ / 13:05:00		6,1		7,01
“ / 17:00:00		6,2		7,00
21 abril / 7:21:00		6,8		7,01
“ / 7:56:00		6,8		“
“ / 10:39:00		6,9		“
“ / 14:20:00		7,1		“

EXPERIMENTO IV. RESIDUOS: PL, PC+H, AB, Lodos MASA TOTAL: 1516 g SÓLIDOS TOTALES: 350 g pH inicial: 5,66.				
Fecha y hora	Volumen de gas (acum) (mL)	Tiempo (días)	Producción de gas (acum)(l/kg)	pH
2021				
10 mayo / 11:05:00	0,00	0,00	0,00	6,24
“ / 11:10:00	“	0,01	“	7,67
12 mayo / 7:40:00	“	1,86	“	7,56
17 mayo / 8:44:00	3977,20	6,91	9,67	7,54
“ / 9:49:00	4022,84	6,95	9,78	“
“ / 11:22:00	4192,36	7,02	10,19	7,30
“ / 12:39:00	4211,92	7,07	10,24	“
“ / 12:52:00	4218,44	7,08	10,26	“
“ / 13:59:00	4286,90	7,12	10,42	“
18 mayo / 11:10:00	6282,02	8,01	15,27	“
“ / 11:23:00	6304,84	8,02	15,33	“
“ / 12:38:00	6435,24	8,07	15,64	“
“ / 12:48:00	6454,80	8,07	15,69	“
“ / 14:13:00	6591,72	8,13	16,02	“
19 mayo / 7:38:00	7344,78	8,86	17,86	“
“/ 8:04:00	“	8,88	“	“
“ / 11:04:00	“	9,00	“	“
“ / 12:41:00	7348,04	9,07	17,86	“
“ / 14:12:00	“	9,13	“	“
20 mayo / 17:34:00	“	8,86	“	“
= / 12:42:00	“	10,07	“	“
21 mayo / 8:08:00	“	10,88	“	“
= / 11:12:00	“	11,01	“	“
= / 12:35:00	“	11,07	“	“
24 mayo / 9:15:00	“	13,93	“	“
= / 11:30:00	“	14,02	“	“
= / 14:18:00	“	14,14	“	“
25 mayo / 10:24:00	“	14,97	“	“
= / 15:42:00	“	15,20	“	“
26 mayo / 8:54:00	“	15,91	“	“
27 mayo / 15:40:00	“	17,19	“	“

EXPERIMENTO V. RESIDUOS: PL, PC+H, AB, Lodos MASA TOTAL: 1265 g SÓLIDOS TOTALES: 350 g pH inicial: 5,98.				
Fecha y hora	Volumen de gas (acum) (mL)	Tiempo (días)	Producción de gas (acum)(l/kg)	pH
10 junio / 9:00:00	NO PRODUCE	0,00	NO PRODUCE	6,56
"/ 9:25:00		0,02		"
" / 10:00:00		0,04		6,57
" / 12:25:00		0,14		"
" / 13:01:00		0,17		6,56
11 junio / 10:05:00		1,05		6,57
12 junio / 11:35:00		2,11		"
14 junio / 12:37:00		4,15		"
15 junio / 9:34:00		5,02		6,54
17 junio / 10:09:00		7,05		"

EXPERIMENTO VI. RESIDUOS: PL, PC+H, AB, Lodos MASA TOTAL: 1516 g SÓLIDOS TOTALES: 350 g pH inicial: 5,87.				
Fecha y hora	Volumen de gas (acum) (mL)	Tiempo (días)	Producción de gas (acum)(l/kg)	pH
2021				
30 junio /12:00:00	0	0,00	0,00	6,10
01 julio / 7:28:00	0	0,81	0,00	"
02 julio / 9:49:00	0	1,91	0,00	"
" / 10:47:00	78,24	1,95	0,06	"
" / 11:06:00	81,50	1,96	0,06	6,11
05 julio / 10:40:00	2024,46	4,94	1,53	"
" / 13:07:00	"	5,05	"	"
06 julio / 10:33:00	"	5,94	"	"
07 julio / 9:21:00	"	6,89	"	6,13
" / 12:12:00	"	7,01	"	6,16
08 julio / 11:17:00	"	7,97	"	6,17
09 julio / 12:36:00	"	9,03	"	6,18
14/ julio / 9:26:00	"	13,89	"	6,20
15 julio / 10:09:00	"	14,92	"	"
16 julio / 11:41:00	"	15,99	"	6,21