



**Universidad  
de La Laguna**

***TRABAJO DE FIN DE GRADO***

**“Aprovechamiento energético de  
lactosueros de queserías y los residuos de  
otras industrias alimentarias”**

**Autor:**

José Iván Martín Herrera

**Tutoras:**

Dra. Karina Rodríguez Espinoza

Dra. M<sup>a</sup> Teresa García Rodríguez

**Tutor externo:**

D. José Antonio Sellés Ors

*Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Tecnología*

*Grado en Ingeniería Química Industrial*

*Septiembre 2018*



# ÍNDICE

RESUMEN/ABSTRACT.....	3
1.- INTRODUCCIÓN.....	7
1.1- Problemática energética y ambiental.....	7
1.2- Residuos como fuente de energía.....	9
1.2.1- Residuos de la industria alimentaria en Canarias.....	10
1.2.1.1- Residuos de la industria láctea.....	11
1.2.1.2- Residuos de la industria del pan.....	12
1.2.1.3- Residuos de lodos de depuradora.....	13
1.3- Biocombustibles.....	14
1.3.1- Clasificación de los biocombustibles.....	15
1.3.2- Ventajas e inconvenientes del uso de biocombustibles.....	16
1.4- Digestión anaerobia.....	18
1.4.1- Biogás.....	19
1.4.2- Pretratamientos de la digestión anaerobia.....	20
1.4.3- Etapas de la digestión anaerobia.....	21
1.4.4- Variables de control.....	23
1.4.5- Post-tratamiento del biogás producido.....	27
1.4.6- Posibles alternativas para el CO <sub>2</sub> producido.....	29
2.- OBJETIVOS.....	33
3.- MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
3.1- Materias primas utilizadas.....	37
3.2- Productos químicos empleados.....	37
3.3- Material y equipos de laboratorio.....	38

3.4- Digestión y co-digestión anaerobia.....	38
3.4.1- Instalación experimental.....	39
3.4.2- Preparación del biodigestor.....	41
3.4.3- Determinación del volumen de biogás producido.....	42
3.4.4- Análisis del biogás producido.....	43
3.4.5- Reactivación del pH.....	44
3.5- Caracterización de los residuos y el inóculo antes y después de la digestión....	45
3.5.1- Procedimiento experimental.....	45
3.5.2- Determinación de los Sólidos Totales, Fijos y Volátiles.....	46
4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
4.1- Cuantificación de residuos en Canarias.....	49
4.1.1- Residuos de la industria láctea (lactosuero).....	50
4.1.2- Residuos de la industria del pan.....	51
4.1.3.- Residuos del trigo (salvado).....	51
4.1.4.- Lodos de depuradora (inóculo).....	51
4.2- Caracterización de los sólidos totales (ST), fijos (SF) y volátiles (SV) antes de la digestión anaerobia.....	52
4.3- Valorización de residuos.....	54
4.3.1- Influencia del tipo de residuo en la producción de biogás.....	55
4.3.1.1.- Estudio previo a la restitución del pH.....	56
4.3.1.2.- Producción de biogás con restitución del pH.....	59
4.3.2.- Influencia del tipo de residuo en la composición del biogás.....	63
4.3.3.- Influencia del inóculo en la producción de biogás.....	64
4.3.3.1.- Estudio previo a la restitución del pH.....	65
4.3.3.2.- Producción de biogás con restitución del p H.....	68

4.3.4.- Influencia del inóculo en la composición del biogás.....	71
4.4- Caracterización de los sólidos totales, fijos y volátiles después de la digestión.....	72
5.- CONCLUSIONES.....	75
6.- BIBLIOGRAFIA.....	81
ANEXOS.....	83
Anexo A.....	85
Anexo B.....	87
Anexo C.....	93



---

*RESUMEN/ ABSTRACT*

---





## Resumen:

El presente trabajo de investigación se sitúa dentro del marco de las energías renovables, concretamente en la producción de biocombustibles a partir de residuos provenientes de la industria alimentaria, el cual es uno de los principales sectores de la economía mundial.

Dentro de la industria alimentaria, este trabajo se centra en la industria tanto láctea como de la harina y pan, las cuales generan, grandes cantidades de lactosuero como subproducto del proceso de elaboración del queso, así como restos de pan y salvado. No obstante, su vertido de forma incontrolada puede ocasionar graves problemas de contaminación y, por tanto, un fuerte impacto ambiental.

Por tanto, en este trabajo se realiza un estudio sobre la posible valorización química de residuos (lactosuero, restos de pan y salvado) en la obtención de biogás con el fin de aprovechar las cantidades generadas de ellos anualmente en Canarias.

Para ello, se realizó un estudio previo de cuantificación, y posteriormente de producción de biogás a partir de la digestión anaerobia de los residuos solos y de mezclas con un inóculo (lodo de depuradora) con el fin de analizar la influencia de dicho inóculo tanto en la producción como la composición del biogás obtenido.

En todos los ensayos realizados se obtuvo producción de biogás, siendo el Salvado el residuo que generó mayor producción final de gas, que podría destinarse como materia prima para la obtención de BioDME.

## Abstract:

The present research work is within the framework of renewable energies, specifically in the production of biofuels from food industry waste, which is one of the main sectors of the world economy.

Within the food industry, this work focuses on the dairy, flour and bread industries as, which produce large quantities of whey as a by-product of the cheese making process, as well as bread and bran remains. However, its uncontrolled dumping can cause serious pollution problems and, therefore, a strong environmental impact.

Therefore, this work focuses on a study on the possible chemical valorization of the wastes (whey, bread and bran remains), obtaining biogas in order to take advantage of the quantities generated each year in the Canary Islands.

With that aim, a study was carried out to analyze the quantification and subsequent production of biogas from the anaerobic digestion of each waste alone and mixtures with an inoculum (sewage sludge) in order to analyze the influence of the inoculum on both the production and the composition of the biogas obtained.

In all the experiments biogas production was achieved, being the bran the residue that generated the highest final gas production that could be used as raw material for obtaining BioDME.

---

# *1.- INTRODUCCIÓN*

---



Hoy en día, los combustibles fósiles producen cada año aproximadamente el 80% de la energía utilizada. No obstante, con el incremento de la población mundial, el uso masivo de tecnologías y el aumento de la producción industrial, comenzó a crecer la preocupación por el agotamiento de las reservas de petróleo y el deterioro ambiental. Es por ello por lo que se impulsó el desarrollo de energías alternativas basadas en recursos naturales renovables y menos contaminantes, surgiendo de este modo los denominados biocombustibles.

### 1.1- Problemática energética y ambiental:

Las energías no renovables han sido durante muchos años el motor de combustión del planeta, siendo el petróleo la principal fuente de energía utilizada en la sociedad. Sin embargo, este tipo de energía al no ser una energía limpia genera una cantidad de gases contaminantes, principalmente el CO<sub>2</sub>, en la atmósfera, ocasionando el calentamiento global y el efecto invernadero, además de ser una energía no renovable. Por lo tanto, es de vital importancia invertir en energías limpias de fuentes inagotables que logren eliminar la dependencia de esta energía no convencional en la sociedad actual y cuidar el medio ambiente.

A continuación, se muestra en la Tabla 1.1 el consumo energético en España en el año 2010.

**Tabla 1.1.-** Consumo energético en España 2010

Consumo de energía en España (2010)	%
Carbón	6,4
Petróleo	47,4
Gas natural	23,6
Nuclear	11,7
Energías renovables	11,4
Hidráulica	2,7
Eólica	2,8
Biomasa	4,0
Biocarburantes	1,2
Geotérmica	0,0
Solar	0,7

(Fuente:[http://canaltic.com/blog/html/exe/energias/consumo\\_energetico.html](http://canaltic.com/blog/html/exe/energias/consumo_energetico.html))

De esta tabla se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La mayor parte de la energía consumida procede del petróleo (casi el 50%), lo que demuestra que existe una gran dependencia de este. Pero además España carece de yacimientos y tiene que importar de otros países gran parte del petróleo consumido.
- Las fuentes de energías fósiles (petróleo, carbón y gas natural) han producido más del 77% de la energía consumida.
- Las energías renovables aportan el 11,4 % de la energía total consumida, casi lo mismo que la aportada por la energía nuclear. No obstante, cabe destacar que este porcentaje de energías renovables va en aumento con el paso de los años.

El incontrolable crecimiento de la población mundial conlleva a una demanda de recursos cada vez mayor, viéndose esto reflejado en el aumento de la producción de gases de efecto invernadero, tal y como se observa en la Tabla 1.2:

**Tabla 1.2.-** Producciones de CO<sub>2</sub> generados entre los años 1970 y 2007

Emisiones de CO <sub>2</sub> en el mundo procedentes de combustibles fósiles (1990-2007)						
Descripción	1990	1995	2000	2005	2007	% Cambio 1990-2007
CO <sub>2</sub> en millones de toneladas	20.980	21.810	23.497	27.147	28.962	38,0 %
Población mundial en millones	5.259	5.675	6.072	6.382	6.535	25,7 %
CO <sub>2</sub> per cápita en toneladas	3,99	3,84	3,87	4,2	4,38	9,8 %

(Fuente: Agencia Internacional de la Energía)

De esta tabla se puede deducir que en poco menos de 20 años la producción de CO<sub>2</sub> se ha incrementado en un 38%, resultado acorde con el aumento de población (26%) producido en dicho intervalo de tiempo.

El cambio climático está alterando el planeta y los humanos contribuimos diariamente a incrementarlo. En los últimos 100 años la temperatura media global del planeta ha aumentado 0,7 °C, siendo desde 1975 el incremento de temperatura por década de unos 0,15 °C. En lo que resta de siglo, según el IPCC (Grupo Intergubernamental sobre Cambio Climático), la temperatura media mundial aumentará en 2-3 °C.

Por todo esto, unido a la escasez de yacimientos de petróleo (cada vez mayor), se incentiva la búsqueda de nuevas fuentes de energía con las que poder sustituir en un futuro a las convencionales (petróleo, carbón, gas natural y combustibles fósiles).

## 1.2.- Residuos como fuente de energía

En la actualidad, se producen diariamente grandes cantidades de desechos, tanto en las ciudades como en las zonas rurales. La mayor parte de estos residuos son de carácter orgánico, constituyendo la denominada biomasa residual, la cual puede ser aprovechada para distintos fines energéticos. Sin embargo, no todos los residuos pueden ser aprovechados para estos fines.

Por tanto, a la hora de buscar una oportunidad de aprovechamiento de los residuos se necesita llevar a cabo su caracterización con el objetivo de conocer su composición, la calidad de sus componentes y la cantidad que se genera. Esto permite definir las tecnologías más apropiadas para su aprovechamiento y posterior tratamiento.

Los combustibles generados a partir de la biomasa presentan la mayor parte de las características favorables de los combustibles fósiles y además, proporcionan ciertas ventajas ambientales (Jarabo, F., 1999):

- Alto contenido energético por unidad de volumen.
- Facilidad de transporte y almacenamiento.
- Buena combustión.
- Escaso contenido en azufre.
- No forma escorias en su combustión.
- Bajo contenido en cenizas.
- Contribuyen a mejorar la calidad del ambiente y reducir el riesgo de enfermedades pulmonares.

Con el paso de los años, se han establecido algunos criterios de selección de residuos para fines biotecnológicos (Saval S., 2012):

- a) El componente principal del residuo se debe poder utilizar como sustrato para la producción fermentativa de insumos de procesos industriales, o bien, el material

- debe poder someterse a extracciones para recuperar alguno de sus componentes que tenga un mercado demandante.
- b) Disponibilidad local del residuo y en las cantidades necesarias para asegurar la fabricación de un producto de interés.
  - c) No presentar otras aplicaciones o usos que compitan con el proceso que se pretende promover.
  - d) No requerir pretratamiento, o en tal caso, que éste sea sencillo y económico.
  - e) Disponibilidad del residuo de tal forma que permita planificar el proceso para el cual se va a utilizar.
  - f) Ser estable, es decir, que no se descomponga fácilmente bajo las condiciones ambientales del sitio donde se genera.

### **1.2.1- Residuos de la industria alimentaria en Canarias**

La gestión de los residuos procedentes de la agricultura y ganadería en Canarias presenta aún grandes lagunas tanto a nivel legal como práctico. Los agricultores y ganaderos se encuentran en una posición delicada a la hora de asumir la responsabilidad en cuanto a la gestión de los restos y residuos que genera su actividad, entre otros motivos por la falta de información, la complejidad de la gestión en función del tipo de residuo, los elevados costes de gestión, los difíciles acuerdos con los gestores encargados de recoger los residuos. (Dupuis I., 2008).

Esta cuestión, se traduce numerosas veces, en el abandono de los residuos en cualquier lugar, y en el vertido de los líquidos en el medio o al alcantarillado, con los consiguientes impactos ambientales negativos, llegando a suponer incluso graves problemas de sanidad (plagas y enfermedades).

En los últimos años, se observa que el sector de la transformación muestra globalmente una mayor organización de los residuos. Ciertos empaquetados de frutas y hortalizas, y queserías de tamaño medio y grande entregan gran parte de los restos generados en la fase de transformación, ya sea para el consumo de animales o a un gestor autorizado para su vertido controlado. Además, una parte reducida de los residuos orgánicos se emplean para compost, siendo éste un fenómeno mucho más reciente en Canarias y con cierto desarrollo sobre todo en las islas de Tenerife y La Palma (Dupuis I., 2015), siempre y cuando cumplan con los siguientes requisitos legales sobre restos y residuos:



1. Certificar que los restos están autorizados para la alimentación animal.
2. Identificar su consideración en el marco de la normativa de residuos o de la de subproductos de origen animal no destinados a consumo humano.
3. Garantizar que los restos o productos que deriven de alguna transformación no contengan residuos de plaguicidas en cantidades superiores a los límites máximos establecidos.

En definitiva, estos residuos han de ser bien gestionados, quedando prohibidos el abandono, vertido y eliminación incontrolada de los mismos, incluso la quema, excepto la de restos vegetales siempre y cuando la gestión esté controlada. Los poseedores de residuos están obligados, siempre que no procedan a gestionarlos por sí mismos, a entregarlos a un gestor de residuos, para su valorización o eliminación, o a participar en un acuerdo voluntario o convenio de colaboración que comprenda estas operaciones. En la Tabla 1.3 se muestran los principales restos o residuos que pueden ser valorizados.

**Tabla 1.3.-** Principales restos o residuos a valorizar

Subsector /proceso	Restos
<b>Viñedo</b>	- Sarmientos - Restos del prensado
<b>Platanera</b>	- Plátano de destrío
<b>Tomate</b>	- Deshoje de las plantas - Rastrojo de las tomateras (matas) - Tomate de destrío
<b>Otras hortalizas</b>	- Deshoje de las plantas - Rastrojo de cultivos - Hortalizas de destrío
<b>Parques y jardines</b>	- Restos orgánicos de las podas
<b>Panaderías industriales</b>	- Masa del pan cruda
<b>Queserías</b>	- Sueros de quesería

(Fuente: Dupuis I., 2015)

### 1.2.1.1- Residuos de la industria láctea

En Canarias, una parte muy significativa del queso producido se elabora en pequeñas explotaciones, que no disponen de sistemas de tratamiento ni de otras alternativas que permitan dar una salida correcta al residuo generado.

Aunque no sea un destino correcto desde el punto de vista legal, muchas explotaciones evacuan el líquido a través del sistema de saneamiento. Las que no están conectadas al alcantarillado lo vierten al barranco sin tener en cuenta los posibles impactos ambientales que puedan ocasionar. Además, las queserías de tamaño medio, que procesan la leche de varias explotaciones, no suelen estar lo suficientemente equipadas para su tratamiento por lo que el producto resultante aún contiene elementos contaminantes para el medio.

Parte de las queserías, industriales o no, añaden sal a la leche, con lo que el producto resultante podría no ser reutilizable en fresco sin una extracción previa de las sales. Sin embargo, una campaña de promoción realizada en Gran Canaria incentivó a los ganaderos a llevar a cabo un cambio en el proceso de salazón, realizándolo a posteriori del proceso de elaboración del queso en lugar de aportar la sal a la leche fresca.

El suero tiene muchas aplicaciones agrícolas, aunque este uso aun es escaso en Canarias, excepto en Gran Canaria ya que a través del programa COAG (Coordinadora de Organizaciones de Agricultores y Ganaderos), se estima que se reutilizan unos 2.600 m<sup>3</sup> al año para este fin (Dupuis I., 2015).

#### **1.2.1.2- Residuos de la industria del pan**

Las panaderías, en especial las industriales, generan varios tipos de residuos:

- Masa de pan residual
- Pan precocido defectuoso
- Pan cocido defectuoso
- Cortes de pan cocido
- Preparados para la elaboración de pan

Dicho residuo se genera en el proceso de elaboración del pan, antes de su cocción. Se trata de un material poco putrescible, aunque se acidifica con rapidez, especialmente en zonas y periodos calientes, por lo que el consumo de estos restos por animales no parece oportuno sin cocción previa.

La mayor parte de estos residuos de destina a contenedores de basura urbana, o se elimina en vertederos a través de un gestor autorizado. No obstante, de forma marginal se han realizado pruebas de compostaje en el sur de Tenerife (Dupuis I., 2015).

### 1.2.1.3- Residuos de lodos de depuradora

Se trata de residuos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Estos lodos se caracterizan por ser líquidos, aunque su composición es variable dependiendo de la carga orgánica del agua residual inicial, así como de las técnicas de tratamiento llevadas a cabo para lograr su estabilización y minimizar su impacto en el medio ambiente.

La aplicación del principio de jerarquía de residuos a la gestión de los lodos de EDAR supone, en primer lugar, priorizar la aplicación al suelo, en segundo lugar, emplear otras formas de valorización incluyendo la energética y, como última opción, la eliminación en vertedero.

El marco legal que regula la aplicación de los lodos de depuradoras a los suelos agrícolas determina valores límite de metales pesados que no deben sobrepasarse y obliga a tratar los mismos por vía biológica, química o térmica. (Irañeta J., et al., 2013)

A continuación, se presentan en las Tabla 1.4 y 1.5 los valores límites de metales pesados permitidos tanto en los suelos como en los lodos, expresados en ppm.

**Tabla 1.4.-** Valor límite de concentración de metales pesados en los suelos (mg/kg ms – ppm)

	Valores límite	
	pH < 7	pH > 7
Cadmio	1	3
Cobre	50	210
Níquel	30	112
Plomo	50	300
Zinc	150	450
Mercurio	1	1,5
Cromo	100	150

**Tabla 1.5.-** Valor límite de concentración de metales pesados en los lodos (mg/Kg ms – ppm)

	Valores límite	
	pH < 7	pH > 7
Cadmio	20	40
Cobre	1.000	1.750
Níquel	300	400
Plomo	750	1.200
Zinc	2.500	4.000
Mercurio	16	25
Cromo	1.000	1.500

### 1.3- Biocombustibles:

A diferencia de los combustibles fósiles, provenientes de la materia orgánica acumulada durante largos períodos de tiempo, los biocombustibles se obtienen de una fuente renovable, la biomasa.

La biomasa es la materia orgánica que constituye todos los seres vivos, sus productos y desechos. Se trata por tanto de una fuente de energía renovable ya que su formación no conlleva miles de años, de forma que la tasa de utilización no es mucho mayor a la de su formación.

En gran parte del mundo, tanto el carbón como la leña (que se obtiene a partir de la madera) sigue siendo el principal biocombustible empleado para la cocina, la calefacción y la luz. Esta fuente de energía es un recurso renovable si se obtiene a partir de bosques convenientemente reforestados. No obstante, al igual que el petróleo, estas fuentes de energía tradicionales conllevan un alto índice de contaminación, que junto con el progresivo agotamiento de estos recursos suponen para la sociedad un serio problema tanto energético como ambiental.

Según la naturaleza de la biomasa, y el tipo de combustible deseado, se pueden utilizar diferentes métodos para obtener biocombustibles: mecánicos (astillado, trituración, compactación), termoquímicos (combustión, pirólisis y gasificación), biotecnológicos (fermentación y digestión microbiana anaeróbica) y extractivos, como se observa en la Tabla 1.6. (Lede S., 2012)

Tabla 1.6.- Procesos de obtención de biocombustibles

	Procesos de obtención de biocombustibles					
	Mecánicos	Termoquímicos		Biotecnológicos		Extractivos
Técnicas	Astillado Trituración Compactación	Pirolisis	Gasificación	Fermentación	Digestión anaerobia	Extracción físico-química
Productos	Leñas Astillas Briquetas Aserrín	Carbón Aceites	Gas de gasógeno	Etanol Varios	Biogás	Aceites Ésteres Hidrocarburos
Aplicaciones	Calefacción Electricidad	Calefacción Electricidad Transporte Industria química	Calefacción Electricidad Transporte Industria química	Transporte Industria química	Calefacción Electricidad	Transporte Industria química

(Fuente: ArgenBio)

### 1.3.1- Clasificación de los biocombustibles:

Existen diferentes tipos de biocombustibles (sólidos, líquidos y gaseosos) los cuales se clasifican en función de las materias primas y la tecnología empleada para producirlos (Álvarez, C., 2009). Es por ello, que esta clasificación se realiza según generaciones:

- Primera generación:

Parte de las materias primas empleadas son de origen agrícola, los cuales tienen un alto contenido de almidón, azúcares y aceites. Claros ejemplos de estas materias son: granos de maíz, jugo de la remolacha o betabel, jugo de caña de azúcar, aceite de semilla de girasol, aceite de soya, aceite de palma, aceite de coco, aceite de maní o cacahuete, etc.

Por otro lado, también se emplean desperdicios sólidos orgánicos, grasas animales, aceites de desechos procedentes de la cocción y fabricación de alimentos.

De este modo se obtiene etanol, metanol y n-butanol mediante la fermentación de los azúcares; biodiesel a partir de la transesterificación de los aceites; y biogás a través de la digestión anaerobia de los desechos orgánicos.

- Segunda generación:

Los insumos son residuos agrícolas y forestales formados principalmente por celulosa, como, por ejemplo: paja de trigo, bagazo de la caña de azúcar, rastrojo de maíz (tallos, hojas y olote), aserrín, etc.

Los procesos de producción presentan un grado de complejidad mayor que los de primera generación, destacando sobre todo la sacarificación-fermentación y el proceso Fischer-Tropsch, el cual consiste en la gasificación del carbón y de la materia lignocelulósica de la biomasa para poder llevar a cabo la síntesis de etanol. Mediante los procesos de segunda generación se produce etanol, metanol, biodiesel, gas de síntesis (monóxido de carbono e hidrógeno), DMF (2,5-dimetilfurano), etc.

- Tercera generación:

Esta generación destaca por los llamados “cultivos energéticos” Se trata de materias vegetales no alimenticias de crecimiento rápido y con una elevada densidad energética almacenada en sus componentes químicos, como, por ejemplo: algas verdes y verdeazules, pastos perennes, etc.

Aunque los procesos de obtención de biocombustibles se encuentran en fase de desarrollo, se ha conseguido fabricar biodiesel y etanol a nivel planta piloto.

- Cuarta generación:

Los biocombustibles son elaborados mediante bacterias genéticamente modificadas, las cuales emplean dióxido de carbono o alguna otra fuente de carbono para la obtención de dichos biocombustibles.

A diferencia de las generaciones anteriores, la bacteria es la que efectúa la totalidad del proceso de producción de los biocombustibles.

Actualmente esta generación de biocombustibles se encuentra en fase teórica, ya que sólo se conoce la posible ruta de síntesis del etanol a partir de dióxido de carbono.

### **1.3.2- Ventajas e inconvenientes del uso de biocombustibles:**

El uso de biocombustible conlleva una serie de ventajas e inconvenientes.

1. Ventajas:

- a) Reduce las emisiones de los gases de efecto invernadero y por tanto la consecuente atenuación del calentamiento global.
- b) Reduce los excedentes agrícolas.
- c) Mejora la competitividad al no tener que importar fuentes de energía tradicionales.

- d) Mejor uso de las tierras con escaso valor agrícola.
  - e) Proporciona una fuente de energía reciclable (inagotable).
  - f) Genera empleo y se revitalizan las economías rurales.
2. Inconvenientes:
- a) El costo que supone la producción de estos biocombustibles dobla prácticamente al del de la gasolina o gasóleo incluso sin aplicar impuestos. Es por ello por lo que necesitan de ayudas públicas para ser relativamente competitivos.
  - b) Aumento de monocultivos intensivos, con el consecuente uso de herbicidas y pesticidas.
  - c) Del total de la plantación solo se consigue aproximadamente un 7% de combustible, por lo que se requieren grandes espacios de cultivo. Por ejemplo, en España, para poder abastecer solo la demanda interna de combustible habría que cultivar un tercio de todo el territorio.
  - d) El uso de estos biocombustibles se limita a un tipo de motor de bajo rendimiento y escasa potencia.
  - e) La obtención del combustible requiere de una transformación previa compleja. Además, en los bioalcoholes, la destilación produce una mayor emisión en dióxido de carbono comparado con la gasolina o el gasóleo.

El coste, sin sumar los impuestos, de la gasolina y el gasóleo ronda los 0,46 €/litro y 0,50 €/litro respectivamente. En España, según un estudio del IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), producir biocombustibles tiene un coste final alrededor de 0,63 €/litro para el bioetanol a partir de cereales y de 0,74 €/litro para el biodiésel a partir de aceite de girasol. No obstante, este valor puede ser ligeramente inferior en el caso de emplear aceites vegetales usados u otros cultivos energéticos de mayor rendimiento en lugar de aceite de girasol.

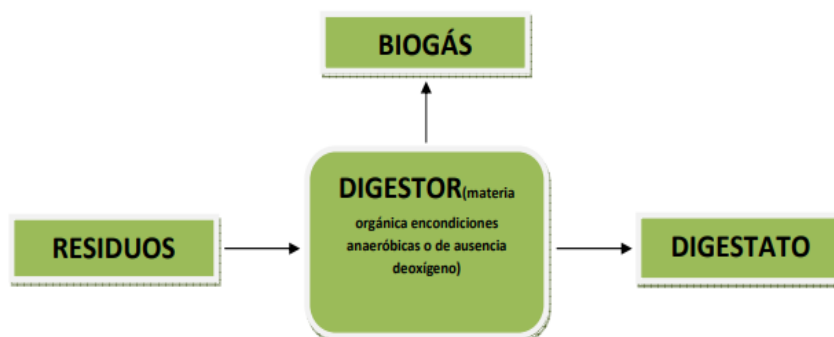
Los biocombustibles se encuentran en un estado de desarrollo tecnológico aún muy joven, por lo que se espera que, a corto y medio plazo, se produzca una reducción significativa de los costes de producción gracias a la optimización de los cultivos energéticos y de los procesos de transformación, o del desarrollo de nuevas aplicaciones para la valorización de los subproductos generados (García M., García P., 2016).

## 1.4.- Digestión anaerobia:

Entre los biocombustibles el biogás puede ser producido a partir de digestión anaerobia de desechos orgánicos.

La digestión anaerobia consiste en la descomposición de material biodegradable en ausencia de oxígeno para dar como resultado los siguientes productos: biogás que es una mezcla de gases (fundamentalmente metano y dióxido de carbono) utilizado en diferentes fines como fuente de energía; y también, un digestato o residuo orgánico (lodo estabilizado) que puede ser utilizado como fertilizante en suelos agrícolas (Figura 1.1).

Esta tecnología utiliza reactores (digestores) cerrados donde se controlan los parámetros para favorecer el proceso de fermentación anaeróbica, un proceso muy conocido ya que también se produce de un modo natural y espontáneo en diversos ámbitos, como por ejemplo en pantanos, en yacimientos subterráneos o incluso en el estómago de los animales.



**Figura 1.1-** Esquema general de la digestión anaerobia

Esta digestión Anaerobia se caracteriza por un conjunto de reacciones asociadas al metabolismo de numerosos microorganismos, que son los intermediarios necesarios para transformar la materia orgánica compleja en sustratos simples fermentables por las bacterias metanogénica.



### 1.4.1- Biogás:

El metano no es el único gas que se produce en la degradación de la materia orgánica en condiciones anaerobias. Se trata de una mezcla de gases conocida como biogás compuesto aproximadamente por un 60% de metano (CH<sub>4</sub>), un 38% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y trazas de otros gases (Tabla 1.7). La composición o riqueza del biogás depende del sustrato digerido y del funcionamiento del proceso. (Agrowaste, 2012)

**Tabla 1.7-** Composición del Biogás

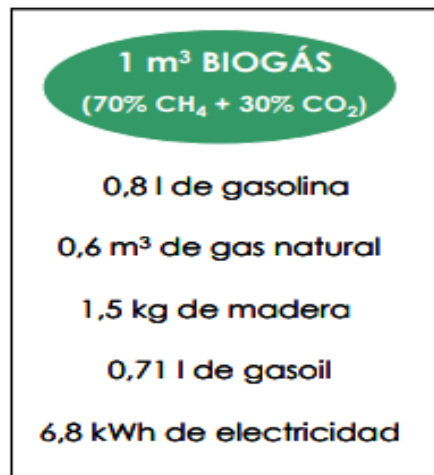
Compuesto	Concentración
Metano (CH <sub>4</sub> ) (%)	50 - 70
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) (%)	30 - 50
Hidrogeno (H <sub>2</sub> ) (%)	1- 10
Nitrógeno (N <sub>2</sub> ) (%)	< 3
Oxígeno (O <sub>2</sub> ) (%)	< 0.1
Ácido Sulfhídrico (H <sub>2</sub> S) (ppm)	0 - 8000

Las principales fuentes de biogás son los residuos ganaderos y agroindustriales, los lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas (EDAR<sub>s</sub>) y la fracción orgánica de los residuos domésticos.

La co-digestión anaerobia permite aprovechar la complementariedad de la composición de los residuos para hacer procesos más eficientes. Además, unifica su gestión al compartir instalaciones de tratamiento, reduciendo costes de inversión y operación. (Ainia, 2011).

Dado que el CH<sub>4</sub> tiene un potencial de calentamiento global 21 veces superior al CO<sub>2</sub>, el aprovechamiento apropiado del biogás tiene un gran potencial para contribuir a reducir emisiones de gases de efecto invernadero.

El biogás es la única energía renovable que puede usarse para cualquiera de las grandes aplicaciones energéticas: eléctrica, térmica o como carburante. En la Figura 1.2 se muestran las equivalencias de Biogás con otros combustibles.



**Figura 1.2-** Equivalencias de Biogás y otros combustibles

(Fuente: CIEMAT)

#### 1.4.2- Pretratamientos de la digestión anaerobia:

El objetivo fundamental es aumentar la biodegradabilidad de los sustratos a digerir anaeróbicamente, lo que permite aumentar la producción de biogás y disminuir el tiempo de residencia. Estos dos efectos influyen de forma directa sobre el balance económico de la planta de biogás. Algunos pretratamientos permiten además obtener una mayor calidad higiénica en el digestato reduciendo riesgos para la salud (Pascual et al., 2011).

Las tecnologías de pretratamiento se pueden clasificar en mecánicas, térmicas, químicas y biológicas:

- 1) Pretratamientos mecánicos: Se trata principalmente de reducir el tamaño de partícula, aumentando así la superficie específica del material, lo que permite obtener una mayor solubilización de la materia orgánica y una mayor biodisponibilidad de esta. Las tecnologías disponibles incluyen la maceración, trituración, homogeneización a alta presión, etc.
- 2) Pretratamientos térmicos: Por una parte, permite facilitar la degradación de algunas macromoléculas y solubilizar la materia orgánica (aumento de la biodisponibilidad); y, por otra parte, dependiendo de la temperatura y el tiempo, higienizar la materia orgánica para reducir o eliminar microorganismos indeseables.
- 3) Pretratamientos químicos: Al igual que en el caso de los tratamientos térmicos, el objetivo de los tratamientos químicos es romper las macromoléculas poco

biodegradables mediante la adición de compuestos químicos tales como ácidos o bases fuertes, o mediante otros métodos como la ozonización. Los pretratamientos químicos también pueden tener otros objetivos, como el ajuste de pH en el caso de sustratos ácidos, o el aumento de la capacidad tampón.

- 4) Pretratamientos biológicos: Permite la degradación de determinados compuestos mediante la inoculación con bacterias específicas o la adición de enzimas. El ensilado se considera también un pretratamiento biológico, y su objetivo principal se basa en la conservación del material, ya que normalmente se aplica a sustratos vegetales que se cosechan una o dos veces al año. En algunos casos se consigue también un aumento de la productividad de biogás, puesto que en el proceso de ensilado se produce una hidrólisis de las macromoléculas.

#### **1.4.3- Etapas de la digestión anaerobia:**

La digestión anaerobia es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar, como por la cantidad de grupo de bacterias involucradas en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea (Palau C V., 2012).

El proceso de degradación de la materia orgánica se divide en cuatro etapas:

- a) Hidrólisis.
- b) Etapa fermentativa o acidogénica.
- c) Etapa acetogénica.
- d) Etapa metanogénica.

En la siguiente figura se muestra un esquema de las etapas del proceso de digestión anaerobia y a continuación se desarrollan cada una de ellas.

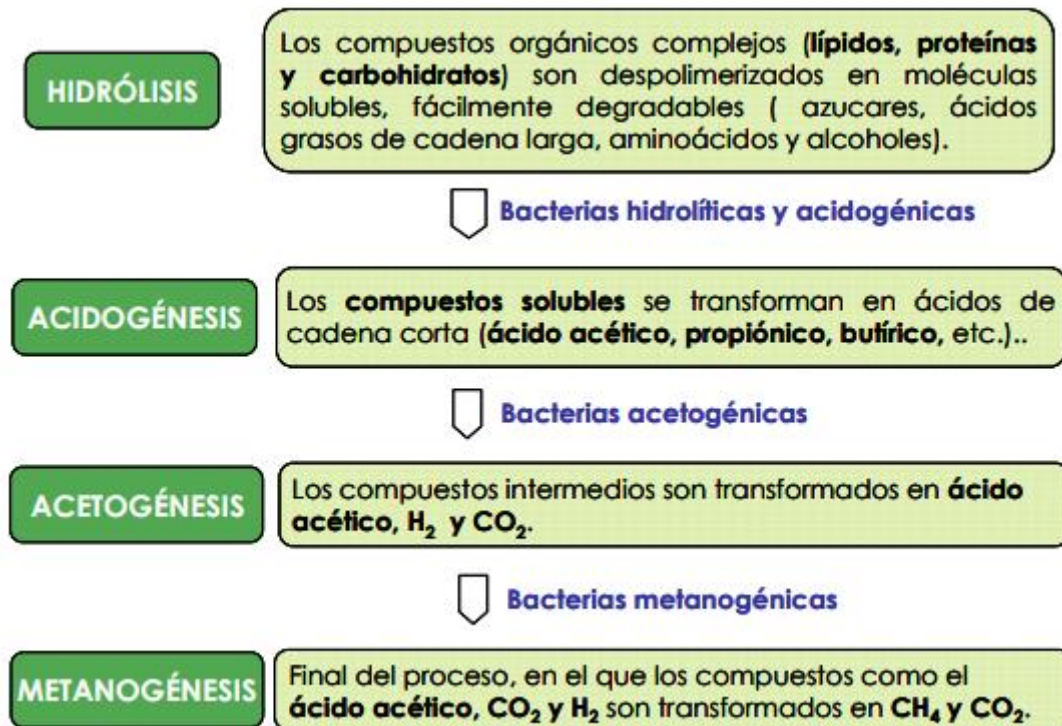


Figura 1.3.- Etapas del proceso de digestión anaerobia.

A. Etapa de hidrólisis:

La hidrólisis consiste en una transformación controlada por enzimas extracelulares en la que las moléculas orgánicas complejas y no disueltas se rompen en compuestos susceptibles de emplearse como fuente de materia y energía para las células de los microorganismos.

B. Etapa acidogénica:

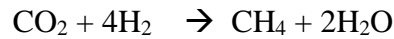
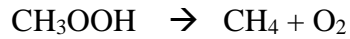
La segunda etapa, controlada por bacterias, consiste en la transformación de los compuestos formados en la primera etapa en otros compuestos de peso molecular intermedio; como dióxido de carbono, hidrógeno, ácidos y alcoholes alifáticos, metilamina, amoníaco y sulfhídrico. Esta etapa se denomina acidogénesis.

C. Etapa acetogénica:

En la etapa de acetogénesis, los ácidos y alcoholes que provienen de la acidogénesis se van transformando por la acción de bacterias en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.

#### D. Etapa metanogénica:

La metanogénesis, última etapa, consiste en la transformación bacteriana del ácido acético y del ácido fórmico en dióxido de carbono y metano y la formación de metano a partir de dióxido de carbono e hidrógeno.



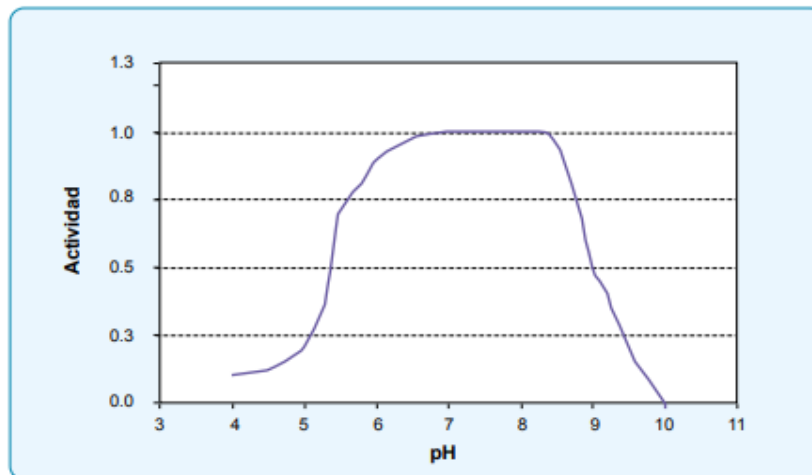
En este proceso actúan bacterias anaeróbicas estrictas, diferenciándose dos tipos de microorganismos: los que degradan el ácido acético a metano y dióxido de carbono (bacterias metanogénicas acetoclásticas); y los que reducen el dióxido de carbono con hidrógeno a metano y agua (bacterias metanogénicas hidrogenófilas).

La principal vía de producción de metano se corresponde con la transformación del ácido acético, llegando a ser alrededor del 70% del metano producido. Este es un proceso lento y constituye la etapa limitante del proceso de degradación anaeróbica.

#### 1.4.4- Variables de control:

- Los **parámetros ambientales**, que hacen referencia a las condiciones que deben mantenerse o asegurarse para el desarrollo del proceso, se describen a continuación:
  1. **pH:** debe mantenerse cercano a la neutralidad. Se trata de un parámetro fundamental para el desarrollo de la máxima actividad por los microorganismos que se identifican en cada una de las fases:
    - ✓ microorganismos hidrolíticos pH entre 7,2 y 7,4
    - ✓ microorganismos acetogénicos pH entre 7 y 7,2
    - ✓ microorganismos metanogénicos pH entre 6,5 y 7,5

En la Figura 1.4 se muestra la dependencia de la actividad metanogénica con el pH.



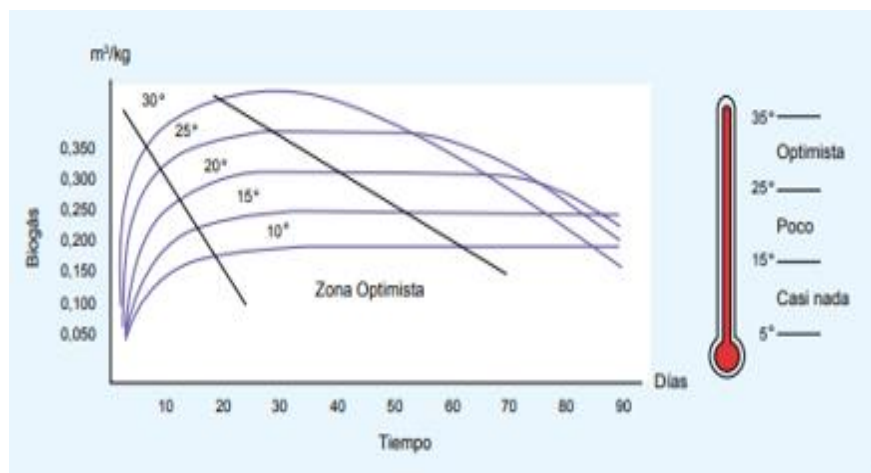
**Figura 1.4.-** Dependencia del pH en la actividad metanogénica

(Fuente: Manual de Biogás, 2011)

2. Alcalinidad: permite asegurar la capacidad tampón y evitar por tanto la acidificación. Se recomienda una alcalinidad entre 2 y 3  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  con el fin de alcanzar una correcta regulación.
3. Potencial redox: debe mantenerse entre -220 mV y -350 mV con el fin de asegurar un ambiente fuertemente reductor que las bacterias metanogénicas necesitan para conseguir su óptima actividad.
4. Nutrientes: con valores que aseguren el crecimiento de los microorganismos. Los elementos más importantes a tener en cuenta son: nitrógeno, carbono y fósforo. La relación C/N se recomienda que sea 30/1, ya que valores inferiores disminuyen la velocidad de reacción. Mientras que la relación C/P debe de ser igual 150/1, aunque valores inferiores no van a crear problemas de inhibición
5. Tóxicos e inhibidores: el proceso de digestión anaeróbica es inhibido por la presencia de sustancias tóxicas en el sistema, tales como amoníaco, metales pesados, compuestos halogenados, cianuro y fenoles. Estas sustancias pueden formar parte de las materias primas que entran al digestor o pueden ser subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos anaeróbicos.

➤ Los **parámetros operacionales**: que hacen referencia a las condiciones de trabajo de los reactores son los siguientes:

1. **Temperatura**: la velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que, a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás. No obstante, las variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden provocar la desestabilización del proceso. Por ello, para garantizar una temperatura homogénea en el digestor, es imprescindible un sistema adecuado de agitación y un controlador de temperatura. En la siguiente figura se muestra como varía la producción de biogás en función del tiempo y la temperatura.



**Figura 1.5.-** Producción de biogás en función de la temperatura

(Fuente: Varnero, 1991)

A efectos de tratamiento de la biomasa, existen tres rangos de temperatura con producción de biogás en diferentes grados de eficiencia:

- *Psicrofílico*: Para temperaturas inferiores a 25°C, en donde el máximo rendimiento se logra a esta temperatura. Con temperaturas inferiores a 15°C la velocidad del proceso obtiene rendimientos bajos.
- *Mesofílico*: Para un intervalo de temperaturas entre los 25 y 45°C, con un óptimo entre los 35 y 37°C para la producción de biogás. Actualmente, el proceso mesofílico es el más utilizado para la digestión anaerobia.

- *Termofílico*: Para un intervalo entre los 45 - 65°C con un óptimo productivo alrededor de los 60°C. El proceso es mucho más rápido, pero por el contrario presenta un balance energético más desfavorable y aumentan los problemas de control del digestor.

Una técnica interesante es la combinación de dos fases de digestión, una primera termofílica de elevada carga orgánica y una segunda mesofílica con menor carga. De este modo se aprovechan las ventajas del sistema termofílico y, además, se reducen los problemas de inestabilidad.

2. Agitación / mezclado: Por diferentes razones es necesario mantener un grado de agitación en el medio en el que se está dando la digestión anaerobia:

- El mezclado consigue un homogenizado del sustrato de alimentación con el sustrato en digestión.
- Se alcanza una distribución uniforme del calor para mantener una isoterma correcta.
- Se evita la formación de espumas y la sedimentación.
- Se favorece la transferencia de gases que pueden formar burbujas en el sustrato.

Se distinguen 3 tipos de agitación:

- *Mecánica*: a través de agitadores manuales o con motores eléctricos.
- *Hidráulica*: a través de bombas de flujo lento que hace recircular la biomasa.
- *Burbujeo de biogás*: para ello se recircula el biogás producido al fondo del biodigestor mediante cañerías, para producir burbujeo y por tanto el movimiento de la biomasa.

3. Tamaño de partícula: Durante la digestión anaerobia de un residuo sólido, la velocidad de solubilización de la materia orgánica va a estar íntimamente relacionada con la granulometría del residuo.

4. Tiempo de retención: es el cociente entre el volumen del digestor y el caudal de alimentación, es decir, el tiempo medio de permanencia del influente en el reactor.



5. Carga orgánica volumétrica: es la cantidad de materia orgánica introducida diariamente en el digestor, expresada normalmente en sólidos volátiles, por unidad de volumen y tiempo.

#### **1.4.5- Post-tratamiento del biogás producido:**

La concentración de los distintos gases presentes en el biogás producido depende factores como: la composición de las materias primas, las condiciones de descomposición, el tiempo de retención hidráulica en el biodigestor, etc. No obstante, conviene obtener una concentración de gas metano superior al 95% ya que de esta manera aumenta su poder calorífico. Para ello se lleva a cabo la remoción de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, vapor de agua, nitrógeno y oxígeno del biogás.

En el caso de su utilización para generación de electricidad, el elemento más perjudicial es el H<sub>2</sub>S, debido al elevado poder de corrosión que presenta, pudiendo dañar y disminuir la vida útil de motores, convertidores y distintas maquinarias que intervienen en la producción, transferencia y suministro de energía eléctrica (Varnero et al., 2011)

En definitiva, la purificación del biogás es importante por dos razones principales:

- (1) aumentar el poder calorífico del biogás
- (2) cumplir los requerimientos de algunas aplicaciones de gas (motores, calderas, celdas de combustible, vehículos, etc.)

A continuación, se presentan los siguientes procesos de purificación:

○ Remoción del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>):

El CO<sub>2</sub> puede removerse del biogás mediante procesos de absorción o adsorción. Otros procesos disponibles son las separaciones por membrana y criogénicas.

Para eliminar el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S del biogás se puede utilizar un lavado a presión contracorriente con agua. Para la remoción de CO<sub>2</sub>, se recomienda trabajar con pH alcalino a baja temperatura y presión alta. El uso de soluciones de Ca(OH)<sub>2</sub> pueden remover completamente el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S. Estos gases son más solubles en algunos solventes orgánicos tales como polietilenglicol, que no disuelven el metano. No obstante, cabe destacar que el uso de solventes orgánicos resulta menos económico que los sistemas de lavado con agua.

La adsorción de CO<sub>2</sub> sobre sólidos, tales como carbón activado o tamices moleculares también se considera factible, aunque requiere mayor temperatura y presión, por lo que puede resultar poco efectivo económicamente hablando.

Por otro lado, la separación criogénica es otro proceso posible, debido a que, a 1 atm, el metano y el CO<sub>2</sub> presentan puntos de ebullición diferentes. Sin embargo, este proceso requiere de altas inversiones iniciales.

○ Remoción de agua:

Al momento de salir del digestor, generalmente, el biogás se satura con vapor. El biogás debe tener una humedad relativa inferior a 60% para prevenir la formación de condensado en las tuberías de transporte, el cual, en combinación con otras impurezas puede corroer las paredes de las tuberías. Frecuentemente, el biogás debe ser secado antes de ser purificado. El biogás puede secarse por compresión y/o enfriamiento del gas; adsorción en carbón activado o sílica gel; o absorción, principalmente en soluciones de glicol y sales higroscópicas.

○ Remoción del sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S):

El sulfuro de hidrógeno en combinación con el vapor de agua en el biogás crudo puede formar ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) el cual es muy corrosivo para los motores y sus componentes. Además, a concentraciones por encima de 100 ppm en volumen, el H<sub>2</sub>S es también muy tóxico.

Para remover el H<sub>2</sub>S, se puede utilizar el carbón activado, el cual actúa como catalizador convirtiendo el H<sub>2</sub>S en azufre elemental (S). Otra forma de lavar el sulfuro de hidrógeno es usando soluciones de NaOH, agua o sales de hierro. Otro proceso simple y barato consiste en dosificar una corriente de biogás con O<sub>2</sub>, el cual oxida el H<sub>2</sub>S a azufre elemental. La dosificación con oxígeno puede reducir el contenido en el biogás de H<sub>2</sub>S a niveles por debajo de 50 ppm; sin embargo, esta dosificación puede presentar riesgos de explosión, por lo que se debe efectuar con precaución.

Por último, el óxido de hierro también remueve el H<sub>2</sub>S transformándolo en sulfuro de hierro. Sin embargo, este método puede ser sensible en presencia de un alto contenido de vapor de agua en el biogás.

- Remoción de oxígeno:

El oxígeno se puede eliminar mediante procedimientos de desulfuración. Además, los procesos de adsorción con carbón activado o tamices moleculares también son aplicables.

- Remoción del amonio:

El amoníaco se forma a valores de pH altos a partir del amonio. Por lo tanto, la formación de amoníaco se puede evitar mediante una operación adecuada de la planta. No obstante, la eliminación del amoníaco se debe combinar con otros procedimientos de purificación del biogás.

#### **1.4.6- Posibles alternativas para el CO<sub>2</sub> producido:**

Hoy en día existen múltiples usos del CO<sub>2</sub>, aunque se trata de un porcentaje marginal (que sigue creciendo) con respecto a las emisiones mundiales de 25.000 millones de toneladas al año de este gas.

Según un estudio de la Plataforma Tecnológica Española del CO<sub>2</sub>, en 2020 podría empezar a desarrollarse masivamente la captura, transporte y almacenamiento de CO<sub>2</sub> en España, generándose 250.000 empleos (188.000 de captura, 36.500 de transporte y 23.500 de almacenaje) e inversiones de 23.000 millones de euros (16.600 en captura, 3.900 en el transporte y 2.400 en el almacenamiento).

La responsable de I+D de Carburos Metálicos, directora de Matgas y coordinadora del monográfico, Lourdes Vega, destaca la importancia del CO<sub>2</sub> como un recurso del que no se debe ver solo su vertiente negativa como gas de efecto invernadero. (ecoticias/ecoinventos, 2014).

El CO<sub>2</sub> tiene multitud de usos:

- Sustitutivos de otros compuestos más perjudiciales para el medio ambiente, como el cloro y la acetona, que se utiliza para la limpieza textil.
- Apagar incendios. El CO<sub>2</sub> se emplea en extintores de incendios ya que no es combustible, no reacciona químicamente con otras sustancias, permite ser comprimido, no conduce electricidad y no deja ningún tipo de residuo.
- Extraer petróleo en las fases finales de los yacimientos.
- Tratar aguas.
- Enfriar componentes electrónicos.
- Envasar ensaladas y carnes en atmósferas protectoras.

- Extraer cafeína del café.
- Crear nuevos materiales como el carbonato de calcio precipitado, que sirve para blanquear papel.
- Fabricar cemento más sostenible. El 5% de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> se debe a la producción de cemento. Por ello la existencia de algunos proyectos que pretenden desarrollar nuevos cementos que incorporen CO<sub>2</sub> en forma de carbonato precipitado por la acción de bacterias.
- Aturdir animales antes del sacrificio. La inhalación del gas deja insensibles a los animales sin dejar rastros de residuos en la carne.
- Sintetizar aspirinas. El ácido salicílico se obtiene haciendo reaccionar fenóxido sódico con CO<sub>2</sub> a una temperatura de 125°C y muy altas presiones.
- Fabricar refrescos, cervezas y aguas carbonatadas.
- Fabricar combustible. Diversos proyectos intentan utilizar bacterias para producir combustible a partir de CO<sub>2</sub>.
- Cultivar algas como fuente de energía renovable. Para crecer, las algas sólo requieren agua, nutrientes, la luz del sol y CO<sub>2</sub>. Y, una vez secas, pueden ser una fuente de combustión para generar energía renovable. Varios proyectos emplean para ello microalgas, capaces de llevar a cabo la fotosíntesis con un rendimiento mucho mayor que el de las plantas superiores.

Finalmente, cabe destacar que el CO<sub>2</sub> puede ser empleado como fuente de alimentación para la obtención de BioDME (biodimetiléter). Se trata de un biocombustible de última generación que puede ser empleado: en fase líquida, gracias a sus propiedades análogas al biodiesel; o como gas, siendo un buen sustituto del gas licuado del petróleo o propano.

---

## *2.- OBJETIVOS*

---



El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal estudiar la posibilidad de aprovechamiento energético de ciertos residuos de la industria alimentaria (lactosuero, restos de pan y salvado) por sí solos y con la presencia de inóculo (lodo de depuradora).

Para poder llevar a cabo este objetivo principal se plantearon los siguientes objetivos específicos con el fin de profundizar en el estudio:

- a) Cuantificar de forma general la cantidad de residuos que generan algunas industrias alimentarias en Canarias (lactosuero, restos de pan, salvado y lodos de depuradora).
- b) Determinar la producción y composición de biogás obtenido a partir de la digestión anaerobia de los distintos residuos mencionados.
- c) Estudiar la influencia del lodo de depuradora como inóculo en la producción y composición del biogás producido, mediante su co-digestión anaerobia con los residuos anteriormente citados.
- d) Evaluar el grado de descomposición de las muestras preparadas en los biodigestores mediante el análisis de sólidos totales, fijos y volátiles (antes y después de digestión anaerobia).





---

### *3.- MATERIAL Y MÉTODO*

---



A continuación, se detallan las materias primas y productos químicos empleados, así como la instalación experimental, procedimientos, técnicas analíticas y procesos llevados a cabo en el laboratorio para la realización de este Trabajo de Fin de Grado.

### 3.1.- Materias primas utilizadas

Para llevar a cabo este proyecto de investigación, se recogen en Tenerife muestras de lactosuero (mezcla vaca y cabra) procedentes de la Quesería de Benijos (La Orotava) la cual trabaja con volúmenes de aproximadamente 20.000 litros diarios entre leche de vaca y de cabra. Por otro lado, también se recogen muestras de pan (restos) procedentes de la industria BIMBO y salvado facilitado por la industria “Harinalia”. Por último, en cuanto al inóculo empleado, se trata de lodo proveniente de la Estación Depuradora de Santa Cruz de Tenerife.

La nomenclatura para las materias primas utilizadas se muestra en la Tabla 3.1:

**Tabla 3.1.-** Identificación de los residuos empleados

Mezcla de residuos	Identificación
100 % Lactosuero	L
100% Pan	P
100% Salvado	S
100% Inóculo	I

### 3.2.- Productos químicos empleados

Los productos químicos utilizados para poner en marcha los experimentos de digestión anaerobia son los siguientes:

- Cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )
- Disolución buffer de  $\text{PO}_4^-$  (pH 7,0)
- Carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ )
- Lentejas de hidróxido sódico ( $\text{NaOH}$ )

- Ácido clorhídrico HCl (37%)
- Nitrógeno gas (para atmósfera inerte)

### 3.3.- Material y equipos de laboratorio

Los materiales y equipos de laboratorio necesarios para llevar a cabo este proyecto se nombran a continuación:

- Envases de vidrio transparente de 500 ml con sus respectivos tapones de goma utilizados para llevar a cabo la digestión anaerobia (16 unidades).
- Recipientes graduados de vidrio transparente con sus correspondientes tapones de goma empleados como medidores de volumen (16 unidades) y otro de 4 L.
- Envases de vidrio transparente de 6 L para recoger la disolución ácida desplazada por el biogás (4 unidades).
- Conexiones y accesorios tales como válvulas, viales, codos y T para el montaje de la instalación experimental.
- Baños térmicos para sumergir los biodigestores (2 unidades).
- Jeringa de gases (1 ml) para recolectar las muestras del biodigestor e inyectarlas en el cromatógrafo.
- Cromatógrafo de gases, Agilent 7820A para analizar la composición del biogás.
- Crisoles de cerámica para los análisis de sólidos.
- Estufa.
- Mufla.
- pH-metro.
- Bomba de vacío.
- Probetas, vasos de precipitados, espátulas, matraces, Kitasato, etc.

### 3.4.- Digestión y co-digestión anaerobia:

Este Trabajo de Fin de Grado se centra en el estudio de la digestión anaerobia de residuos procedentes de la industria alimentaria, así como la co-digestión de estos residuos con un inóculo, para tratar de favorecer la producción de biogás, debido a que la digestión de dos

sustratos diferentes aprovecha la sinergia de la mezcla, compensando las carencias que puedan presentar ambos sustratos por separado.

Por tanto, además de la digestión anaerobia con los residuos originales (lactosuero, pan y salvado) se estudiará la co-digestión de estos residuos con lodo de depuradora como inóculo. Las condiciones con las que se han calculado las relaciones en peso de las muestras son:

- Los sólidos volátiles que provienen del inóculo son superiores al 2% de los sólidos volátiles totales.
- El contenido en sólidos totales de la muestra es aproximadamente inferior al 10%.

En la Tabla 3.2 se muestran las relaciones utilizadas para las mezclas de co-digestión a estudiar, así como su nomenclatura.

**Tabla 3.2.-** Identificación de las mezclas de co-digestiones utilizadas

Mezcla de co-digestión	Identificación
88 % Lactosuero - 12% Inóculo	L - I
48% Pan - 52% Inóculo	S - I
35% Salvado - 65% Inóculo	P - I

#### 3.4.1- Instalación experimental:

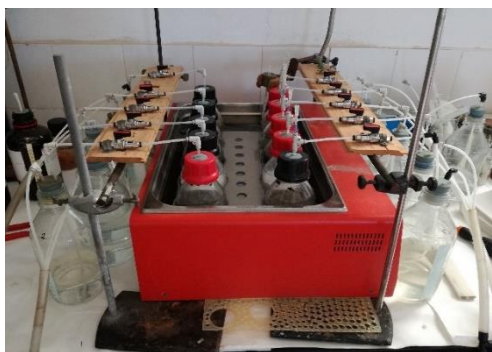
Inicialmente se trabaja con dos instalaciones experimentales conformadas por un baño termostático, en cuyo interior se encuentran los biodigestores herméticamente sellados y sumergidos en agua destilada. La finalidad de este baño térmico es la de mantener una temperatura de 31,5 °C con el que asegurar las condiciones óptimas de digestión anaerobia y, conseguir de este modo, la descomposición completa de la materia orgánica.

En cuanto a la medida del volumen de biogás producido, éste se realizó en los recipientes de vidrio de 1 L, graduados con papel milimetrado (expresado en centímetros) y conectados a su vez tanto a los biodigestores como al botellón de 6 L. Por tanto, el biogás producido dentro del biodigestor provoca un desplazamiento de la disolución ácida contenida en el interior del recipiente graduado de 1 L, permitiendo de este modo hacer en él una lectura del volumen generado cada 24 horas. La disolución ácida desplazada de

cada uno de los recipientes de 1 L se pasa al botellón de 6 L para su posterior recogida y proceso de relleno.

Finalmente, cabe mencionar que se utiliza cromatografía de gases como técnica analítica para el estudio de las muestras de gas, en el cromatógrafo disponible en la línea de investigación.

La instalación experimental se muestra en las siguientes figuras:



**Figura 3.1.-** Primer Set de biodigestores



**Figura 3.2.-** Segundo Set de biodigestores

Los siete ensayos con residuos distintos se realizaron por duplicado, ya que al llevar a cabo la extracción del gas correspondiente podría alterarse el equilibrio del sistema y falsear la medida de producción del biogás. Por tanto, los biodigestores situados en la izquierda del baño termostático están destinados a la medida exacta de producción de biogás diaria; mientras que los de la derecha fueron destinados a la extracción de las muestras de gas con el fin de analizar su composición.

Para aumentos en la producción de biogás imposibles de contabilizar en la instalación anterior en alguno de los experimentos propuestos, se diseña una instalación experimental secundaria tal como se muestra en la Figura 3.3:



**Figura 3.3.-** Instalación experimental secundaria para elevadas producciones

En este caso, la disolución ácida es desplazada por el biogás a un recipiente de 4 L en lugar de un litro (como sucedía en la primera instalación experimental). De este modo se evitan las pérdidas en la toma de los datos volumétricos a lo largo del día.

#### **3.4.2- Preparación del biodigestor**

El procedimiento experimental realizado para llevar a cabo las digestiones anaerobias se describe con detalle a continuación.

Primero se prepararon las masas de los siete tipos de muestras correspondientes a los cuatro residuos originales y a las tres mezclas de co-digestión presentadas en las Tablas 3.1 y 3.2, en biodigestores de 500 ml.

Una vez triturados los residuos que lo requieran, introducidos en el biodigestor y pesados, se llenan con agua destilada hasta los 400 ml. Como la masa contenida en cada digestor es diferente, se procede a introducir los reactivos equivalentes, sabiendo que por cada 30 g de residuos se introducen: 2,4 g de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (que proporciona al medio una fuente de nitrógeno); 250 mg de  $\text{CaCO}_3$  (para controlar la alcalinidad y asegurar la capacidad tampón); y 5 ml de disolución buffer para regular el pH.

A continuación, se mide el pH para verificar valores de entre 7,5 y 8,5. En los casos de niveles de pH inferiores, se añade la cantidad necesaria de lentejas de NaOH para llevar el sistema al pH óptimo (preferentemente a valores de pH=8).

Luego, se cierran los biodigestores con sus respectivos tapones de goma y se acoplaban a las válvulas y conexiones del sistema. Se aplica vacío durante unos 5 minutos para eliminar el aire contenido dentro de los biodigestores, y luego se inyecta gas nitrógeno durante unos 30 segundos para asegurar la existencia de una atmósfera inerte en el interior del biodigestor. A continuación, se abre la válvula para eliminar la sobrepresión y el posible oxígeno residual, y se repite el mismo procedimiento aplicando nitrógeno nuevamente.

Finalmente, se sumerge el biodigestor en un recipiente con agua para comprobar la ausencia de fugas. Una vez comprobado, se conecta el biodigestor al sistema y se introduce en el baño térmico a 31,5 °C terminando con la apertura de las válvulas para iniciar el experimento de digestión anaeróbica.

### 3.4.3- Determinación del volumen de biogás producido

Para analizar el volumen de biogás producido se realizan medidas cada 24 horas de lunes a viernes. La medida se lleva a cabo con la ayuda de una tira de papel milimetrado (en centímetros) adherida en el frasco de vidrio transparente que se encuentra acoplado a cada biodigestor, como se menciona en el apartado 3.4.1 de este capítulo.

Midiendo la altura de líquido desplazado por el gas (h) y conociendo el diámetro del frasco (D) se calcula el volumen del gas producido (ecuación [3.1]) y finalmente la producción diaria de biogás según la ecuación [3.2].

$$V \text{ (ml)} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot h \quad [3.1]$$

$$\text{Producción (l/kg)} = \frac{V \text{ (l)}}{\text{masa (kg)}} \quad [3.2]$$

Los frascos volumétricos contienen una disolución de ácido clorhídrico (pH=2) para evitar la disolución del CO<sub>2</sub> procedente del biogás.

Cuando la producción de biogás es nula, se procede a la reactivación del pH. Para ello, se abren los biodigestores y se ajusta nuevamente el pH entre 7,5 y 8,5 añadiendo lentejas de NaOH. Una vez reajustado el pH, se repite el proceso de vacío e inertización con N<sub>2</sub> explicado con anterioridad (apartado 3.4.2) y se reanuda el proceso de digestión anaerobia



hasta que vuelva a dejar de producir biogás, momento en el que se da por terminado el experimento.

#### 3.4.4- Análisis del biogás producido

La composición del biogás obtenido en ambos sets de biodigestores se analiza en un cromatógrafo de gases (Agilent, 7820A) (Figura 3.4), acoplado a un PC, para poder llevar a cabo el análisis de las muestras de biogás recogidas en cada biodigestor. Antes de tomar la muestra se cierra la válvula que conecta el biodigestor con su frasco volumétrico correspondiente y se inyecta la jeringuilla en la toma de muestra del biodigestor para extraer los 0,5 ml que se introducen finalmente en el cromatógrafo.



**Figura 3.4.-** Cromatógrafo de gases (Agilent, 7820A)

El cromatógrafo consta de dos columnas en paralelo donde tiene lugar la separación de los distintos componentes de la muestra inyectada. En la primera columna se produce la separación del oxígeno, nitrógeno y posible metano; mientras que en la segunda tiene lugar la separación del monóxido de carbono, aire, metano y dióxido de carbono.

Para poder confirmar la existencia de metano ( $\text{CH}_4$ ) en la muestra, debía de aparecer en el cromatograma el pico de este componente en ambas columnas, es decir, por duplicado.

A continuación, en la Tabla 3.3 se muestran los tiempos de retención aproximados correspondientes a cada uno de los componentes nombrados anteriormente:

**Tabla 3.3-** Tiempos de retención de los componentes del cromatograma

	Componente	t <sub>r</sub> (min)
<b>1° Columna</b>	Oxígeno	0,59
	Nitrógeno	0,68
	Metano	0,80
<b>2° Columna</b>	CO	1,80
	Aire	3,57
	Metano	3,70
	CO <sub>2</sub>	4,24

El periodo de tiempo empleado para cada muestra dentro del cromatógrafo se estableció en 5 minutos ya que el tiempo de retención para el CO<sub>2</sub> era de algo más de cuatro minutos (4,24 min).

En cuanto a los parámetros más importantes del cromatógrafo se recogen en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4.-** Condiciones de operación del cromatógrafo

Parámetros	Valor
Volumen de inyección	0,5 ml
Presión del inyector	9 psi
Temperatura del inyector	175 °C
Temperatura del detector	180 °C
Caudal de referencia	36 ml / min
Caudal de "make up"	2 ml / min
Temperatura del horno	40 °C
Componente de la fase móvil	Helio

### 3.4.5- Reactivación del pH

Como se mencionó, una vez detenida la producción de biogás en los digestores varios días y comprobar que no se producía ninguna variación más, se procede a la reactivación del pH, midiéndolo en las muestras y añadiendo las lentejas de NaOH necesarias hasta alcanzar un pH de aproximadamente 8.

Finalmente, se aplicó vacío y gas nitrógeno a los biodigestores para obtener una atmosfera inerte. Una vez comprobado bajo agua que no existían fugas se conectaron de nuevo al

sistema para su funcionamiento y se analiza tanto la cantidad como la composición del gas producido una vez reactivado el pH.

### **3.5- Caracterización de los residuos y el inóculo, antes y después de la digestión**

En este trabajo también se efectuaron los ensayos correspondientes para determinar el contenido de sólidos totales (ST), fijos (SF) y volátiles (SV) de todas las muestras de residuos, antes (para obtener información inicial acerca de la materia orgánica susceptible de ser transformada en biogás) y después de llevar a cabo la digestión anaerobia de los mismos (para determinar las características del digestato obtenido y comprobar si se puede obtener más biogás a partir de ellos). Estos ensayos se realizan por triplicado con el fin de asegurar la veracidad de los resultados.

#### **3.5.1- Procedimiento experimental**

El procedimiento experimental empleado para llevar a cabo la caracterización de sólidos totales (ST), fijos (SF) y volátiles (SV) de las muestras a estudiar fue el siguiente:

1. Se pesan los crisoles vacíos en los que se iban a depositar las muestras a analizar (A).
2. Se toma el peso de la muestra + crisol para determinar por diferencia el peso de la muestra.
3. Se introducen los crisoles en la estufa durante 24 h y a 100 °C de temperatura para eliminar la humedad.
4. Se retiran los crisoles de la estufa y se pesan (B).
5. Se introducen los crisoles en la mufla durante 1 h y a 500 °C con el fin de eliminar los sólidos volátiles de la muestra, dejando solamente los sólidos fijos en el interior del crisol.
6. Se retiran los crisoles del interior de la mufla y se pesan nuevamente (C).

### 3.5.2- Determinación de los Sólidos Totales, Fijos y Volátiles

Para calcular el contenido en sólidos totales (ST), fijos (SF) volátiles (SV) se emplean las ecuaciones [3.3], [3.4] y [3.5] que se muestran a continuación:

$$ST (\%) = \frac{B-A}{PM} \cdot 100 \quad [3.3]$$

$$SF (\%) = \frac{C-A}{B-A} \cdot 100 \quad [3.4]$$

$$SV (\%) = \frac{B-C}{B-A} \cdot 100 \quad [3.5]$$

Siendo:

- A: peso del crisol vacío (g)
- B: peso del crisol con la muestra después de secar en la estufa (g)
- C: peso del crisol con la muestra después de calcinar en la mufla (g)
- PM: peso de la muestra contenida en el crisol (g)

---

*4.- RESULTADOS Y  
DISCUSIÓN*

---



En el presente Trabajo de Fin de Grado se ha realizado, por un lado, la cuantificación de forma general de residuos de la industria láctea (suero) y las industrias de harina y pan en Canarias, con el fin principal de estimar las cantidades que se desechan al año; así como conocer sus posibles usos, tratamientos, destinos, etc. Por otro lado, también se centra en la valorización química de estos residuos llevando a cabo un estudio de obtención de biogás mediante un proceso de digestión anaerobia, además de estudiar la influencia tanto en la producción como en la composición del biogás obtenido, al utilizar lodo de depuradora como inóculo. Los resultados experimentales obtenidos (composición del biogás), permiten conocer si se puede utilizar directamente como fuente de energía (biometano) o como materia prima ( $\text{CO}_2$ ) para obtención de BioDME en un proceso catalítico heterogéneo.

Para ello se llevó a cabo la digestión anaerobia de los siguientes residuos: lactosuero (L), restos de pan (P) y salvado (S), tanto de forma individual como en presencia de un inóculo (lodo de depuradora, I) con el fin de comprobar de qué manera se obtienen mejores resultados. Todos los residuos con y sin inóculo, así como el inóculo utilizado, fueron caracterizados por medio del análisis del contenido en sólidos totales, fijos y volátiles, tanto antes como después del proceso de digestión anaerobia.

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo de investigación.

#### **4.1- Cuantificación de residuos en Canarias:**

Previo a la realización experimental se llevó a cabo una cuantificación de forma generalizada en Canarias de los distintos residuos empleados en los experimentos de digestión anaerobia (lactosuero, restos de pan y salvado), así como del inóculo utilizado (lodo de depuradora), realizando una búsqueda bibliográfica de las cantidades generadas por isla o preguntando directamente en la industria alimentaria que suministró el residuo. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada residuo y el inóculo.

#### 4.1.1- Residuos de la industria láctea (lactosuero)

Los sueros lácteos residuales, como ya se ha mencionado, derivan de la elaboración del queso, con leche procedente de ganado vacuno, ovino o caprino.

En cuanto al reparto geográfico del ganado en ordeño, la mayor parte del bovino está situado en Gran Canaria (4.502) y Tenerife (1.409) ya que en las demás islas no superan las 100 cabezas. Por otro lado, el ovino está más repartido en el Archipiélago, con 18.419 cabezas en Gran Canaria, 15.614 en Fuerteventura, 8.363 en Tenerife, 5.529 en Lanzarote, 4.300 en el Hierro y algo menos de 2.000 cabezas en resto de islas menores. Por último, en cuanto al caprino, la mayor parte se concentra en Fuerteventura con 82.920 cabezas seguido por 65.809 en Gran Canaria, 45.388 en Tenerife, 18.260 en La Palma, 17.236 en Lanzarote y algo más de 7.000 en La Gomera y en El Hierro (Dupuis I., 2015). En la Tabla 4.1 se muestra la producción de leche y la cantidad de suero generado por especie en Canarias para el año 2010.

**Tabla 4.1.-** Producción de leche y suero por especie en Canarias en 2010

Especie / Provincia	Leche			Estimación de suero*	
	Las Palmas miles de l	S/C de Tenerife miles de l	Parte destinada a queso %	Las Palmas miles de l	S/C de Tenerife miles de l
Bovino	25.354	7.464	30	5.300 a 6.900	1.500 a 2.000
Ovino	3.263	651	99,5	2.300 a 2.900	450 a 580
Caprino	56.608	29.086		39.500 a 50.700	20.200 a 26.000
<b>Total</b>				<b>47.000 a 60.500</b>	<b>22.300 a 28.700</b>

(Fuente: Servicio de estadísticas, ISTAC, 2011)

Tal y como se puede apreciar en la tabla, según el Instituto Canario de Estadística (ISTAC), la mayor parte del ganado lechero se encuentran en Fuerteventura, Gran Canaria y Tenerife. El suero generado a partir de la fabricación del queso, se estima que representa entre el 70 y 90% de la leche; sin embargo, ésta tasa varía según las especies ganaderas, y según los procesos de transformación. Por otro lado, se calcula que la producción de suero ronda entre los 78 y 100 millones de L/año para todo el Archipiélago.

Además, existe una parte sin estimar que se da como alimento sin transformación a animales, siendo ésta una práctica bastante extendida en el ganado porcino y algo más escaso en el ganado caprino.



#### **4.1.2- Residuos de la industria del pan**

Se estima que los residuos generados en la industria del pan representan el 2% de cada pan. Se puede considerar que se produce una media de un pan de 160 gr a diario por habitante y que la mitad del pan consumido se elabora en panaderías industriales. Por tanto, si la población canaria se eleva a 2,1 millón de habitantes, con una población flotante de 300.000 personas, se deduce que se elabora al día 2,4 millones de panes de 160 gr de masa. Esto equivaldría a una masa residual de 6 toneladas al día, es decir, 2.200 t/año (Dupuis I, 2015).

#### **4.1.3.- Residuos del trigo (salvado)**

Existe escasa información sobre la cuantificación de “salvado” en Canarias, aunque se sabe que las grandes industrias harineras como “Harinalia” trabajan al mes con aproximadamente una tonelada de trigo, del cual el 75% se convierte en producto (harina) y el 25% restante en subproducto (salvado), lo que equivale a 3 toneladas de salvado al año.

Esta empresa, en particular, entrega parte de estos residuos a ganaderos (para la alimentación animal) mediante acuerdos entre ambas partes.

#### **4.1.4- Lodos de depuradora (inóculo)**

En la Tabla 4.2 se presentan las cantidades de Lodos de depuradora a partir de aguas residuales en Canarias según el Instituto Canario de Estadísticas (ISTAC) para el año 2013 y 2014.

**Tabla 4.2.-** Lodos generados a partir de aguas residuales en Canarias

	2014	2013
Volumen de aguas residuales tratadas ( m <sup>3</sup> )	382.674	330.186
Porcentaje de aguas residuales tratadas con destino al mar	79,3	78,4
Porcentaje de aguas residuales tratadas con destino a un cauce fluvial	0,6	0,5
Porcentaje de aguas residuales tratadas con destino agua reutilizada	19,9	21,1
Porcentaje de aguas residuales tratadas con destino infiltraciones al terreno	0,2	0,0
Porcentaje de aguas residuales tratadas con otros destinos	0,0	0,0
Volumen total de agua reutilizada ( m <sup>3</sup> )	75.968	69.611
Porcentaje de agua reutilizada usada en agricultura	53,1	57,3
Porcentaje de agua reutilizada usada en industria	1,8	0,0
Porcentaje de agua reutilizada usada en jardines y zonas deportivas de ocio	36,3	42,6
Porcentaje de agua reutilizada usada en limpieza de alcantarillado y baldeo de calles	5,6	0,1
Porcentaje de agua reutilizada usada en otros usos	3,2	0,0
Lodos generados en el tratamiento de aguas residuales (toneladas)	25.497	17.006
Porcentaje de lodos generados con destino agricultura, silvicultura y jardinería	0,0	0,0
Porcentaje de lodos generados con destino incineración o aprovechamiento energético	13,8	0,0
Porcentaje de lodos generados con destino vertedero	86,2	100,0
Importe facturado por alcantarillado y depuración (miles de euros)	53.816	59.199

(Fuente: ISTAC: Gobierno de Canarias)

Por tanto, de dicha tabla se puede deducir que se generan alrededor de 25.500 toneladas de materia seca al año en Canarias. Con el paso de los años el porcentaje de lodos destinados a vertedero serán cada vez menores, al contrario que el porcentaje destinado al aprovechamiento energético que va en aumento.

#### **4.2.- Caracterización de los sólidos totales (ST), fijos (SF) y volátiles (SV) antes de la digestión anaerobia**

El porcentaje de sólidos totales y volátiles que contienen tanto los residuos como el inóculo con los que se carga el digestor es un factor importante a la hora de asegurar que el proceso se efectúa correctamente, ya que la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve limitada a medida que aumenta el contenido de sólidos fijos, afectando de este modo a la eficiencia y producción de gas.

Por su parte, el porcentaje de sólidos volátiles representa la medida de la materia orgánica máxima que se transforma en biogás. El porcentaje de sólidos volátiles respecto al de sólidos totales suele variar entre el 70-95%. Los residuos que tienen un porcentaje inferior al 60% no suelen considerarse buenos sustratos para la digestión anaerobia.

En definitiva, un estudio importante dentro de la valorización química de los distintos residuos y sus mezclas es el análisis de los sólidos totales, fijos y volátiles. Estos fueron determinados antes de llevar a cabo la digestión anaerobia tanto para los residuos originales como para el inóculo y las mezclas residuo-inóculo, según el procedimiento descrito en el apartado 3.5.2 de material y método.

Todos los valores obtenidos en el análisis de sólidos de cada muestra se presentan en la Tabla A.1 del anexo A. En la Tabla 4.3 se presentan los valores medios obtenidos para los residuos originales y el inóculo.

**Tabla 4.3.-** Análisis de sólidos totales, fijos y volátiles de las muestras originales antes de la digestión anaerobia

MUESTRA	Iniciales		
	% Sólidos totales (ST)	% Sólidos fijos (SF)	% Sólidos volátiles (SV)
<b>100% L</b>	7,8	19,0	81,0
<b>100% P</b>	59,9	3,7	96,3
<b>100% S</b>	89,3	9,0	91,0
<b>100% I</b>	3,8	28,0	72,0

El salvado es el residuo con mayor cantidad de sólidos totales  $\approx 89\%$  mientras que el lactosuero presenta el menor porcentaje de ST  $\approx 8\%$  aparte del inóculo con aproximadamente un 4%.

Por otro lado, estos residuos presentan un alto porcentaje en sólidos volátiles. Obviando el inóculo, este porcentaje varía entre el 81 y 96% lo que demuestra que se trata de residuos con una alta capacidad para ser digeridos y, por tanto, producir biogás.

En base al contenido de los sólidos totales y volátiles que presentan estas muestras de residuos y del inóculo, se realizaron las mezclas de co-digestión anaerobia lactosuero/lodo, pan/lodo y salvado/lodo, en las relaciones que se presentan a continuación en la Tabla 4.4, donde se muestra además su caracterización.

**Tabla 4.4.-** Análisis de sólidos totales, fijos y volátiles de las mezclas de co-digestión antes de la digestión anaerobia

MUESTRA	Iniciales		
	% Sólidos totales (ST)	% Sólidos fijos (SF)	% Sólidos volátiles (SV)
<b>88% L - 12% I</b>	7,5	20,1	79,9
<b>48% S - 52% I</b>	44,9	18,9	81,1
<b>35% P - 65% I</b>	40,2	12,2	87,8

La presencia del inóculo en las muestras ocasiona una disminución de los sólidos totales y volátiles, así como un incremento de los sólidos fijos, obteniéndose la mayor cantidad de sólidos volátiles para la mezcla Pan-Inóculo (PI). El porcentaje de sólidos volátiles varía entre el 80 y 88% en todas las muestras.

### 4.3.- Valorización de residuos

En este trabajo, como se ha mencionado, se estudia la posible valorización química de tres residuos de industrias alimentarias en Canarias mediante la realización de una digestión anaerobia descrita en el apartado 3.4 del capítulo de material y método, utilizando lactosuero (L), pan (P) y salvado (S) como materias primas para la producción de biogás. También se estudia la influencia del uso de lodo de depuradora (I) como inóculo en la co-digestión anaerobia con los distintos residuos nombrados anteriormente, con el fin de determinar si favorece o inhibe la producción de biogás. No obstante, dependiendo de la composición del biogás obtenido, se podría utilizar directamente como fuente de energía o como materia prima para obtener BioDME.

A continuación, se presenta por separado el análisis de la influencia del tipo de residuo tanto de la producción de biogás como de la composición de éste y cómo influye en estos parámetros el utilizar un Inóculo.

### 4.3.1.- Influencia del tipo de residuo en la producción de biogás

La producción de biogás generado en los distintos experimentos realizados se mide en litros de gas obtenido por cada kilogramo de materia utilizada. Una vez preparadas las muestras como se describe en el apartado 3.4.2 del capítulo de material y método bajo las condiciones óptimas para llevar a cabo la digestión anaerobia de dichas muestras, se procede a medir el volumen de biogás producido hasta que el volumen final se mantiene constante, lo que nos indica que la producción de biogás finaliza, en este momento se procede a medir el pH, para comprobar si se encuentra en valores por debajo del óptimo (8-8,5). En ese caso se realiza la reactivación del pH y se estudia nuevamente la producción de biogás ya que la acidificación del medio puede provocar la muerte de los microorganismos encargados de la digestión anaerobia.

A continuación, en la Tabla 4.5 se presentan los valores de pH durante la preparación de los biodigestores (antes de la reactivación), así como cuando finaliza la producción de biogás, junto con los valores del pH después de reajustarlo nuevamente al pH óptimo (después de la reactivación).

**Tabla 4.5.-** Análisis del pH de las muestras antes y después de reactivación.

RESIDUOS	Antes de reactivación			Después de reactivación	
	pH inicial	pH antes de reajustar	pH reajustado	pH inicial	pH reajustado
L	4,62	5,37	8,09	3,96	8,23
P	5,56	7,02	8,38	4,37	8,34
S	6,51	6,85	8,34	4,94	8,37

Tal y como se puede observar, el pH que presentan las muestras iniciales es ácido, sobre todo el lactosuero que presenta un pH igual a 4,62. Una vez que se detiene la producción y se analiza el pH, se observa como todas las muestras presentan un pH por debajo de 5 (entre 3,96-4,94), justificando así que finalizara la producción de biogás debido al pH ácido del medio. La menor reducción que se observa del pH es para el residuo Salvado. El pH de todos los residuos es reajustado al valor óptimo para que se lleve a cabo la digestión anaerobia como se observa en la Tabla 4.5 (después de reactivar) y se continúa con el análisis de la producción de biogás hasta que finalice nuevamente la misma.

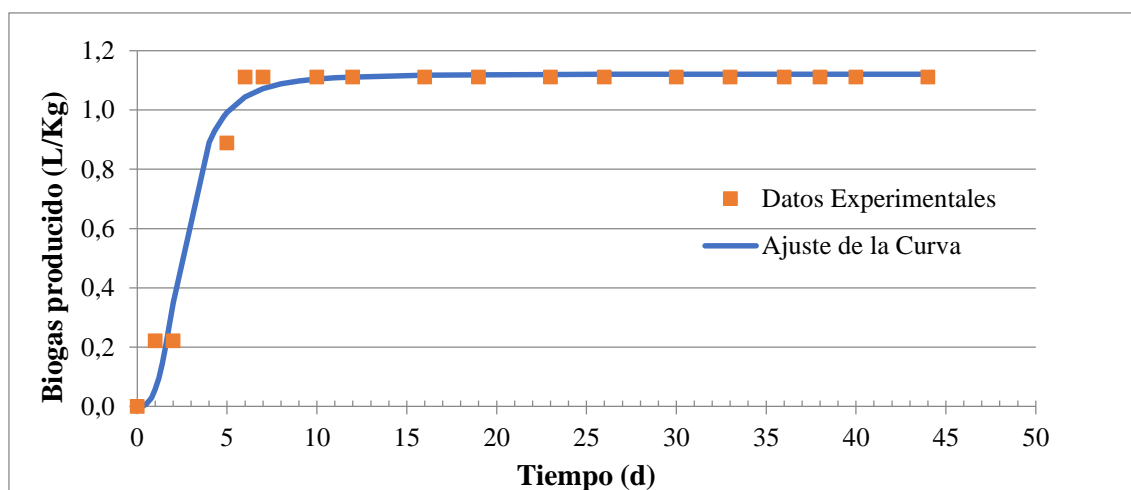
#### 4.3.1.1- Estudio previo a la restitución del pH:

En las Tablas B.1 - B.3 del ANEXO B, se muestran los valores de los volúmenes diarios y la producción acumulada de biogás antes de reactivar el pH.

El estudio se comienza con el residuo Lactosuero (L). En la Figura 4.1 se muestran los valores de producción de biogás para este residuo, donde se presentan como puntos los valores experimentales. Estos valores experimentales se han ajustado mediante el programa Tablecurve a una curva representada por la línea continua, del tipo:

$$P \text{ (L/kg)} = \frac{a}{1+(x/b)^c} \quad [4.1]$$

Donde a, b y c son constantes cuyos valores se presentan en la Tabla 4.6.



**Figura 4.1.-** Producción de biogás del residuo Lactosuero “L” (sin reactivación)

Se observa para este residuo que la producción comienza a partir del primer día con un pequeño periodo de inducción de menos de 1 día, alcanzándose al sexto día su producción máxima de tan solo 1,11 L/kg. A partir de entonces, no se produce más biogás. Sin embargo, con el fin de comprobar su comportamiento y confirmar que la producción había terminado, se esperó alrededor de 40 días en los que no se observó ningún cambio.

Para el residuo Pan los valores obtenidos de producción de biogás se muestran en la Figura 4.2, de igual manera los puntos representan los valores experimentales y la línea continua el ajuste de esos puntos a la ecuación [4.1], cuyas constantes se muestran en la Tabla 4.6.

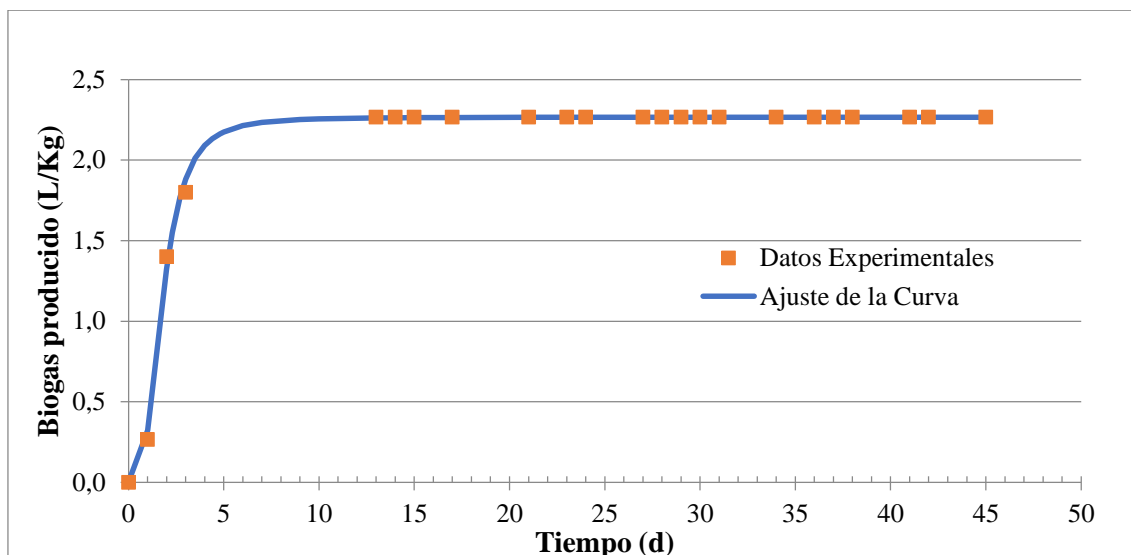


Figura 4.2.- Producción de biogás del residuo Pan “P” (sin reactivación)

En este caso se observa que el residuo Pan tiene una producción que aumenta rápidamente desde el primer día de digestión dejando de producir biogás a partir del sexto día, para este residuo se obtiene una producción acumulada de 2,27 L/kg. A partir del sexto día no se observa ninguna producción.

Para el residuo Salvado se realizaron tres experimentos (Salvado 1, 2 y 3) ya que en las 2 primeras experiencias el gas producido no pudo ser contabilizado en su totalidad. En la Figura 4.3 se muestran los valores obtenidos con el residuo Salvado en los tres experimentos, así como la curva de ajuste para el Salvado 3 (ecuación [4.1], cuyas constantes también se muestran en la Tabla 4.6), el único que se contabilizó la totalidad del gas producido.

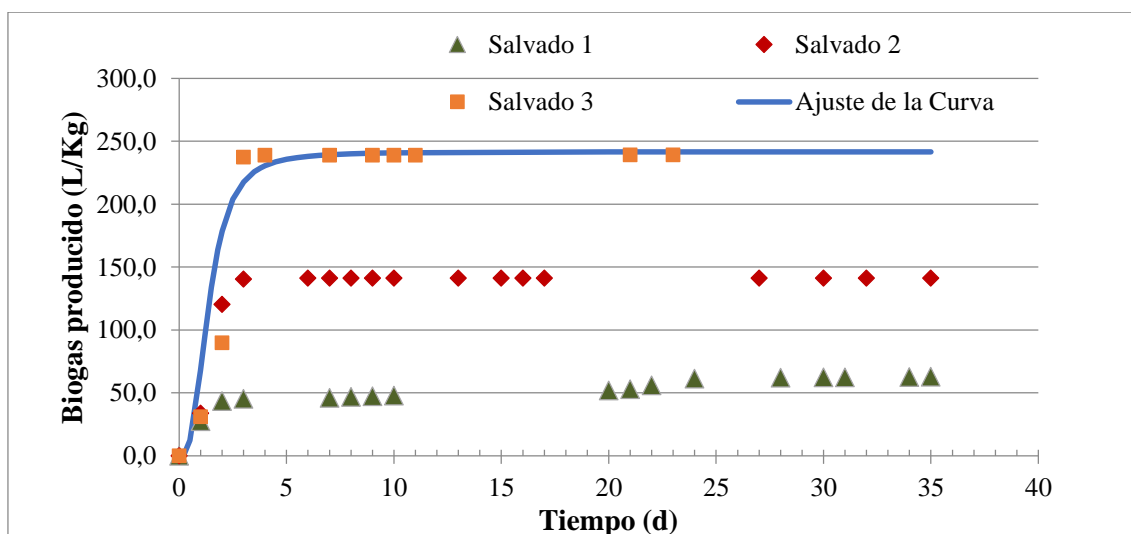


Figura 4.3.- Producción de biogás del residuo Salvado “S1, S2, S3” (sin reactivación)

Tal y como se puede observar, existe una gran producción de biogás con este residuo, durante los primeros días de digestión anaerobia, planteando incluso problemas a la hora de tomar los datos de volúmenes generados durante estos primeros días, porque el contenedor de la instalación experimental para medir el volumen de gas producido era insuficiente. Por ello, se planteó un sistema experimental distinto diseñando un nuevo contenedor de gas acumulado para este residuo como se muestra en el apartado 3.4.1 del capítulo de material y método, con el que se consiguió una mejor toma de datos.

El primer experimento “Salvado 1” se llevó a cabo en la primera instalación experimental y se obtuvo una producción acumulada máxima de 62,93 L/kg de Biogás. Sin embargo, una parte de la producción generada durante los primeros tres días, no pudo ser contabilizada. Esto demuestra que el interés de este experimento radica en los primeros días de digestión anaerobia ya que después la producción sigue aumentando, pero de forma muy lenta.

El experimento “Salvado 2” se realizó con la instalación modificada, obteniéndose datos de producción de biogás mucho más fiables con respecto al anterior. Al igual que en el experimento anterior la producción de biogás tuvo lugar durante los 3 primeros días de digestión anaerobia obteniéndose un máximo de 141,07 L/kg, pero en este caso también se perdió parte del gas producido.

Finalmente, con el objetivo de obtener unos resultados lo más exactos posible, se llevó a cabo un tercer experimento “Salvado 3” mejorando aún más la toma de datos durante esos primeros 3 días de producción, obteniéndose en él una producción acumulada de 239,2 L/kg.

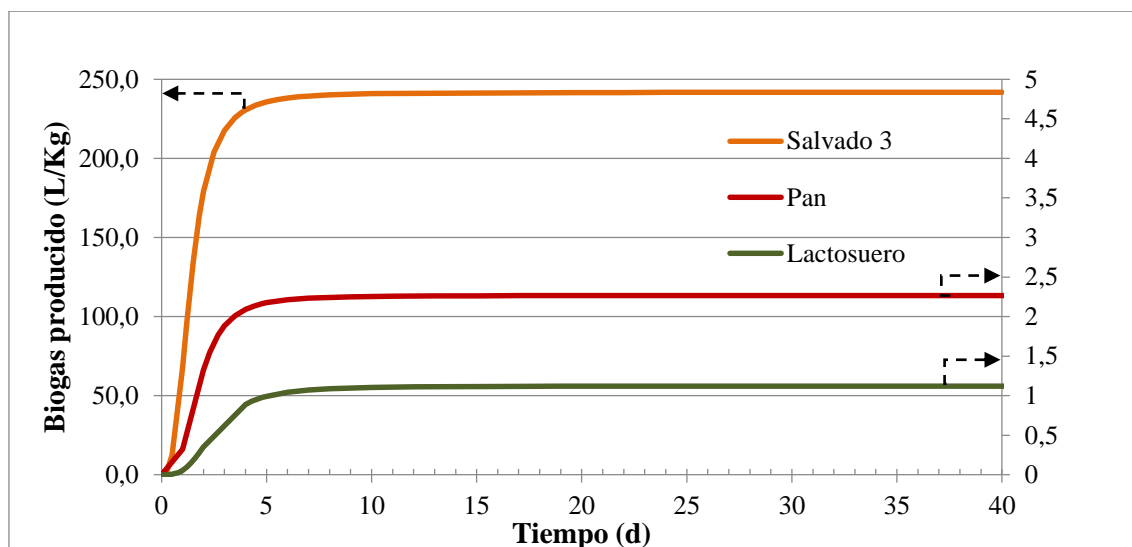
Como se indicó anteriormente los datos experimentales para cada residuo se ajustan a curvas del tipo mostrado en la ecuación [4.1] siendo los coeficientes a, b y c, los que se muestran a continuación.

**Tabla 4.6.-** Parámetros de ajuste para residuos puros antes de reactivación

Residuo	a	b	c
L	1,121	2,581	-3,091
P	2,266	1,791	-3,086
S	271, 372	1,390	-2,864



Con objeto de comparar las producciones de biogás de los distintos residuos estudiados en función del tiempo, se presentan en la Figura 4.4 las curvas de producción estimada para cada uno de ellos.



**Figura 4.4.-** Comparativa de producción de biogás de los residuos estudiados (sin reactivación)

Tal y como se puede observar en la gráfica, el comportamiento de todos los residuos es similar obteniéndose una producción de biogás que aumenta desde el primer día y continúa de forma abrupta hasta alcanzar una producción máxima acumulada para luego mantenerse constante, indicando así que la producción de gas se detuvo. Con el residuo Lactosuero se observa una pequeña etapa de iniciación del proceso de menos de 1 día, y la mayor velocidad de producción se obtiene con el Salvado, el tiempo para alcanzar la producción máxima acumulada fue entre 3 y 6 días en los tres residuos. La producción de biogás procedente del salvado es muy superior a la obtenida por los otros dos residuos (Lactosuero y pan). Por tanto, se puede decir que el salvado es el compuesto con mayor potencial de producción de biogás de los tres residuos a estudiar.

Además, se observa que el Pan presenta el doble de producción de biogás (2,27 L/kg) frente al Lactosuero que tan solo produjo un total de 1,11 L/kg, aunque muy bajas respecto a otros residuos estudiados por el grupo de investigación.

#### 4.3.1.2- Producción de biogás con restitución del pH:

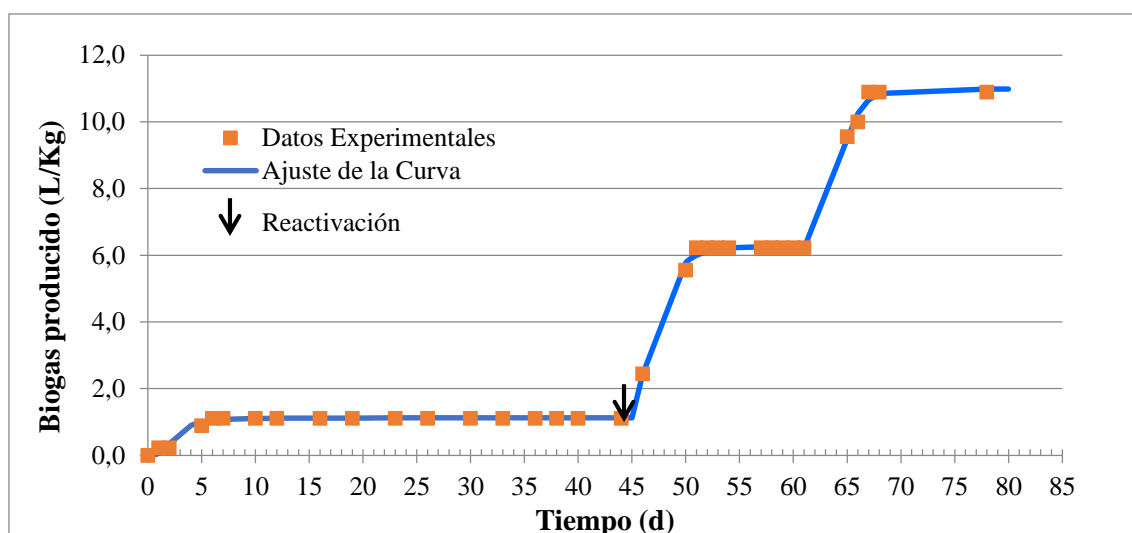
Como se mencionó cuando finaliza la producción de biogás debido a la acidificación del medio, existe una pérdida de microorganismos en el sistema. Se ha comprobado que

reajustando de nuevo el pH se puede volver a activar la mezcla, aumentando así la producción, por lo que en este apartado se muestran los resultados obtenidos para cada residuo una vez reactivado el pH, en todos los casos los datos experimentales se ajustaron a curvas descritas por la siguiente ecuación:

$$P \text{ (L/kg)} = a + \frac{b}{1+(x/c)^d} \quad [4.2]$$

siendo los coeficientes a, b, c y d para cada residuo los mostrados en la Tabla 4.7.

A continuación, en la Figura 4.5 se muestra la producción de biogás obtenida del Lactosuero una vez llevado a cabo la restitución del pH.



**Figura 4.5.-** Producción de biogás del residuo Lactosuero “L” (con reactivación del pH)

Tal y como se puede observar en la gráfica, a los 6 días se observa que la producción de gas se detiene, probablemente ocasionada por una rápida acidificación de la muestra. No obstante, a los 44 días se llevó a cabo la reactivación del pH, logrando de este modo una producción final mucho mayor (10,89 L/kg).

En este experimento se produjo un comportamiento atípico, ya que a partir del día 50 la producción de biogás se detuvo para luego reactivarse después del día 60 por sí solo, indicando que de alguna manera el sistema ocasionó un cambio que originó nuevamente producción de biogás.

Finalmente, cabe destacar que la producción obtenida después de la restitución por pH se incrementó notablemente llegando a alcanzar unas 10 veces más la producción inicial.

En la Figura 4.6 se presentan los valores experimentales obtenidos de producción de biogás con el residuo Pan, así como la curva de ajuste.

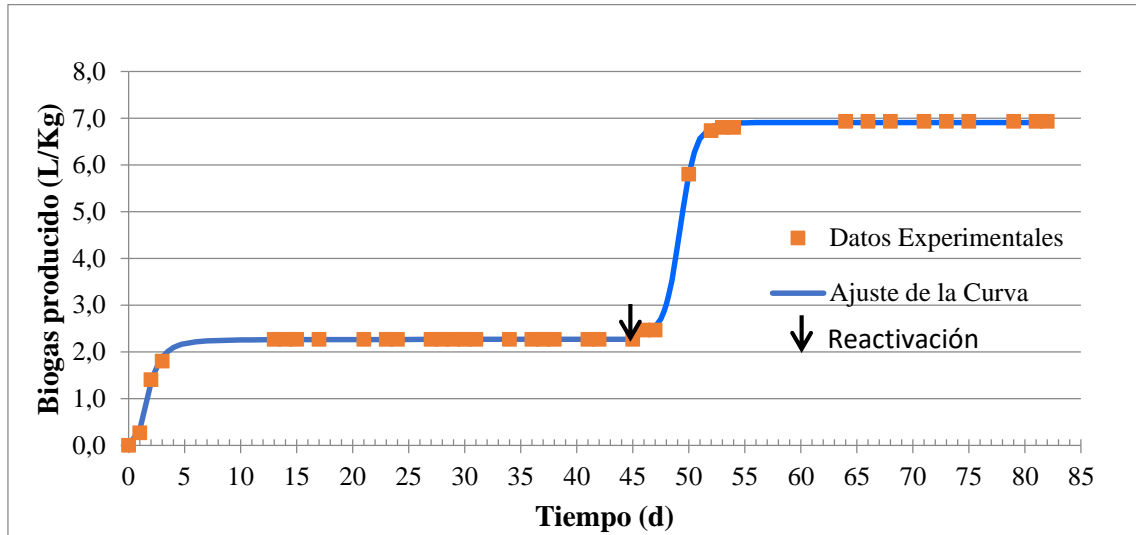


Figura 4.6.- Producción de biogás del residuo Pan “P” (con restitución por pH)

En este caso se observa como la reactivación del pH permite triplicar la producción inicial de Pan obtenida en los primeros 6 días antes de la reactivación, llegando a alcanzarse un valor de producción acumulada final de 6,93 L/kg después de reactivar.

Finalmente, se muestra en la Figura 4.7 el estudio de producción de biogás correspondiente al Salvado “S3”, único experimento en el que se logró contabilizar la producción total y en la Tabla 4.7 los coeficientes de la ecuación de ajuste para cada residuo.

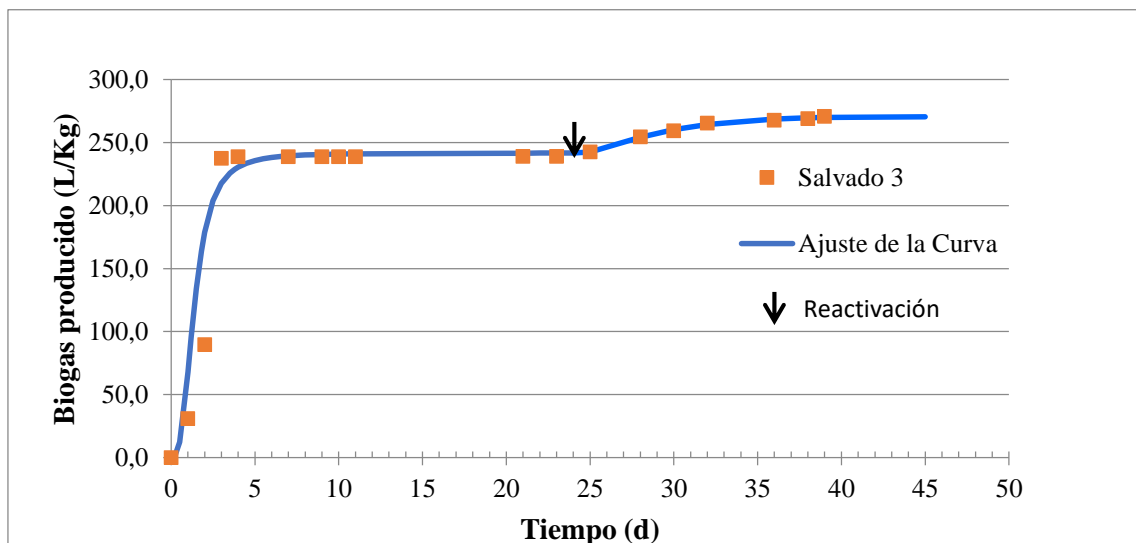


Figura 4.7.- Producción de biogás del residuo Salvado “S3” (con restitución por pH)

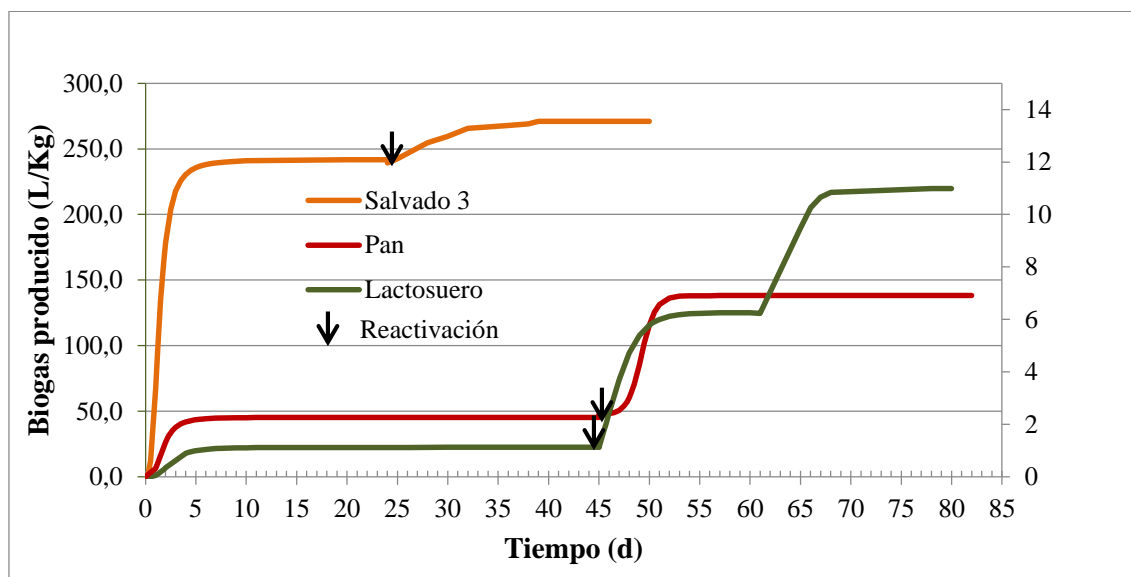
En este caso se observa como la producción después de la reactivación del pH sigue creciendo, aunque de forma leve si la comparamos con los primeros días de digestión, aumentando a una producción final de 270,93 L/kg tras haber llevado a cabo la restitución del pH.

En definitiva, se puede concluir que para optimizar la digestión anaerobia del salvado conviene realizar la reactivación lo antes posible (al cuarto o quinto día de digestión) ya que a partir de entonces la producción de biogás es nula. El incremento de producción de biogás generado después de reactivación es de tan solo un 12%.

**Tabla 4.7.-** Parámetros de ajuste para residuos puros después de reactivación

Residuo	a	b	c	d
L	-1,304	7,562	46,044	-32,657
P	2,371	4,535	49,230	-71,311
S	222,419	48,622	38,017	-12,754

Con objeto de comparar las producciones de biogás generadas por los diferentes residuos, se presentan en la Figura 4.8 las curvas de producción correspondientes a cada uno de ellos, antes y después de reactivar el pH.



**Figura 4.8.-** Comparativa de producción de biogás de los residuos estudiados (con restitución por pH)

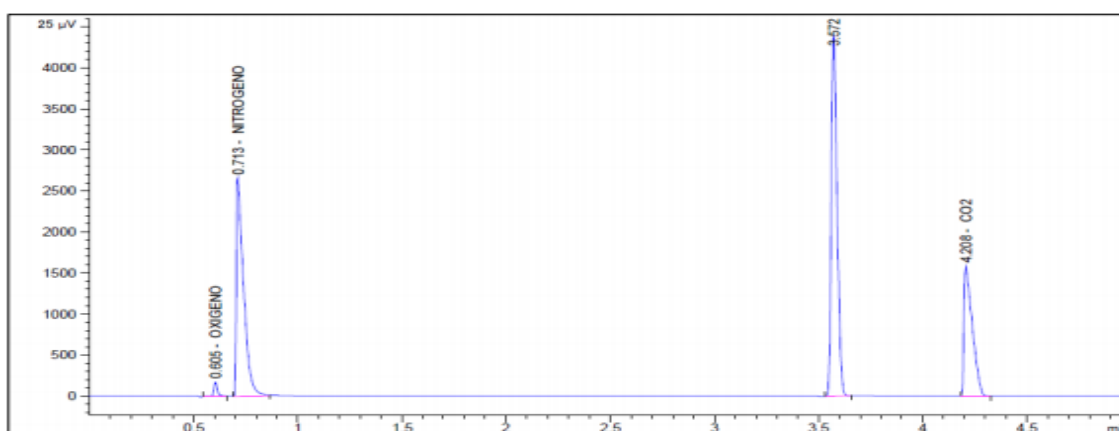
En este gráfico se puede observar como la producción de biogás por parte del Pan y el Lactosuero es mucho menor (incluso después de reactivación) si se compara con la generada por el salvado, con el que se logra una gran producción de biogás en corto

tiempo, tan alta que se diseñó como se ha mencionado un sistema de medida sólo para lograr contabilizar el biogás producido con este residuo

El residuo Pan presenta una mayor producción de biogás que el Lactosuero, antes y después de reactivar. Sin embargo, con el residuo Lactosuero como ya se mencionó, una vez finalizada la producción de biogás después de reactivar el pH, se observa una reactivación propia del sistema ocasionando que finalmente este residuo presente una mayor producción final de biogás (10,89 L/kg) frente a los 6,93 L/kg obtenidos con el pan.

#### 4.3.2.- Influencia del tipo de residuo en la composición del biogás:

Para el estudio de la influencia del tipo de residuo en la composición del biogás, se realiza el análisis por cromatografía de gases de la composición del mismo producido por cada residuo antes y después de reactivar el pH según el procedimiento descrito en el apartado 3.4.4 del capítulo material y método. Como resultado del análisis se obtiene un cromatograma como el que se muestra en la Figura 4.9 a modo de ejemplo.



**Figura 4.9.-** Composición de biogás obtenida mediante cromatografía

Todos los residuos estudiados presentan un cromatograma donde se observa una composición única de CO<sub>2</sub>, además de los gases presentes en la preparación de los biodigestores: oxígeno y aire, tal y como se puede apreciar en la figura. Por lo tanto, todos los residuos estudiados antes y después de reactivar el pH presentan una composición del gas del 100% en CO<sub>2</sub>, destacando la ausencia de metano en el biogás producido por esos residuos. Para que el gas producido se considere energéticamente como biogás, su composición en metano debe ser de al menos un 40%, así que al obtener únicamente CO<sub>2</sub>,

este gas obtenido a partir de estos residuos (lactosuero, pan y salvado) puede emplearse en la obtención de BioDME a partir del  $\text{CO}_2$  obtenido mediante un proceso catalítico con hidrógeno.

A continuación, se realiza un estudio de la influencia del lodo de depuradora como inóculo mediante el análisis de la producción y composición del biogás generado en esta co-digestión anaerobia.

#### 4.3.3.- Influencia del inóculo en la producción de biogás

En este apartado se presenta el estudio de la influencia en la producción de biogás generado al emplear lodo de depuradora como inóculo para llevar a cabo la co-digestión anaerobia con cada residuo. En las Tablas C.1-C.4 del Anexo C se presentan dichos datos de producción de biogás.

En la Figura 4.10 se muestran los valores experimentales obtenidos de la producción de biogás antes y después de reactivar el pH para el inóculo (lodo de depuradora) así como la curva de ajuste, con el fin de comparar tanto la producción como la composición del biogás producido al emplear únicamente inóculo en la biodigestión.

Al igual que el en caso de no utilizar inóculo todos los datos experimentales se ajustan a una ecuación del tipo [4.1] para antes de reactivar el pH y del tipo [4.2] luego de reactivar el pH.

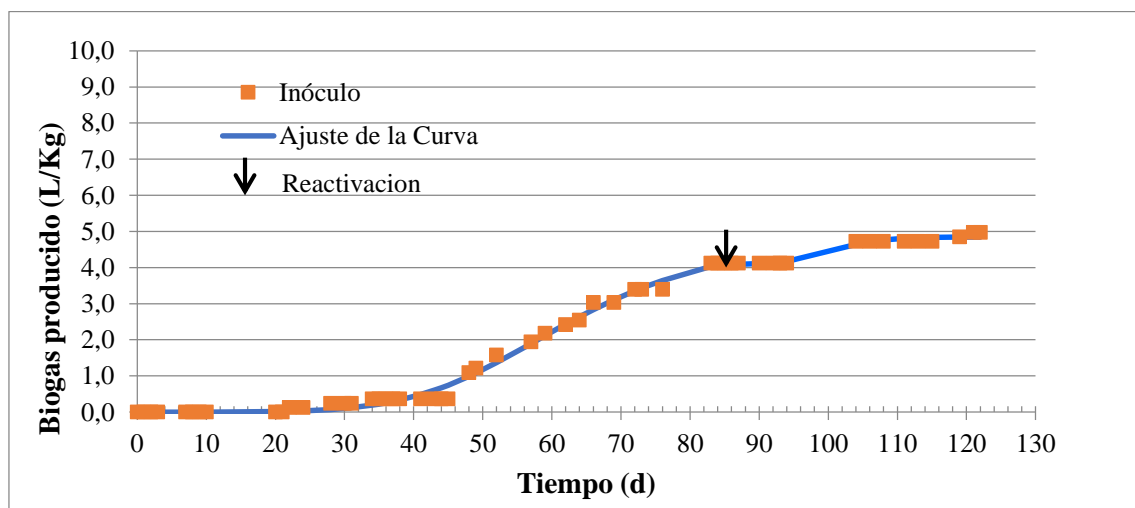


Figura 4.10.- Producción de biogás del inóculo "I" (antes y después de reactivación del pH)

Como se puede apreciar, durante los primeros 20 días de digestión anaerobia del inóculo no se observó producción de biogás, comenzando luego a generar de manera progresiva y con un incremento muy leve, ya que en 45 días tan solo había producido 0,36 L/kg de lodo, indicando un periodo de inducción muy largo. A partir de entonces la producción crece con una mayor velocidad obteniéndose 4,12 L/kg a los 85 días donde tuvo lugar la reactivación del pH. Al reactivar el pH se observó solo un pequeño aumento en la producción de biogás, alcanzando una producción total de 4,97 L/kg después de reactivar el pH.

En la Tabla 4.8 se presentan los coeficientes a, b, c y d de las ecuaciones del ajuste de los datos experimentales antes y después de reactivar el pH para el inóculo empleado.

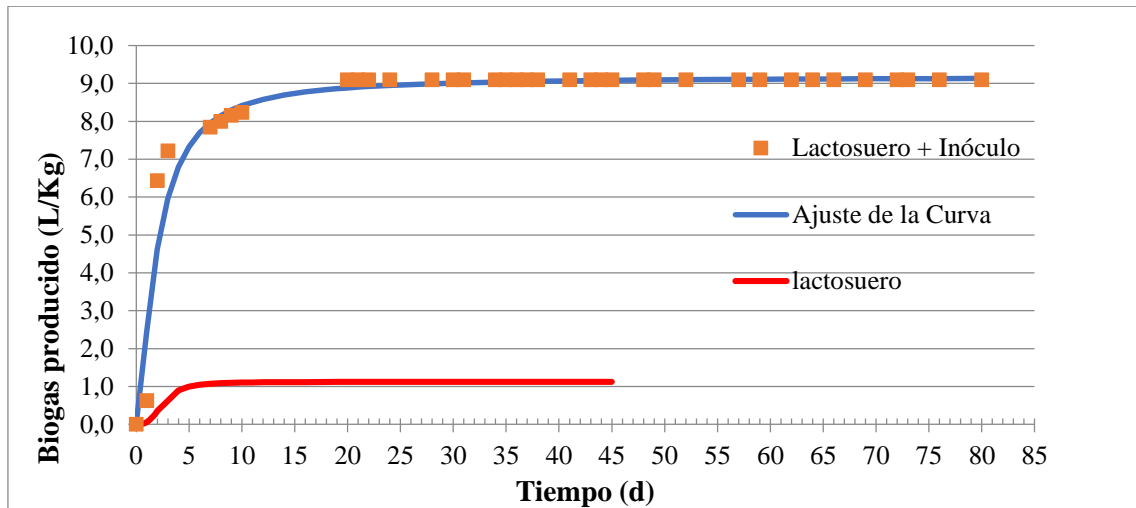
**Tabla 4.8.-** Parámetros de ajuste para el inóculo de co-digestión (antes y después de reactivación)

Residuo "Inóculo"	a	b	c	d
Antes de reactivación	4,884	62,1	-5,328	-
Después de reactivación	4,086	0,761	100,631	-30,643

A continuación, se muestra el estudio de la influencia de este inóculo (lodo de depuradora) sobre los residuos estudiados mediante la co-digestión anaerobia de los mismos.

#### 4.3.3.1- Estudio previo a la restitución del pH

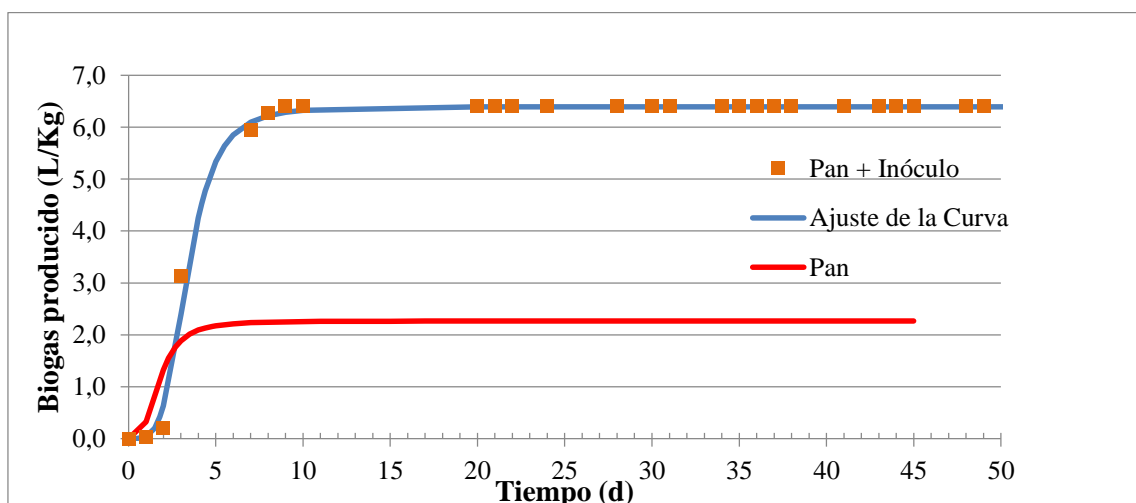
En este apartado se lleva a cabo una comparativa entre las producciones obtenidas de los residuos solos y con inóculo, con el fin de determinar la influencia de dicho inóculo en la producción de biogás, de la misma forma los datos experimentales se ajustan a una ecuación del tipo [4.1] para antes de reactivar el pH y del tipo [4.2] después de reactivar el pH, para todos los casos estudiados. Primero se presenta el estudio previo a la reactivación, comenzando por el lactosuero solo y el lactosuero + inóculo, los resultados obtenidos experimentalmente, así como el ajuste de ellos se muestra en la Figura 4.11.



**Figura 4.11.-** Producción de biogás del “L-I” (antes de reactivación por pH) y comparación con “L”

Se puede apreciar en ambos casos producción desde el inicio alcanzando la máxima producción entre el cuarto y quinto día de digestión y cómo, para este residuo, el inóculo favorece la digestión anaerobia, obteniéndose una producción mucho mayor (9,10 L/kg) frente a los 1,11 L/kg producidos por el Lactosuero solo, logrando aumentar la producción casi en 10 veces su valor.

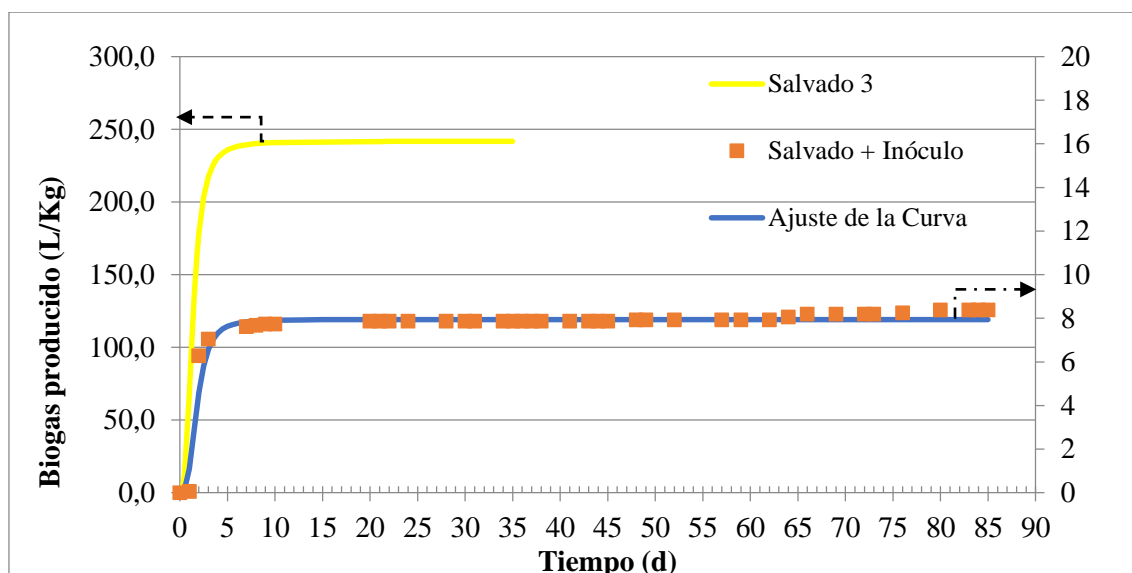
Por último, cabe destacar que una vez finalizada la producción, se dejó un plazo de tiempo bastante largo antes de llevar a cabo la restitución del pH, con el único motivo de estudiar su comportamiento ya que como vimos en el ensayo del “I” hicieron falta unos 45 días para producir biogás. De igual modo se procedió en los otros experimentos “P-I” (Figura 4.12) y “S-I” (Figura 4.13), que se muestran a continuación.



**Figura 4.12.-** Producción de biogás del residuo “P-I” (antes de reactivación por pH) y comparación con “P”



Tal y como se puede observar, la presencia del inóculo para este residuo también favorece la producción de biogás llegando incluso a triplicar la obtenida por el Pan solo, ya que se logra una producción de 6,41 L/kg al utilizar el inóculo frente a los 2,27 L/kg sin el inóculo.



**Figura 4.13.-** Producción de biogás del “S-I” (antes de reactivación por pH) y comparación con “S”

En el caso del Salvado se observó un comportamiento inverso a los anteriores en el que el inóculo inhibe la producción de biogás, viéndose claramente mermada por la presencia de este. La producción de biogás del “S-I” es de 8,38 L/kg, prácticamente despreciable si se compara con la obtenida por el salvado “S3” (241,71 L/kg).

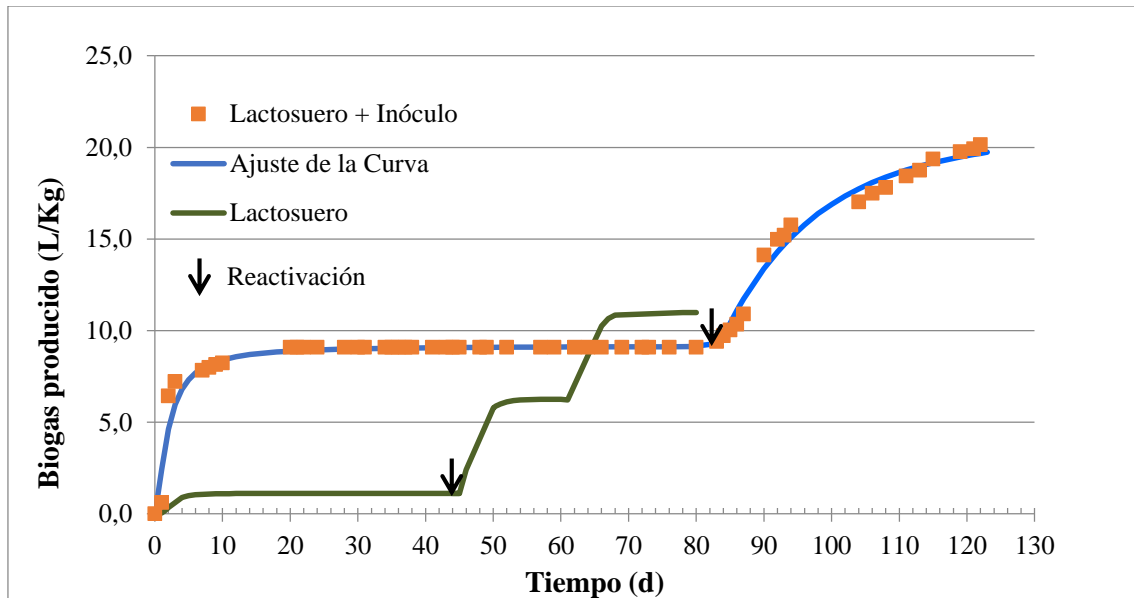
En la Tabla 4.9 se presentan los coeficientes a, b y c para las distintas mezclas de co-digestión estudiadas, correspondientes a los ajustes de los valores experimentales a la ecuación del tipo [4.1].

**Tabla 4.9.-** Parámetros de ajuste para las distintas mezclas de co-digestión (antes de reactivación)

Residuo	a	b	c
L-I	9,168	1,972	-1,844
P-I	6,395	3,396	-4,178
S-I	7,945	1,805	-3,111

#### 4.3.3.2- Producción de biogás con restitución del pH:

Una vez finalizada la producción de biogás se procede a la reactivación del pH de las muestras, y se procede a estudiar la producción de biogás correspondiente a cada una de ellas, comenzando dicho estudio por el Lactosuero + inóculo, tal y como se muestra a continuación en la Figura 4.14.

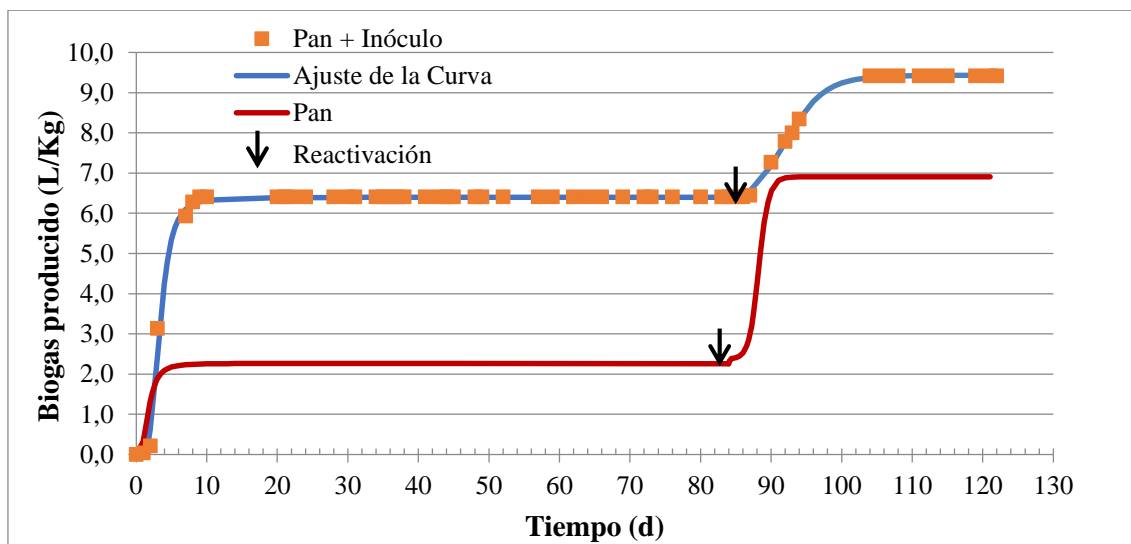


**Figura 4.14.-** Producción de biogás del “L-I” (antes y después de reactivación del pH) y comparación con “L”

Se observa como el inóculo favorece la producción de biogás también después de reactivar el pH alcanzándose una producción de biogás acumulada de 20,16 L/kg después de reactivación, siendo el doble de producción de biogás si se compara con el obtenido por el Lactosuero “L”, que fue de 10,98 L/kg.

Finalmente, podemos decir que la restitución por pH favorece en la producción de biogás tanto al utilizar el inóculo como sin él para este residuo.

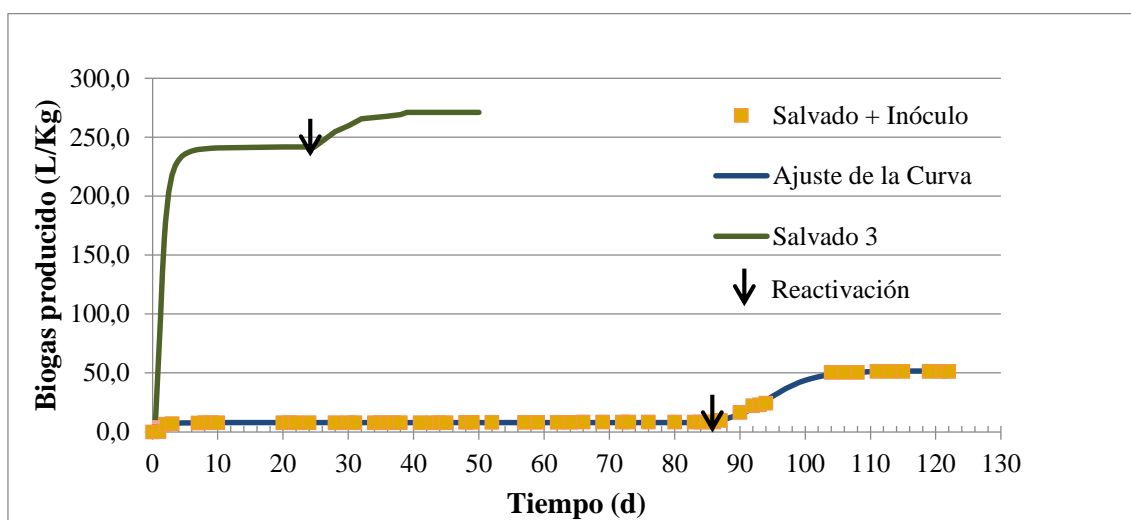
En la Figura 4.15 se presenta una comparación tanto de los valores experimentales como la curva de ajuste para el residuo Pan, con y sin inóculo, antes y después de reactivar el pH.



**Figura 4.15.-** Producción de biogás del residuo “P-I” (antes y después de reactivación del pH) y comparación con “P”

En este caso el inóculo también favorece la producción de biogás después de la reactivación, aunque en menor proporción que cuando no se utiliza inóculo. La producción final de biogás después de la restitución por pH en el caso del “P-I” es de 9,42 L/kg.

En cuanto al residuo Salvado en la Figura 4.16 se muestra el estudio de la influencia del inóculo presentándose una comparación de los valores experimentales y el ajuste, antes y después de reactivar el pH.



**Figura 4.16.-** Producción de biogás del “S-I” (antes y después de reactivación del pH) y comparación con “S3”

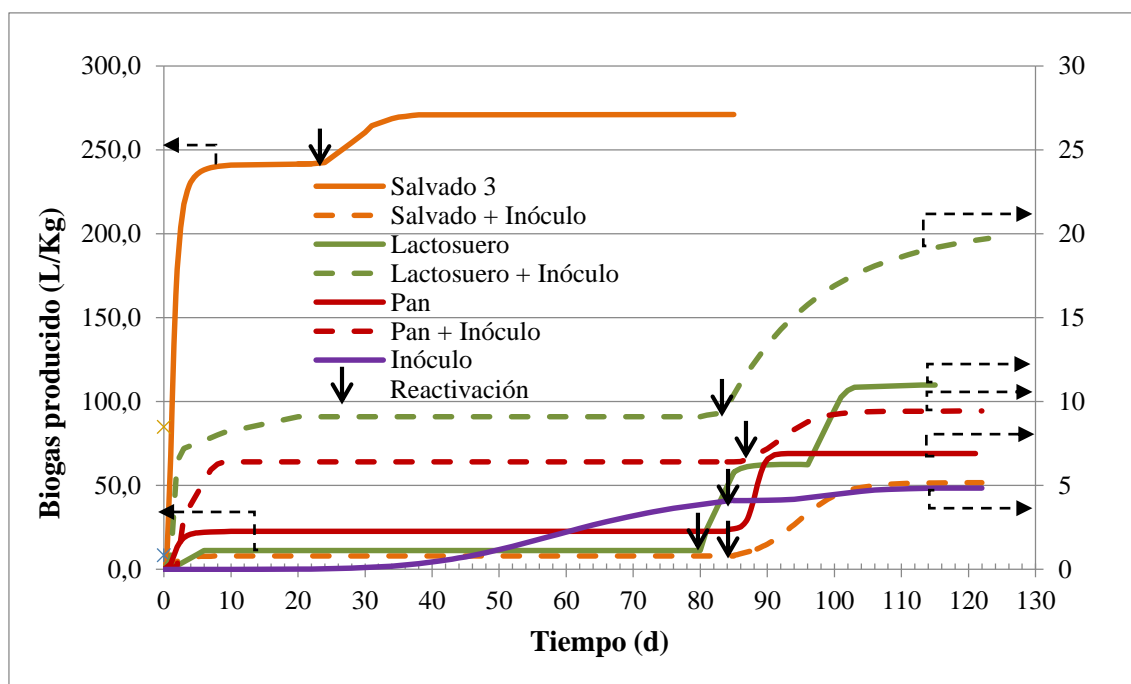
Tal y como se puede observar en el gráfico anterior, la presencia del inóculo después de la reactivación del pH favorece el incremento de la producción de biogás, ya que a pesar de que no se logra una producción tan alta como la obtenida sin inóculo, el incremento de ésta con respecto a la obtenida antes de reactivar es mayor observándose un aumento en la producción de biogás de 8,38 a 51,24 L/kg.

Todos los datos experimentales se ajustan a curvas del tipo mostrado en la ecuación [4.2] siendo los coeficientes a, b, c y d para las distintas mezclas de co-digestión estudiadas, los que se muestran a continuación en la Tabla 4.10.

**Tabla 4.10.-** Ajuste de parámetros para las distintas mezclas de co-digestión (después de reactivación)

Residuo	a	b	c	d
L-I	-98,210	119,016	58,798	-6,369
P-I	6,119	3,311	92,027	-93,493
S-I	6,467	45,120	94,686	-28,570

Finalmente, se presenta una comparativa de los experimentos llevados a cabo con los residuos solos y los de co-digestión con lodo de depuradora como inóculo en la Figura 4.17.



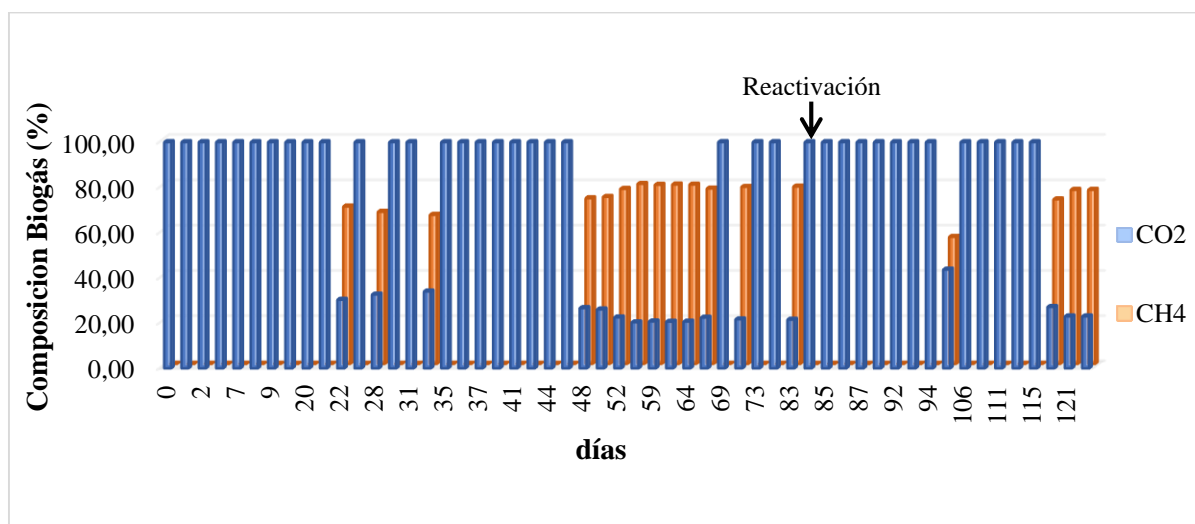
**Figura 4.17.-** Comparativa de todas las producciones de biogás (antes y después de reactivación por pH)

De esta figura se puede concluir que los experimentos con el salvado son los que presentan mejores resultados en cuanto de producción de biogás, obteniéndose una producción acumulada de 271 L/kg en el caso del salvado solo y 51,60 L/kg por parte del salvado + inóculo. A pesar de esto, tal y como se puede observar, se trata del único caso en el que la co-digestión empleando lodo de depuradora inhibe la producción de biogás. Para los demás casos, la presencia del inóculo favorece la producción, encontrándose un aumento tanto antes como después de reactivar el pH.

#### 4.3.4.- Influencia del inóculo en la composición del biogás

En las tres mezclas de co-digestión anaerobia la composición del gas producido es únicamente CO<sub>2</sub> durante el periodo de tiempo que tuvieron lugar los experimentos, indicando que el inóculo no influye en la composición del gas producido para estos residuos y que estos podrían ser utilizado para la producción de BioDME.

En cuanto al inóculo empleado (lodo de depuradora), los resultados de la composición del gas producido antes y después de reactivar el pH, en función del tiempo se muestran en la Figura 4.18.



**Figura 4.18.-** Composición del biogás producido por el inóculo "T" (antes y después de reactivación por pH)

Como se observa la composición de biogás producido por el inóculo es una mezcla de metano y dióxido de carbono, obteniéndose en los casos de mayor producción una cantidad de metano mayor del 50 %, incluso llega a ser del 80% en algunos casos,

indicándonos que la digestión del “lodo de depuradora solo” produce un biogás aprovechable energéticamente.

#### 4.4- Caracterización de los sólidos totales, fijos y volátiles después de la digestión

Finalmente, una vez finalizado el proceso de digestión anaerobia, indicado porque se detiene la producción de biogás después de la reactivación del pH, todas las muestras fueron caracterizadas midiendo la cantidad de sólidos totales (ST), fijos (SF) y volátiles (SV) y estos valores promedios comparados con los obtenidos de las muestras antes de la digestión anaerobia (Tabla 4.11). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla A.2 del Anexo A.

**Tabla 4.11.-** Análisis de sólidos totales, fijos y volátiles de las muestras antes y después de digestión anaerobia

MUESTRA	Iniciales			Finales			Reducción /aumento (% final vs % inicial)		
	% Sólidos totales (ST)	% Sólidos fijos (SF)	% Sólidos volátiles (SV)	% Sólidos totales (ST)	% Sólidos fijos (SF)	% Sólidos volátiles (SV)	% ST	% SF	% SV
100% L	8	19	81	-	-	-	-	-	-
100% P	60	4	96	15	35	65	-75	775	-32
100% S	89	9	91	6	37	63	-93	311	-31
100% I	4	28	72	3	36	64	-25	29	-11
35% L - 65% I	8	20	80	6	58	42	-25	190	-48
35% P - 65% I	40	12	88	15	75	25	-63	525	-72
48% S - 52% I	45	19	81	9	35	65	-80	84	-20

Al comparar los valores obtenidos se observa que prácticamente todos los residuos presentaron una menor cantidad de sólidos totales y volátiles, llegando incluso a reducirse hasta un 93% los ST en el caso del salvado. Para el caso del Lactosuero los valores de ST, SF y SV no pudieron ser medidos al finalizar la digestión.

También cabe destacar que tanto las mezclas L-I como P-I, después de la digestión anaerobia, presentan un menor porcentaje en sólidos volátiles (42% y 25% respectivamente) por lo que apenas podrían producir más biogás. En cambio, los demás residuos todavía mantienen un alto contenido en sólidos volátiles que ronda entre el 63-65%, lo que indica que todavía podrían continuar el proceso de digestión con el reajuste del pH. Esto podría indicar que la producción de biogás finaliza debido principalmente a la disminución del pH, que provoca la muerte de los microorganismos encargados de llevar a cabo la digestión anaerobia.

---

## *5.- CONCLUSIONES*

---





Como resultado de este estudio se ha llegado a las siguientes conclusiones:

Respecto a la cuantificación general de los residuos:

- La cantidad de residuos generados en Canarias de lactosuero (entre 78-100 millones de L/año) y restos de pan (2.200 t/año) parecen ser suficientes para justificar su aprovechamiento energético.
- En referencia al salvado, y a pesar de disponer de escasos datos de cuantificación, empresas grandes como “Harinalia” (en Tenerife) desecha aproximadamente 3 toneladas de salvado al año, por lo que puede convertirse en un residuo válido para llevar a cabo su valorización.
- En Canarias se generan alrededor de 25.500 t/año de lodo en materia seca, por lo que entre los distintos usos que se le puede dar (compost, abono, etc.) conviene también estudiar su empleo para la co-digestión anaerobia juntos con otros residuos.

En cuanto a las características de los residuos estudiados y sus respectivas producciones de biogás mediante digestión anaerobia cabe destacar:

- En el análisis de los sólidos totales y volátiles iniciales, el salvado presenta la mayor cantidad de sólidos totales (89,3%) y el Lactosuero el menor porcentaje (8%). En cuanto a sólidos volátiles todos los residuos presentan valores superiores al 80%.
- La mayor producción de biogás se obtiene a partir de la digestión anaerobia del salvado obteniéndose un total de aproximadamente 240 L/kg antes de reactivar el pH. La reactivación del pH para este residuo no genera un incremento notable en la producción de biogás (270 L/kg).
- La producción de biogás generada para los residuos Lactosuero y Pan son muy inferiores con respecto al salvado, obteniéndose 1,1 y 2,2 L/kg respectivamente antes de reactivar el pH. Para estos residuos la reactivación sí genera un incremento notable en la producción de biogás aumentando diez veces su cantidad para el Lactosuero y triplicándola para el residuo de Pan.

- En general, para los residuos estudiados, las producciones de biogás antes de la reactivación presentan un comportamiento que se ajusta a la ecuación del tipo:

$$P \text{ (L/kg)} = \frac{a}{1+(x/b)^c}$$

Y después de la reactivación:

$$P \text{ (L/kg)} = a + \frac{b}{1+(x/c)^d}$$

- La presencia de inóculo con el salvado inhiba la producción de biogás, obteniéndose una producción máxima de 51,24 L/kg después de la reactivación.
- En los residuos Lactosuero y Pan la presencia del inóculo incrementa de forma notable la producción de biogás, alcanzando valores de 20,16 L/kg para el Lactosuero y 9,42 L/kg para el residuo del Pan, después de reactivar.
- La composición del biogás producido con solo inóculo contiene hasta un máximo del 80% en metano, mientras que para todos los residuos, con y sin inóculo, solo se obtiene CO<sub>2</sub>, lo que los hace aptos para ser utilizados en la obtención de BioDME.
- Una vez finalizado el proceso de digestión anaerobia, la mayoría de los digestatos resultantes presentan un alto contenido en sólidos volátiles que varía entre el 63-65%, indicando que aún presentan materia para ser digerida.

Por último, se presentan algunas recomendaciones de cara a un mejor estudio para este Trabajo de Fin de Grado:

1. Realizar el estudio en un sistema de biodigestores capaz de mantener el pH constante.
2. Gestionar la captura de la cantidad de gas producido por el salvado (CO<sub>2</sub>) para poder utilizarla como fuente de alimentación en la obtención de BioDME, realizando previamente un análisis de composición más profundo para verificar su validez.
3. Estudiar la producción y composición de biogás de los mismos residuos mediante la co-digestión anaerobia con otro inóculo distinto como por ejemplo gallinaza, purines, etc.

## Conclusions:

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

Regarding the general quantification of waste:

- The amount of whey generated in the Canary Islands (between 78-100 million L / year) and bread remains (2,200 t / year) seem to be sufficient to justify its energy recovery.
- In reference to bran, and despite having little quantification data, large companies such as "Harinalia" (in Tenerife) discards approximately 3 tons of bran per year, so it can become a valid waste to carry out its valorisation.
- In the Canary Islands about 25,500 t / year of dried sludge are generated, so among the different uses that can be given to it (compost, fertilizer, etc.) it is also convenient to study its use for anaerobic co-digestion together with other waste.
- The production of biogas generated for the whey and bread residues are much lower compared to the bran, obtaining 1.1 and 2.2 L / kg respectively before reactivating the pH. For these waste the reactivation generates a notable increase in the production of biogas, increasing ten times its generation for the whey and tripling it for the bread residue.

Regarding the characteristics of the waste studied and their respective biogas production through anaerobic digestion, it is worth mentioning:

- In the analysis of the initial total and volatile solids, the bran presents the greatest amount of total solids (89.3%) and the whey has the lowest percentage (8%). As regards volatile solids, all the residues have values higher than 80%.
- The highest production of biogas is obtained for the anaerobic digestion of the bran obtaining a total of approximately 240 L / kg before reactivating the pH. The reactivation of the pH for this waste does not generate a notable increase in the production of biogas (270 L / kg).
- The production of biogas generated for the whey and bread residues are much lower compared to the bran, obtaining 1.1 and 2.2 L / kg respectively before reactivating the pH. For these residues the reactivation does generate a notable increase in the production of biogas, increasing ten times its amount for the whey and tripling it for the bread residue.

- In general, for all the waste studied, the biogas production before the reactivation shows a behaviour that could be adjusted to equations of the type:

$$P \text{ (L/kg)} = \frac{a}{1+(x/b)^c}$$

And after the reactivation:

$$P \text{ (L/kg)} = a + \frac{b}{1+(x/c)^d}$$

- The presence of inoculum in the bran inhibits the production of biogas, obtaining a maximum production of 51.24 L / kg after the reactivation.
- For the whey and bread residues, the presence of the inoculum significantly increases the biogas production after reactivation, reaching values of 20.16 L / kg for whey and 9.42 L / kg for bread residue.
- The composition of the biogas produced with only inoculum contains up to a maximum of 80% in methane, while for all the waste, with and without inoculum, only in CO<sub>2</sub> is obtained, which makes them suitable to be used in the production of BioDME
- Once the process of anaerobic digestion is completed, most of the resulting digestates have a high content of volatile solids that vary between 63-65%, indicating that they still have solid to be digested.

Finally, some recommendations for a better study for this TFG project are presented:

1. To carry out the study in a biodigester system capable of maintaining a constant pH.
2. To manage the capture of the amount of gas produced by the bran (CO<sub>2</sub>) to be able to use it as a feed in BioDME production, previously making a deeper composition analysis to verify its validity.
3. To study the biogas production and composition for anaerobic co-digestion of the same waste with different inocula such as poultry manure, slurry, etc.

---

## *6.- BIBLIOGRAFÍA*

---



**Agrowaste, (2013).** *Digestión Anaerobia*. Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y Alimentación, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Agrupal.

**Ainia, (2011).** *Valorización energética: producción de biogás mediante co-digestión anaerobia de residuos/subproductos orgánicos agroindustriales*. Parque Tecnológico de Valencia. Dpto. Calidad y Medio Ambiente.

**Álvarez C., (2009).** *Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional*.

**Dupuis I., (2015).** *Evaluación de subproductos agroalimentarios para la alimentación animal en Canarias: análisis geográfico, de viabilidad y desarrollo metodológico*. Gobierno de Canarias, Instituto de Investigaciones Agrarias.

**Ecoinventos, (2014).** *10 usos del CO2 que seguro no conocías*.

**Ecoticias, (2014).** *La captura de CO2 creará 250.000 empleos en España*.

**Irañeta J., Amorena A., Blázquez S., Jiménez J., (2013).** *Valoración agronómica del lodo de depuradora*. Parte I. Aspectos generales del lodo como fertilizante: tipos de lodo, legislación, calidad del producto, gestión. Navarra Agraria.

**Jarabo F., (1999).** *La energía de la biomasa*. Ed. Neografis S.L. Impresores

**Lede S., (2012).** *Biocombustibles*. ArgenBio. Consejo Argentino para la Información y el Desarrollo de la Biotecnología.

**Lorenzo Y., Obaya M<sup>a</sup> C., (2005).** *La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I*. Ciudad de La Habana, Cuba: Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA).

**Navarro R., (2016).** *Obtención de biogás a partir de residuos agrícolas y de producción de biodiesel*. ULL, San Cristóbal de la Laguna.

**Núñez M<sup>a</sup> J., García P., (2016).** *Biocombustibles: bioetanol y biodiesel*. Departamento de Ingeniería Química, ETSE, Universidad de Santiago de Compostela.

**Palau C V., (2012).** *Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Valencia.

**Pascual A., Ruiz B., Gómez P., Flotats X., Fernández B., (2011).** *Situación y potencial de generación de Biogás*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDAE.

**Saval S., (2012).** *Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro*. *Biotecnología*, Vol. 16, No. 2, 17.

**Varnero M<sup>a</sup> T., (2011).** *Manual de Biogás*. Gobierno de Chile Ministerio de Energía, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility.

**Varnero M<sup>a</sup> T., Carú M., Galleguillos K., Achondo P., (2011).** *Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, AGRIMED.



---

## *7.- ANEXOS*

---



## ANEXO A

En este anexo se presentan en las Tablas A.1 y A.2 los resultados obtenidos en cuanto a los análisis de sólidos totales, fijos y volátiles, antes y después de la digestión anaerobia

**Tabla A.1.-** Análisis de sólidos totales, fijos y volátiles antes de digestión anaerobia

MUESTRA	Crisoles	Peso crisol	Peso Crisol + muestra	Peso Muestra (inicial)	Crisol + muestra luego de calentar (100 °C)	Peso Muestra luego de calentar (100 °C)	Crisol + muestra luego de calentar (500 °C)	Peso Muestra luego de calentar (500 °C)	Sólidos Totales (ST)	Sólidos Volátiles (SV)	Sólidos Fijos (SF)
LACTOSUERO	1	12,54 g	14,56 g	2,02 g	12,70 g	0,16 g	12,58 g	0,04 g	8%	75%	25%
	2	12,47 g	14,48 g	2,01 g	12,62 g	0,15 g	12,49 g	0,02 g	7%	87%	13%
	3	12,71 g	14,74 g	2,03 g	12,87 g	0,16 g	12,74 g	0,03 g	8%	81%	19%
	Media	12,57 g	14,59 g	2,02 g	12,73 g	0,16 g	12,60 g	0,03 g	8%	81%	19%
	1	5,682 g	8,682 g	3,000 g	5,772 g	0,90 g	5,708 g	0,26 g	3%	71%	29%
	2	3,275 g	5,276 g	2,001 g	3,367 g	0,92 g	3,300 g	0,25 g	5%	73%	27%
LDDO	Media	44,79 g	69,79 g	25,01 g	45,70 g	0,91 g	45,04 g	0,25 g	4%	72%	28%
	1	12,35 g	13,35 g	1,00 g	13,25 g	0,90 g	12,43 g	0,08 g	90%	91%	9%
	2	12,46 g	13,46 g	1,00 g	13,35 g	0,89 g	12,54 g	0,08 g	89%	91%	9%
	3	11,18 g	12,18 g	1,00 g	12,07 g	0,89 g	11,26 g	0,08 g	89%	91%	9%
	Media	12,00 g	13,00 g	1,00 g	12,89 g	0,89 g	12,08 g	0,08 g	89%	91%	9%
	1	82,73 g	102,73 g	20,00 g	94,67 g	11,94 g	83,21 g	0,48 g	60%	96%	4%
PAN	2	13,651 g	15,652 g	20,01 g	14,852 g	12,01 g	13,692 g	0,41 g	60%	97%	3%
	Media	109,62 g	129,63 g	20,01 g	121,60 g	11,98 g	110,07 g	0,44 g	60%	96%	4%

Tabla A.2.- Análisis de sólidos totales, fijos y volátiles después de digestión anaerobia

MUESTRA	Crisoles	Peso crisol	Peso Crisol + muestra	Peso Muestra (final)	Crisol + muestra luego de calentar (100 °C)	Peso Muestra luego de calentar (100 °C)	Crisol + muestra luego de calcinar (500 °C)	Peso Muestra luego de calcinar (500 °C)	Sólidos Totales (ST)	Sólidos Volátiles (SV)	Sólidos Fijos (SF)
LACTOSUERO + LODO	1	1818 g	2325 g	5,07 g	1847 g	0,29 g	1835 g	0,17 g	6%	41%	59%
	2	2093 g	2598 g	5,05 g	2121 g	0,28 g	2109 g	0,16 g	6%	43%	57%
	Media	1956 g	2462 g	5,06 g	1984 g	0,29 g	1972 g	0,17 g	6%	42%	58%
	1	2058 g	2564 g	5,06 g	2136 g	0,78 g	2077 g	0,19 g	15%	76%	24%
	2	2063 g	2571 g	5,08 g	2142 g	0,79 g	2083 g	0,20 g	16%	75%	25%
	Media	2061 g	2568 g	5,07 g	2139 g	0,79 g	2080 g	0,20 g	15%	75%	25%
PAN+LODO	1	1235 g	1737 g	5,02 g	1252 g	0,17 g	1241 g	0,06 g	3%	65%	35%
	2	1270 g	1778 g	5,08 g	1286 g	0,16 g	1276 g	0,06 g	3%	62%	38%
	Media	1253 g	1758 g	5,05 g	1269 g	0,17 g	1259 g	0,06 g	3%	64%	36%
	1	1086 g	1592 g	5,06 g	1130 g	0,44 g	1104 g	0,18 g	9%	59%	41%
	2	1254 g	1758 g	5,04 g	1298 g	0,44 g	1272 g	0,18 g	9%	59%	41%
	Media	1170 g	1675 g	5,05 g	1214 g	0,44 g	1188 g	0,18 g	9%	59%	41%
SALVADO+LODO	1	1165 g	1671 g	5,06 g	1242 g	0,77 g	1192 g	0,27 g	15%	65%	35%
	2	1118 g	1625 g	5,07 g	1196 g	0,78 g	1145 g	0,27 g	15%	65%	35%
	Media	1142 g	1648 g	5,07 g	1219 g	0,78 g	1169 g	0,27 g	15%	65%	35%
	1	1270 g	1783 g	5,13 g	1304 g	0,34 g	1282 g	0,12 g	7%	65%	35%
	2	1305 g	1810 g	5,05 g	1333 g	0,28 g	1316 g	0,11 g	6%	61%	39%
	Media	1288 g	1797 g	5,09 g	1319 g	0,31 g	1299 g	0,12 g	6%	63%	37%
PAN	1	1165 g	1671 g	5,06 g	1242 g	0,77 g	1192 g	0,27 g	15%	65%	35%
	2	1118 g	1625 g	5,07 g	1196 g	0,78 g	1145 g	0,27 g	15%	65%	35%
	Media	1142 g	1648 g	5,07 g	1219 g	0,78 g	1169 g	0,27 g	15%	65%	35%
	1	1270 g	1783 g	5,13 g	1304 g	0,34 g	1282 g	0,12 g	7%	65%	35%
	2	1305 g	1810 g	5,05 g	1333 g	0,28 g	1316 g	0,11 g	6%	61%	39%
	Media	1288 g	1797 g	5,09 g	1319 g	0,31 g	1299 g	0,12 g	6%	63%	37%
SALVADO	1	1270 g	1783 g	5,13 g	1304 g	0,34 g	1282 g	0,12 g	7%	65%	35%
	2	1305 g	1810 g	5,05 g	1333 g	0,28 g	1316 g	0,11 g	6%	61%	39%
	Media	1288 g	1797 g	5,09 g	1319 g	0,31 g	1299 g	0,12 g	6%	63%	37%
	1	1270 g	1783 g	5,13 g	1304 g	0,34 g	1282 g	0,12 g	7%	65%	35%
	2	1305 g	1810 g	5,05 g	1333 g	0,28 g	1316 g	0,11 g	6%	61%	39%
	Media	1288 g	1797 g	5,09 g	1319 g	0,31 g	1299 g	0,12 g	6%	63%	37%

**ANEXO B**

En este anexo se presentan los datos de producción y composición de biogás de los distintos residuos puros empleados para el estudio de este TFG.

**Tabla B.1.-** Producción y composición del biogás de “L” antes y después de reactivación

Volumen GAS			Gas acumulado (L/Kg)	CALIDAD		Días
Volumen Producido	Vp (L/kg)	Volumen Acumulado		%CO <sub>2</sub>	%CH <sub>4</sub>	
0,00 ml	0,00	0,00 ml	0,00	100,00	0,00	0
6,67 ml	0,22	6,67 ml	0,22	100,00	0,00	1
0,00 ml	0,00	6,67 ml	0,22	100,00	0,00	2
20,00 ml	0,67	26,67 ml	0,89	100,00	0,00	5
6,67 ml	0,22	33,33 ml	1,11	100,00	0,00	6
0,00 ml	0,00	33,33 ml	1,11	100,00	0,00	7
0,00 ml	0,00	33,33 ml	1,11	100,00	0,00	9
0,00 ml	0,00	33,33 ml	1,11	100,00	0,00	13
<b>REACTIVACIÓN</b>						
40,00 ml	1,33	73,33 ml	2,44	100,00	0,00	15
93,33 ml	3,11	166,67 ml	5,56	100,00	0,00	19
20,00 ml	0,67	186,67 ml	6,22	100,00	0,00	20
0,00 ml	0,00	186,67 ml	6,22	100,00	0,00	21
0,00 ml	0,00	186,67 ml	6,22	100,00	0,00	22
0,00 ml	0,00	186,67 ml	6,22	100,00	0,00	23
0,00 ml	0,00	186,67 ml	6,22	100,00	0,00	26
0,00 ml	0,00	186,67 ml	6,22	100,00	0,00	27
0,00 ml	0,00	186,67 ml	6,22	100,00	0,00	28
0,00 ml	0,00	186,67 ml	6,22	100,00	0,00	29
0,00 ml	0,00	186,67 ml	6,22	100,00	0,00	30
100,00 ml	3,33	286,67 ml	9,56	100,00	0,00	34
13,33 ml	0,44	300,00 ml	10,00	100,00	0,00	35
26,67 ml	0,89	326,67 ml	10,89	100,00	0,00	36
0,00 ml	0,00	326,67 ml	10,89	100,00	0,00	37
0,00 ml	0,00	326,67 ml	10,89	100,00	0,00	47
0,00 ml	0,00	326,67 ml	10,89	100,00	0,00	48

0,00 ml	0,00	326,67 ml	10,89	100,00	0,00	49
0,00 ml	0,00	326,67 ml	10,89	100,00	0,00	51

**Tabla B.2.-** Producción y composición del biogás de “P” antes y después de reactivación

Volumen GAS				CALIDAD		Días
Volumen Producido	Vp (L/kg)	Volumen Acumulado	Gas acumulado (L/Kg)	%CO <sub>2</sub>	%CH <sub>4</sub>	
0,00 ml	0,00	0,00 ml	0,00	100,00	0,00	0
26,67 ml	0,27	26,67 ml	0,27	100,00	0,00	1
113,33 ml	1,13	140,00 ml	1,40	100,00	0,00	2
40,00 ml	0,40	180,00 ml	1,80	100,00	0,00	3
46,67 ml	0,47	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	13
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	14
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	15
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	17
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	21
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	23
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	24
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	27
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	28
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	29
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	30
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	31
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	34
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	36
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	37
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	38
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	41
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	42
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	45
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	50
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	52
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	55
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	57

0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	59
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	62
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	65
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	66
0,00 ml	0,00	226,67 ml	2,27	100,00	0,00	69
13,33 ml	0,13	240,00 ml	2,40	100,00	0,00	73
0,00 ml	0,00	240,00 ml	2,40	100,00	0,00	76
0,00 ml	0,00	240,00 ml	2,40	100,00	0,00	77
0,00 ml	0,00	240,00 ml	2,40	100,00	0,00	78
<b>REACTIVACIÓN</b>						
6,67 ml	0,07	246,67 ml	2,47	100,00	0,00	79
0,00 ml	0,00	246,67 ml	2,47	100,00	0,00	80
333,33 ml	3,33	580,00 ml	5,80	100,00	0,00	83
93,33 ml	0,93	673,33 ml	6,73	100,00	0,00	85
6,67 ml	0,07	680,00 ml	6,80	100,00	0,00	86
0,00 ml	0,00	680,00 ml	6,80	100,00	0,00	87
13,33 ml	0,13	693,33 ml	6,93	100,00	0,00	97
0,00 ml	0,00	693,33 ml	6,93	100,00	0,00	99
0,00 ml	0,00	693,33 ml	6,93	100,00	0,00	101
0,00 ml	0,00	693,33 ml	6,93	100,00	0,00	104
0,00 ml	0,00	693,33 ml	6,93	100,00	0,00	106
0,00 ml	0,00	693,33 ml	6,93	100,00	0,00	108
0,00 ml	0,00	693,33 ml	6,93	100,00	0,00	112
0,00 ml	0,00	693,33 ml	6,93	100,00	0,00	114
0,00 ml	0,00	693,33 ml	6,93	100,00	0,00	115

Tabla B.3(a). - Producción y composición del biogás "S1" antes de reactivación

Volumen GAS				CALIDAD		Días
Volumen Producido	Vp (L/kg)	Volumen Acumulado	Gas acumulado (L/Kg)	%CO <sub>2</sub>	%CH <sub>4</sub>	
0,00 ml	0,00	0,00 ml	0,00	100,00	0,00	0
1.373,33 ml	27,47	1.373,33 ml	27,47	100,00	0,00	1
800,00 ml	16,00	2.173,33 ml	43,47	100,00	0,00	2
93,33 ml	1,87	2.266,67 ml	45,33	100,00	0,00	3
40,00 ml	0,80	2.306,67 ml	46,13	100,00	0,00	7

26,67 ml	0,53	2.333,33 ml	46,67	100,00	0,00	8
26,67 ml	0,53	2.360,00 ml	47,20	100,00	0,00	9
26,67 ml	0,53	2.386,67 ml	47,73	100,00	0,00	10
206,67 ml	4,13	2.593,33 ml	51,87	100,00	0,00	20
46,67 ml	0,93	2.640,00 ml	52,80	100,00	0,00	21
153,33 ml	3,07	2.793,33 ml	55,87	100,00	0,00	22
266,67 ml	5,33	3.060,00 ml	61,20	100,00	0,00	24
46,67 ml	0,93	3.106,67 ml	62,13	100,00	0,00	28
13,33 ml	0,27	3.120,00 ml	62,40	100,00	0,00	30
0,00 ml	0,00	3.120,00 ml	62,40	100,00	0,00	31
13,33 ml	0,27	3.133,33 ml	62,67	100,00	0,00	34
13,33 ml	0,27	3.146,67 ml	62,93	100,00	0,00	35
0,00 ml	0,00	3.146,67 ml	62,93	100,00	0,00	36
6,67 ml	0,13	3.153,33 ml	63,07	100,00	0,00	37
0,00 ml	0,00	3.153,33 ml	63,07	100,00	0,00	38
0,00 ml	0,00	3.153,33 ml	63,07	100,00	0,00	41
13,33 ml	0,27	3.166,67 ml	63,33	100,00	0,00	43
0,00 ml	0,00	3.166,67 ml	63,33	100,00	0,00	44
0,00 ml	0,00	3.166,67 ml	63,33	100,00	0,00	45
26,67 ml	0,53	3.193,33 ml	63,87	100,00	0,00	48
0,00 ml	0,00	3.193,33 ml	63,87	100,00	0,00	49
0,00 ml	0,00	3.193,33 ml	63,87	100,00	0,00	52
26,67 ml	0,53	3.220,00 ml	64,40	100,00	0,00	57
6,67 ml	0,13	3.226,67 ml	64,53	100,00	0,00	59
0,00 ml	0,00	3.226,67 ml	64,53	100,00	0,00	62
26,67 ml	0,53	3.253,33 ml	65,07	100,00	0,00	64
20,00 ml	0,40	3.273,33 ml	65,47	100,00	0,00	66
0,00 ml	0,00	3.273,33 ml	65,47	100,00	0,00	69
40,00 ml	0,80	3.313,33 ml	66,27	100,00	0,00	72
6,67 ml	0,13	3.320,00 ml	66,40	100,00	0,00	73
20,00 ml	0,40	3.340,00 ml	66,80	100,00	0,00	76
53,33 ml	1,07	3.393,33 ml	67,87	100,00	0,00	80
0,00 ml	0,00	3.393,33 ml	67,87	100,00	0,00	83
0,00 ml	0,00	3.393,33 ml	67,87	100,00	0,00	84
<b>REACTIVACIÓN</b>						



0,00 ml	0,00	3.393,33 ml	67,87	100,00	0,00	85
6,67 ml	0,13	3.400,00 ml	68,00	100,00	0,00	86
6,67 ml	0,13	3.406,67 ml	68,13	100,00	0,00	87
40,00 ml	0,80	3.446,67 ml	68,93	100,00	0,00	90
33,33 ml	0,67	3.480,00 ml	69,60	100,00	0,00	92
26,67 ml	0,53	3.506,67 ml	70,13	100,00	0,00	93
40,00 ml	0,80	3.546,67 ml	70,93	100,00	0,00	94
160,00 ml	3,20	3.706,67 ml	74,13	100,00	0,00	104
40,00 ml	0,80	3.746,67 ml	74,93	100,00	0,00	106
0,00 ml	0,00	3.746,67 ml	74,93	100,00	0,00	108
53,33 ml	1,07	3.800,00 ml	76,00	100,00	0,00	111
20,00 ml	0,40	3.820,00 ml	76,40	100,00	0,00	113
46,67 ml	0,93	3.866,67 ml	77,33	100,00	0,00	115
80,00 ml	1,60	3.946,67 ml	78,93	100,00	0,00	119
26,67 ml	0,53	3.973,33 ml	79,47	100,00	0,00	121
20,00 ml	0,40	3.993,33 ml	79,87	100,00	0,00	122

Tabla B.3(b).- Producción y composición del biogás "S2" antes de reactivación

Volumen GAS			Gas acumulado (L/Kg)	CALIDAD		Días
Volumen Producido	Vp (L/kg)	Volumen Acumulado		%CO <sub>2</sub>	%CH <sub>4</sub>	
0,00 ml	0,00	0,00 ml	0,00	100,00	0,00	0
1.686,67 ml	33,73	1.686,67 ml	33,73	100,00	0,00	1
4.333,33 ml	86,67	6.020,00 ml	120,40	100,00	0,00	2
1.000,00 ml	20,00	7.020,00 ml	140,40	100,00	0,00	3
33,33 ml	0,67	7.053,33 ml	141,07	100,00	0,00	6
0,00 ml	0,00	7.053,33 ml	141,07	100,00	0,00	7
0,00 ml	0,00	7.053,33 ml	141,07	100,00	0,00	8
0,00 ml	0,00	7.053,33 ml	141,07	100,00	0,00	9
0,00 ml	0,00	7.053,33 ml	141,07	100,00	0,00	10
0,00 ml	0,00	7.053,33 ml	141,07	100,00	0,00	13
0,00 ml	0,00	7.053,33 ml	141,07	100,00	0,00	15
0,00 ml	0,00	7.053,33 ml	141,07	100,00	0,00	16
0,00 ml	0,00	7.053,33 ml	141,07	100,00	0,00	17

0,00 ml	0,00	7.053,33 ml	141,07	100,00	0,00	27
120,00 ml	2,40	7.173,33 ml	143,47	100,00	0,00	29
346,67 ml	6,93	7.520,00 ml	150,40	100,00	0,00	31
386,67 ml	7,73	7.906,67 ml	158,13	100,00	0,00	34
186,67 ml	3,73	8.093,33 ml	161,87	100,00	0,00	36
186,67 ml	3,73	8.280,00 ml	165,60	100,00	0,00	38
306,67 ml	6,13	8.586,67 ml	171,73	100,00	0,00	42
200,00 ml	4,00	8.786,67 ml	175,73	100,00	0,00	44
273,33 ml	5,47	9.060,00 ml	181,20	100,00	0,00	45

**Tabla B.3(c).** - Producción y composición del biogás “S3” antes y después de reactivación

Volumen GAS				CALIDAD		Días
Volumen Producido	Vp (L/kg)	Volumen Acumulado	Gas acumulado (L/Kg)	%CO <sub>2</sub>	%CH <sub>4</sub>	
0,00 ml	0,00	0,00 ml	0,00	100,00	0,00	0
1.546,67 ml	30,93	1.546,67 ml	30,93	100,00	0,00	1
2.940,00 ml	58,80	4.486,67 ml	89,73	100,00	0,00	2
7.386,67 ml	147,73	11.873,33 ml	237,47	100,00	0,00	3
73,33 ml	1,47	11.946,67 ml	238,93	100,00	0,00	4
0,00 ml	0,00	11.946,67 ml	238,93	100,00	0,00	7
0,00 ml	0,00	11.946,67 ml	238,93	100,00	0,00	9
0,00 ml	0,00	11.946,67 ml	238,93	100,00	0,00	10
0,00 ml	0,00	11.946,67 ml	238,93	100,00	0,00	11
13,33 ml	0,27	11.960,00 ml	239,20	100,00	0,00	21
0,00 ml	0,00	11.960,00 ml	239,20	100,00	0,00	23
<b>REACTIVACIÓN</b>						
166,67 ml	3,33	12.126,67 ml	242,53	100,00	0,00	25
606,67 ml	12,13	12.733,33 ml	254,67	100,00	0,00	28
240,00 ml	4,80	12.973,33 ml	259,47	100,00	0,00	30
306,67 ml	6,13	13.280,00 ml	265,60	100,00	0,00	32
106,67 ml	2,13	13.386,67 ml	267,73	100,00	0,00	36
66,67 ml	1,33	13.453,33 ml	269,07	100,00	0,00	38
93,33 ml	1,87	13.546,67 ml	270,93	100,00	0,00	39

## ANEXO C

En el presente anexo se muestran los correspondientes análisis de producción y composición del inóculo empleado, así como de las mezclas de co-digestión.

**Tabla C.1.-** Producción y composición del biogás de “T” antes y después de reactivación

Volumen GAS			Gas acumulado (L/Kg)	CALIDAD		Días
Volumen Producido	Vp (L/kg)	Volumen Acumulado		%CO <sub>2</sub>	%CH <sub>4</sub>	
0,00 ml	0,00	0,00 ml	0,00	100,00	0,00	0
0,00 ml	0,00	0,00 ml	0,00	100,00	0,00	1
0,00 ml	0,00	0,00 ml	0,00	100,00	0,00	2
0,00 ml	0,00	0,00 ml	0,00	100,00	0,00	3
0,00 ml	0,00	0,00 ml	0,00	100,00	0,00	7
0,00 ml	0,00	0,00 ml	0,00	100,00	0,00	8
0,00 ml	0,00	0,00 ml	0,00	100,00	0,00	9
0,00 ml	0,00	0,00 ml	0,00	100,00	0,00	10
0,00 ml	0,00	0,00 ml	0,00	100,00	0,00	20
0,00 ml	0,00	0,00 ml	0,00	100,00	0,00	21
6,67 ml	0,12	6,67 ml	0,12	30,37	69,63	22
0,00 ml	0,00	6,67 ml	0,12	100,00	0,00	24
6,67 ml	0,12	13,33 ml	0,24	32,70	67,30	28
0,00 ml	0,00	13,33 ml	0,24	100,00	0,00	30
0,00 ml	0,00	13,33 ml	0,24	100,00	0,00	31
6,67 ml	0,12	20,00 ml	0,36	34,05	65,95	34
0,00 ml	0,00	20,00 ml	0,36	100,00	0,00	35
0,00 ml	0,00	20,00 ml	0,36	100,00	0,00	36
0,00 ml	0,00	20,00 ml	0,36	100,00	0,00	37
0,00 ml	0,00	20,00 ml	0,36	100,00	0,00	38
0,00 ml	0,00	20,00 ml	0,36	100,00	0,00	41
0,00 ml	0,00	20,00 ml	0,36	100,00	0,00	43
0,00 ml	0,00	20,00 ml	0,36	100,00	0,00	44
0,00 ml	0,00	20,00 ml	0,36	100,00	0,00	45
40,00 ml	0,73	60,00 ml	1,09	26,71	73,29	48
6,67 ml	0,12	66,67 ml	1,21	26,12	73,88	49

20,00 ml	0,36	86,67 ml	1,58	22,59	77,41	52
20,00 ml	0,36	106,67 ml	1,94	20,4	79,60	57
13,33 ml	0,24	120,00 ml	2,18	20,79	79,21	59
13,33 ml	0,24	133,33 ml	2,42	20,67	79,33	62
6,67 ml	0,12	140,00 ml	2,55	20,71	79,29	64
26,67 ml	0,48	166,67 ml	3,03	22,46	77,54	66
0,00 ml	0,00	166,67 ml	3,03	100	0,00	69
20,00 ml	0,36	186,67 ml	3,39	21,72	78,28	72
0,00 ml	0,00	186,67 ml	3,39	100	0,00	73
0,00 ml	0,00	186,67 ml	3,39	100	0,00	76
40,00 ml	0,73	226,67 ml	4,12	21,58	78,42	83
0,00 ml	0,00	226,67 ml	4,12	100	0,00	84
0,00 ml	0,00	226,67 ml	4,12	100	0,00	85
<b>REACTIVACIÓN</b>						
0,00 ml	0,00	226,67 ml	4,12	100	0,00	86
0,00 ml	0,00	226,67 ml	4,12	100	0,00	87
0,00 ml	0,00	226,67 ml	4,12	100	0,00	90
0,00 ml	0,00	226,67 ml	4,12	100	0,00	92
0,00 ml	0,00	226,67 ml	4,12	100	0,00	93
0,00 ml	0,00	226,67 ml	4,12	100	0,00	94
33,33 ml	0,61	260,00 ml	4,73	43,77	56,23	104
0,00 ml	0,00	260,00 ml	4,73	100	0,00	106
0,00 ml	0,00	260,00 ml	4,73	100	0,00	108
0,00 ml	0,00	260,00 ml	4,73	100	0,00	111
0,00 ml	0,00	260,00 ml	4,73	100	0,00	113
0,00 ml	0,00	260,00 ml	4,73	100	0,00	115
6,67 ml	0,12	266,67 ml	4,85	27,22	72,78	119
6,67 ml	0,12	273,33 ml	4,97	23,02	76,98	121
0,00 ml	0,00	273,33 ml	4,97	23,02	76,98	122

Tabla C.2.- Producción y composición del biogás de “L-I” antes y después de reactivación

Volumen GAS			Gas acumulado (L/Kg)	CALIDAD		Días
Volumen Producido (ml)	Vp (L/kg)	Volumen Acumulado (ml)		%CO <sub>2</sub>	%CH <sub>4</sub>	
0,00 ml	0,00	0,00 ml	0,00	100,00	0,00	0
53,33 ml	0,63	53,33 ml	0,63	100,00	0,00	1
493,33 ml	5,80	546,67 ml	6,43	100,00	0,00	2
66,67 ml	0,78	613,33 ml	7,22	100,00	0,00	3
53,33 ml	0,63	666,67 ml	7,84	100,00	0,00	7
13,33 ml	0,16	680,00 ml	8,00	100,00	0,00	8
13,33 ml	0,16	693,33 ml	8,16	100,00	0,00	9
6,67 ml	0,08	700,00 ml	8,24	100,00	0,00	10
73,33 ml	0,86	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	20
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	21
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	22
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	24
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	28
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	30
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	31
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	34
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	35
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	36
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	37
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	38
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	41
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	43
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	44
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	45
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	48
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	49
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	52
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	57
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	59
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	62

0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	64
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	66
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	69
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	72
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	73
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	76
0,00 ml	0,00	773,33 ml	9,10	100,00	0,00	80
<b>REACTIVACIÓN</b>						
26,67 ml	0,31	800,00 ml	9,41	100,00	0,00	83
26,67 ml	0,31	826,67 ml	9,73	100,00	0,00	84
26,67 ml	0,31	853,33 ml	10,04	100,00	0,00	85
26,67 ml	0,31	880,00 ml	10,35	100,00	0,00	86
46,67 ml	0,55	926,67 ml	10,90	100,00	0,00	87
273,33 ml	3,22	1.200,00 ml	14,12	100,00	0,00	90
73,33 ml	0,86	1.273,33 ml	14,98	100,00	0,00	92
20,00 ml	0,24	1.293,33 ml	15,22	100,00	0,00	93
46,67 ml	0,55	1.340,00 ml	15,76	100,00	0,00	94
106,67 ml	1,25	1.446,67 ml	17,02	100,00	0,00	104
40,00 ml	0,47	1.486,67 ml	17,49	100,00	0,00	106
26,67 ml	0,31	1.513,33 ml	17,80	100,00	0,00	108
53,33 ml	0,63	1.566,67 ml	18,43	100,00	0,00	111
26,67 ml	0,31	1.593,33 ml	18,75	100,00	0,00	113
53,33 ml	0,63	1.646,67 ml	19,37	100,00	0,00	115
33,33 ml	0,39	1.680,00 ml	19,76	100,00	0,00	119
13,33 ml	0,16	1.693,33 ml	19,92	100,00	0,00	121
20,00 ml	0,24	1.713,33 ml	20,16	100,00	0,00	122

**Tabla C.3.-** Producción y composición del biogás “P-I” antes y después de reactivación

Volumen GAS			Gas acumulado (L/Kg)	CALIDAD		Días
Volumen Producido	Vp (L/kg)	Volumen Acumulado		%CO <sub>2</sub>	%CH <sub>4</sub>	
0,00 ml	0,00	0,00 ml	0,00	100,00	0,00	0
6,67 ml	0,04	6,67 ml	0,04	100,00	0,00	1
26,67 ml	0,17	33,33 ml	0,22	100,00	0,00	2

453,33 ml	2,92	486,67 ml	3,14	100,00	0,00	3
433,33 ml	2,80	920,00 ml	5,94	100,00	0,00	7
53,33 ml	0,34	973,33 ml	6,28	100,00	0,00	8
20,00 ml	0,13	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	9
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	10
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	20
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	21
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	22
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	24
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	28
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	30
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	31
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	34
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	35
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	36
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	37
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	38
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	41
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	43
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	44
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	45
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	48
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	49
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	52
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	57
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	59
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	62
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	64
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	66
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	69
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	72
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	73
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	76
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	80
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	83

0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	84
<b>REACTIVACIÓN</b>						
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	85
0,00 ml	0,00	993,33 ml	6,41	100,00	0,00	86
6,67 ml	0,04	1.000,00 ml	6,45	100,00	0,00	87
126,67 ml	0,82	1.126,67 ml	7,27	100,00	0,00	90
80,00 ml	0,52	1.206,67 ml	7,78	100,00	0,00	92
33,33 ml	0,22	1.240,00 ml	8,00	100,00	0,00	93
53,33 ml	0,34	1.293,33 ml	8,34	100,00	0,00	94
166,67 ml	1,08	1.460,00 ml	9,42	100,00	0,00	104
0,00 ml	0,00	1.460,00 ml	9,42	100,00	0,00	106
0,00 ml	0,00	1.460,00 ml	9,42	100,00	0,00	108
0,00 ml	0,00	1.460,00 ml	9,42	100,00	0,00	111
0,00 ml	0,00	1.460,00 ml	9,42	100,00	0,00	113
0,00 ml	0,00	1.460,00 ml	9,42	100,00	0,00	115
0,00 ml	0,00	1.460,00 ml	9,42	100,00	0,00	119
0,00 ml	0,00	1.460,00 ml	9,42	100,00	0,00	121
0,00 ml	0,00	1.460,00 ml	9,42	100,00	0,00	122

**Tabla C.4.-** Producción y composición del biogás de “S-I” antes y después de reactivación

Volumen GAS			Gas acumulado (L/Kg)	CALIDAD		Días
Volumen Producido	Vp (L/kg)	Volumen Acumulado		%CO <sub>2</sub>	%CH <sub>4</sub>	
0,00 ml	0,00	0,00 ml	0,00	100,00	0,00	0
6,67 ml	0,06	6,67 ml	0,06	100,00	0,00	1
653,33 ml	6,22	660,00 ml	6,29	100,00	0,00	2
80,00 ml	0,76	740,00 ml	7,05	100,00	0,00	3
60,00 ml	0,57	800,00 ml	7,62	100,00	0,00	7
6,67 ml	0,06	806,67 ml	7,68	100,00	0,00	8
6,67 ml	0,06	813,33 ml	7,75	100,00	0,00	9
0,00 ml	0,00	813,33 ml	7,75	100,00	0,00	10
13,33 ml	0,13	826,67 ml	7,87	100,00	0,00	20
0,00 ml	0,00	826,67 ml	7,87	100,00	0,00	21
0,00 ml	0,00	826,67 ml	7,87	100,00	0,00	22



0,00 ml	0,00	826,67 ml	7,87	100,00	0,00	24
0,00 ml	0,00	826,67 ml	7,87	100,00	0,00	28
0,00 ml	0,00	826,67 ml	7,87	100,00	0,00	30
0,00 ml	0,00	826,67 ml	7,87	100,00	0,00	31
0,00 ml	0,00	826,67 ml	7,87	100,00	0,00	34
0,00 ml	0,00	826,67 ml	7,87	100,00	0,00	35
0,00 ml	0,00	826,67 ml	7,87	100,00	0,00	36
0,00 ml	0,00	826,67 ml	7,87	100,00	0,00	37
0,00 ml	0,00	826,67 ml	7,87	100,00	0,00	38
0,00 ml	0,00	826,67 ml	7,87	100,00	0,00	41
0,00 ml	0,00	826,67 ml	7,87	100,00	0,00	43
0,00 ml	0,00	826,67 ml	7,87	100,00	0,00	44
0,00 ml	0,00	826,67 ml	7,87	100,00	0,00	45
6,67 ml	0,06	833,33 ml	7,94	100,00	0,00	48
0,00 ml	0,00	833,33 ml	7,94	100,00	0,00	49
0,00 ml	0,00	833,33 ml	7,94	100,00	0,00	52
0,00 ml	0,00	833,33 ml	7,94	100,00	0,00	57
0,00 ml	0,00	833,33 ml	7,94	100,00	0,00	59
0,00 ml	0,00	833,33 ml	7,94	100,00	0,00	62
13,33 ml	0,13	846,67 ml	8,06	100,00	0,00	64
13,33 ml	0,13	860,00 ml	8,19	100,00	0,00	66
0,00 ml	0,00	860,00 ml	8,19	100,00	0,00	69
0,00 ml	0,00	860,00 ml	8,19	100,00	0,00	72
0,00 ml	0,00	860,00 ml	8,19	100,00	0,00	73
6,67 ml	0,06	866,67 ml	8,25	100,00	0,00	76
13,33 ml	0,13	880,00 ml	8,38	100,00	0,00	80
0,00 ml	0,00	880,00 ml	8,38	100,00	0,00	83
0,00 ml	0,00	880,00 ml	8,38	100,00	0,00	84
0,00 ml	0,00	880,00 ml	8,38	100,00	0,00	85
<b>REACTIVACIÓN</b>						
6,67 ml	0,06	886,67 ml	8,44	100,00	0,00	86
133,33 ml	1,27	1.020,00 ml	9,71	100,00	0,00	87
713,33 ml	6,79	1.733,33 ml	16,51	100,00	0,00	90
600,00 ml	5,71	2.333,33 ml	22,22	100,00	0,00	92
80,00 ml	0,76	2.413,33 ml	22,98	100,00	0,00	93

146,67 ml	1,40	2.560,00 ml	24,38	100,00	0,00	94
2.733,33 ml	26,03	5.293,33 ml	50,41	100,00	0,00	104
6,67 ml	0,06	5.300,00 ml	50,48	100,00	0,00	106
0,00 ml	0,00	5.300,00 ml	50,48	100,00	0,00	108
80,00 ml	0,76	5.380,00 ml	51,24	100,00	0,00	111
0,00 ml	0,00	5.380,00 ml	51,24	100,00	0,00	113
0,00 ml	0,00	5.380,00 ml	51,24	100,00	0,00	115
0,00 ml	0,00	5.380,00 ml	51,24	100,00	0,00	119
0,00	0,00	5.380,00 ml	51,24	100,00	0,00	121
0,00	0,00	5.380,00 ml	51,24	100,00	0,00	122