

Co-digestión de residuos para la obtención de biogás. Influencia de la presencia de inóculo y estructurante

Trabajo de Fin de grado

Titulación: Grado en Ingeniería Química Industrial

Claudia Bodelón García

Septiembre, 2018

Tutores:

Andrea Brito Alayon

Douglas J. Escalante Ayala

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mis tutores : Douglas Escalante Ayala por prestar siempre su ayuda y conocimientos, y Andrea Brito Alayón por su extremada dedicación y apoyo cuando lo he necesitado, tanto en la realización experimental como en la redacción de este trabajo.

También quiero agradecer a todos mis compañeros de la carrera que han hecho de estos últimos 4 años una etapa increíble e inolvidable. Pero especialmente quiero destacar a mis mejores amigas con las que hemos formado una familia: Gracias a Anya Herrera Díaz, Cristina Martín San José, María Eugenia Franco, Alexandra Sabrina Serpa Mule, Anitsire Gutierrez y Carmen Rodriguez Medina por conseguir hacerme reir hasta cuando tenía que calcular el volumen de un reactor mezcla perfecta o un flujo pistón.

Finalmente agradecer a mi familia por el constante apoyo incondicional, a mi madre por ponerse incluso más nerviosa que yo antes de un examen y a mi padre justamente por ser el que mantenía la calma. Pero a quien más tengo que agradecer es a mi hermana Paula Bodelón García, por darme los mejores consejos que un estudiante de ingeniería necesitaba escuchar, por prestarme todos sus apuntes, por contestar el teléfono cuando me estaba subiendo por las paredes y sobre todo por ser el mejor ejemplo a seguir.

INDICE.

Índice.

1.	RESUMEN.	11
2.	INTRODUCCIÓN.....	15
2.1	Economía circular.....	17
2.2	Diferencias entre combustibles fósiles y biocombustibles.	18
2.2.1	Tipos de biocombustibles.....	19
2.2.2	Características de los R.S.U.	21
2.2.3	Tipos de tecnologías existentes para la valorización de los R.S.U.	22
2.3	Biogás	24
2.3.1	Posibles usos del biogás.	25
2.4	Obtención del biogás mediante digestión anaerobia.	26
2.4.1	Etapas de la digestión anaerobia.	26
2.4.2	Factores implicados en la operación de digestión.	28
2.4.3	Tecnologías de purificación del biogás.....	32
2.5	Situación del biogás en España y Europa.	33
2.6	Perspectivas de futuro.	37
2.7	Objetivos.	38
3.	Técnica experimental.	41
3.1	Material del laboratorio.....	43
3.1.1	Equipos utilizados.....	43
3.1.2	Productos químicos.....	47
3.2	Set de biodigestores.....	47
3.2.1	Preparación de los biodigestores.	48
3.2.2	Condiciones de diseño según la Norma DIN 38414-S8 y directriz VDI 4630.....	49
3.2.3	Reactivación de los biodigestores.	51
3.2.4	Análisis de la composición de biogás.	51
3.2.5	Volumen de biogás producido.	52
3.2.6	Determinación de Sólido totales(ST)y volátiles (SV).	53
4.	Resultados y discusión.	55
4.1	Producción de residuos.	57

4.2	Producción de biogás: FORSU	59
4.2.1	FORSU sin inóculo.	59
4.2.2	FORSU con inóculo.....	62
4.3	Residuo: FORSU y podas de campo de golf.....	64
4.3.1	Producción de biogás sin inóculo.	64
4.3.2	Producción de biogás digestión con inóculo.....	70
4.3.3	Estudio de la composición del biogás a partir de digestatos con y sin inóculo. .	74
5.	Conclusión y Recomendación	79
6.	Bibliografía.	85
Anexos.	89
ANEXO I.....	91
AI.1	Producción de Biogás: Residuo: FORSU	93
AI.2	Producción de Biogás: Residuo: FORSU con podas de campo de golf.	94
ANEXO II.....	101
All.1	Composición de biogás: Residuo: FORSU.....	103
All.2	Composición de biogás: Residuo: FORSU con podas de campo de golf.....	103

1. RESUMEN.

La constante preocupación por el medio ambiente ha generado un elevado incremento del uso de energías renovables en las últimas décadas. Este tipo de energías presentan muchas ventajas debido a que es la alternativa más limpia para el medio ambiente, se encuentran en la naturaleza en una cantidad ilimitada y una vez consumidas se pueden regenerar de manera natural o artificial. La gran expectativa esperada es que se conviertan en las sustitutas de las energías convencionales, ya que se tratan de recursos limpios cuyo impacto es prácticamente nulo y reversible.

El biogás es un biocombustible formado por una mezcla de (50%-75%) metano y (25%-50%) dióxido de carbono, y pequeñas cantidades de otros gases y vapor de agua. Este tipo de biocombustible se produce a partir de la descomposición de microorganismos mediante un proceso de digestión anaerobia que es sometido a cuatro etapas diferentes: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

Además cabe destacar la importancia del control de pH en las muestras elaboradas, ya que se trata de una de las variables más importantes de la fermentación anaerobia, debido a que si se encuentran en valores fuera del rango óptimo establecido se produce la inhibición de la población microbiana encargadas de la producción de biogás.

Este trabajo de fin de grado se centra en el estudio de la obtención de biogás a partir de la fermentación anaerobia de biomasa, un tipo de energía renovable basada en el aprovechamiento de materia orgánica animal y vegetal o residuos agroindustriales. La biomasa utilizada en este proyecto es una mezcla conocida como FORSU (Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos), formada, en este caso, por restos de productos agrarios en un estado avanzado de madurez (crudo) y restos de comida procedentes de una cafetería.

Se estudia el proceso de digestión utilizando solo FORSU en una proporción determinada de residuos Crudo/Cafetería, y se analiza cómo influye en la composición y producción del gas obtenido tanto la relación Crudo/Cafetería utilizado como la adición a la muestra de un estructurante como las podas de campo de golf y un inóculo, que en este caso es un lodo de depuradora procedente del EDAR de S/C de Tenerife. También se estudian diferentes concentraciones de estructurantes y de inóculo.

Abstract

The constant concern for the environment has generated a high increase in the use of renewable energy in recent decades. This type of energy has many advantages because it is the cleanest alternative for the environment, they are found in nature in an unlimited amount and once consumed can be regenerated naturally or artificially. They are expected to become substitutes for conventional energies, since they are clean resources whose impact is practically nil and reversible.

Biogas is a biofuel formed by a mixture of (50% -75%) methane and (25% -50%) carbon dioxide, and small amounts of other gases and water vapor. This type of biofuel is produced from the decomposition of microorganisms through an anaerobic digestion process that is subjected to four different stages: hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis and methanogenesis.

In addition, it is important to highlight the importance of pH control in the processed samples, since it is one of the most important variables in anaerobic fermentation, because if they are found in values outside the established optimum range, the inhibition of the microbial population responsible for the production of biogas takes place.

This project focuses on the study of obtaining biogas from the anaerobic digestion of biomass, a type of renewable energy based on the use of animal and vegetable organic matter or agroindustrial waste. The biomass was used in this project as a FORSU (Organic Fraction of Urban Solid Residues), formed, in this case, by waste of agricultural products in an advanced stage of maturity (“crudo”).

The digestion process is studied using only FORSU in a set proportion of “Crudo”/Cafeteria waste, and it is analyzed how the composition and production of the gas obtained is affected for both, the Crude / Cafeteria relationship used and the addition to the sample of a structuring agent, such as pruning of golf course, as well as an inoculum, which in this case is a sewage sludge from the wastewater treatment plant of S / C of Tenerife. Different concentrations of structurants and inoculum are also studied.

2. INTRODUCCIÓN.

La preocupación actual por el medio ambiente causada por la influencia del CO₂ sobre la capa de ozono proveniente de la utilización de combustibles fósiles, ha desarrollado una cierta inquietud sobre el estudio de la obtención de un combustible que reduzca la emisión de dicho gas. Es así como nace el concepto de biocombustible, un combustible natural que contiene componentes derivados a partir de biomasa, es decir, organismos recientemente vivos o sus desechos metabólicos.

La utilización de biocombustibles no asegura la ausencia de contaminación, pero sí una disminución de ésta. Los principales biocombustibles obtenidos a partir de biomasa son el biodiesel, bioetanol y biogás.

2.1 Economía circular.

El desarrollo actual de la economía está provocando un agotamiento de ciertos recursos naturales, por ello se cree necesario proponer un nuevo modelo de sociedad que optimice los materiales y residuos conocido como economía circular. Por lo que implica que el producto deberá de ser diseñado para ser reutilizado y reciclado una vez que termina su vida útil. En resumen, el principal objetivo de la economía circular se basa en convertir los considerados residuos en materia prima.

Cada europeo consume catorce toneladas de materias primas y genera otras cinco de basura al año, la economía circular fomenta la reutilización, reparación o reciclaje con la finalidad de reducir nuestros residuos.

La economía circular consiste en un flujo cíclico que implica extraer, transformar, distribuir, usar y recuperar los materiales y la energía de productos y servicios.

Según Ormazabal, M. et al (2017) hay que concretar cuáles son los campos de acción de la economía circular y en qué consisten, de tal manera que puedan ser identificados en cualquier proceso de mejora de la gestión ambiental:

- **Extraer:** Se refiere a la forma en la que las industrias toman recursos del entorno, las empresas deben conseguir un uso más eficaz y responsable de los recursos biológicos y técnicos, por lo que pueden seleccionar los proveedores y los materiales que utilizan de acuerdo con criterios medioambientales que disminuyan su impacto en la naturaleza.
- **Transformar:** Una vez obtenido los recursos se deben desarrollar las mejores prácticas tecnológicas ecológicas e innovadoras para que el producto se realice de la manera más sostenible posible.
- **Distribuir:** El producto debe de entregarse al cliente, de esta forma las empresas deben de garantizar la trazabilidad de sus productos teniendo en cuenta que deben reducir el impacto ambiental en rutas, embalajes etc.
- **Usar:** Una vez que el producto está a disposición de los consumidores u otras empresas, se propone reducir el impacto de la energía asociada al uso del producto. La eficiencia del producto puede ser mejorada por medio de la reutilización como producto de segunda mano o la reparación. Las organizaciones deberían de permitir

que los clientes devolviesen sus productos una vez hayan sido utilizados para extender su ciclo de vida por medio de los servicios de post-venta o mantenimiento.

- Recuperar: Los residuos pueden ser recuperados como un recurso biológico que puede ser devuelto a la biosfera o como un recurso técnico que puede ser reincorporado a un proceso industrial.

En definitiva, unas de las principales estrategias del diseño de producto para la economía circular son: utilizar la basura como alimento, es decir, los productos que se consideran basura puede considerarse un nutriente biológico; uso de las energías renovables; y valorar la diversidad de la naturaleza para sacar provecho de ella.

Además, como Rafieenia, Pivato, Lavagnolo (2018) mencionaron en su artículo, hay que tener en cuenta la utilización de ciertos inóculos como es el caso de la adición de lodos recolectados de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ya que como estudios a gran escala han demostrado podrían aumentar la cantidad de energía recuperable de los desechos orgánicos.

Según Ormazabal, M. et al (2018) las pequeñas y medianas empresas tienen la mayor influencia en la economía circular, debido a que constituyen el 95% de las empresas en los países miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). Aproximadamente en la Unión Europea las pequeñas y medianas empresas representan el 99% de todas las empresas, por lo que no es de extrañar que ciertos estudios demuestren que el 70% de la contaminación industrial, el 40 o 45% de las emisiones atmosféricas industriales, el consumo de agua y el consumo de energía en la UE sean provocados por dichas empresas.

Dichos autores también propusieron que la economía circular se puede entender a través de:

- La recirculación de recursos y energía, la minimización de demanda de recursos y la recuperación de valor a partir de residuos. Este flujo cíclico tiene dos grandes ventajas: evitar un agotamiento de los materiales, garantizar un suministro finito y permitir que el suministro de materiales sea independiente de su naturaleza.
- Su gran importancia como un camino para lograr el desarrollo sostenible.
- Su estrecha relación con la forma en que la sociedad innova.

En términos generales, las industrias toman los recursos del medio ambiente y los transforman en productos para que posteriormente sean distribuidos y utilizados por los consumidores u otras empresas como parte de otros productos. Finalmente estos productos deben ser devueltos como materiales y energía.

Ormazabal, M. et al (2018) realizaron un estudio en el País Vasco y Navarra sobre el enfoque de las pequeñas y medianas empresas en la economía circular y llegaron a la conclusión de que algunos sectores económicos tienen más facilidad para implantar estrategias ambientales que otros.

2.2 Diferencias entre combustibles fósiles y biocombustibles.

La mayor parte de la energía empleada actualmente proviene de los combustibles fósiles, un hecho que debería cambiar cuanto antes, a pesar de su fácil extracción, su gran disponibilidad y que son baratos en comparación con otras fuentes de energía, provocan grandes efectos negativos sobre el medio ambiente y además se trata de una fuente finita.

Los combustibles fósiles son fuentes de energía basadas en el carbono como es el caso del carbón, petróleo y el gas natural. Su origen parte de la acumulación durante millones de años de restos orgánicos provenientes de especies vegetales y animales que fueron depositados en el fondo de mares, lagos, etc., donde se fueron cubriendo por distintas capas sedimentarias. Esta acumulación de sedimentos durante tanto tiempo dio lugar a que se produjeran distintas reacciones químicas que formaron los hidrocarburos.

Dichos combustibles forman parte de los recursos de energía no renovable, su energía se produce a partir de la combustión de hidrocarburos. Cuando estos hidrocarburos se queman producen dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero que se queda atrapado en la atmósfera de forma indefinida y juega un papel importante en el calentamiento global.

Por lo tanto, como Leferna, G.A. (2018) afirma el impulso hacia la eliminación progresiva de los combustibles fósiles está ganando tracción. La creciente cooperación internacional sobre el cambio climático, unida a los rápidos avances en la energía limpia y la creciente resistencia a los combustibles fósiles crean un gran impulso al comienzo del final de la era del combustible fósil.

Es así como nace el concepto de biocombustible, una alternativa energética capaz de reemplazar al petróleo. Los biocombustibles son obtenidos de manera renovable a partir de biomasa, materia orgánica que proviene de la agricultura, desechos agrícolas, ganaderos, forestales, urbanos e industriales.

Las principales ventajas de los biocombustibles son:

- Una vez que la tecnología esté disponible de manera general, el precio de los biocombustibles será mucho menor que el de los combustibles fósiles
- Mientras que el petróleo es un recurso limitado, los biocombustibles pueden ser fabricados de muchos materiales diferentes y renovables
- Debido a que se producen de manera local, las plantas de biocombustibles generan empleos en áreas rurales
- Cuando se someten a una combustión, producen significativamente menos gases contaminantes que en el caso de los combustibles fósiles.

Entre los principales biocombustibles se encuentran el bioetanol, el biodiesel y el biogás.

2.2.1 Tipos de biocombustibles.

Según la Universidad Politécnica Católica de Chile, los biocombustibles se pueden dividir en biocombustibles de primera, segunda, tercera o cuarta generación, dependiendo de la materia prima utilizada y del proceso de producción:

- Primera generación: Son aquellos provenientes de cultivos agrícolas destinados a la alimentación humana. En la actualidad las tecnologías empleadas para la producción de biocombustibles de primera generación son más simples y económicas.
- Segunda generación: Se obtienen a partir de biomasa lignocelulósica. Esta biomasa procede de residuos de cultivos, de subproductos de las industrias alimentarias y forestales, o de cultivos destinados a la obtención de algas o *Jatropha*. La principal diferencia con los combustibles de primera generación es que pueden provocar problemas ambientales durante su eliminación. Se caracterizan por la alta densidad

energética almacenada en la celulosa, que libera mucha energía al romper sus enlaces químicos. Para esta transformación es necesario recurrir a técnicas aún no bien desarrolladas que eviten la fermentación biológica por consumir mucha energía durante el proceso.

- Tercera generación: Se trabaja con vegetales no destinados a la alimentación con una gran capacidad de crecimiento rápido y potencial energético, como es el caso de las microalgas. Con las microalgas se puede producir un aceite que tras ser refinado puede utilizarse como biodiesel. También se encuentran en este grupo los cultivos energéticos como *Jatropha* y *Milletia*.
- Cuarta generación: Son aquellos que llevan la tercera generación un paso más allá. Se trata de obtener biocombustibles a partir de microorganismos manipulados genéticamente empleando dióxido de carbono. La clave está en la captación y almacenamiento de carbono, de esta manera contribuye con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Los principales biocombustibles obtenidos según el tipo de biomasa del que proceden son: el biogás, biodiesel, bioetanol, y en los últimos años ha empezado a cobrar importancia el BioDME.

1. Biodiesel:

Se obtiene a partir de los aceites y grasas separando los ésteres metílicos de la glicerina que los une. Dependiendo de los tratamientos posteriores se obtienen distintos tipos de biodiesel.

Su principal ventaja medioambiental es que las emisiones de CO₂ que genera al ser quemado se compensan con el CO₂ que captó durante su desarrollo la planta de oleaginosa, que proporcionó el aceite que sirvió de materia prima. Además, evita las emisiones de óxido de azufre (causantes de la lluvia ácida), sulfatos y micropartículas.

2. Bioetanol:

Es un biocombustible obtenido por la fermentación de la materia orgánica y la biomasa rica en hidratos de carbono. Dependiendo de la materia prima utilizada se pueden generar varios subproductos para la industria de la alimentación y energía.

El bioetanol es el principal sustituto de la gasolina y su característica más destacada es que presenta un índice de octano elevado. Actualmente su principal utilidad es la de aumentar el octanaje de la gasolina.

3. Biogás:

Es un combustible cuyo origen proviene de procesos naturales de degradación y putrefacción de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Este es el combustible de interés en este proyecto por lo que se describirá más detalladamente.

4. BioDME: Se trata de un biocombustible procedente de biomasa que ha resultado muy eficaz energéticamente. El BioDME es un líquido que pertenece a los biocombustibles de última generación que se puede obtener de la madera o de productos de desecho de la producción agrícola. Al proceder de materias primas renovables y naturales llega a reducir las emisiones de dióxido de carbono en un 95% en comparación con el diésel. (Camion Actualidad, (2012);Lei, Z,et al. (2011))

2.2.2 Características de los R.S.U.

El medio ambiente es la fuente de recursos naturales, materias primas y energía necesarios para alcanzar el desarrollo humano. No obstante, es necesario buscar un desarrollo adaptado a la capacidad del ambiente en cuanto al suministro de materias primas y a la asimilación de residuos. Es por ello, por lo que se pretende que en los procesos productivos se obtengan la mayor cantidad y calidad de productos utilizando menos recursos y generando menos residuos.

La prevención en la producción de los desechos, su reciclado y aprovechamiento, se convierten en objetivos fundamentales en la gestión de los residuos.

La cantidad de residuos sólidos urbanos producidos en una ciudad depende de ciertos factores como el hábitat, nivel de vida, costumbres, época del año, clima, etc. En función de su origen los distintos tipos de residuos urbanos pueden ser:

- Residuos domésticos: Son los producidos en las viviendas como pueden ser restos de comida, papel, cartón, plásticos, textiles, cuero, madera, vidrio, latas o incluso artículos como electrodomésticos, baterías, etc.
- Residuos comerciales: Son los procedentes de las actividades relacionadas con servicios empresariales.
- Residuos institucionales: Son los residuos generados en centros públicos.
- Residuos de construcciones y demolición: Son los residuos procedentes de las actividades de construcción, reparación, etc. Compuestos la gran mayoría de acero, hormigón, cerámicas, madera, etc.
- Servicios municipales: Son los originados en la limpieza de las zonas públicas.
- Plantas de tratamiento: Residuos derivados de las plantas de tratamiento de aguas potables y residuales y procesos de tratamiento industrial.
- Residuos industriales: Residuos que se generan en actividades industriales como refinerías, plantas químicas, centrales eléctricas, etc.

La composición de los RSU en España se presenta en la figura 2.1:

Los RSU no separados en origen no suelen presentar una adecuada digestión anaerobia debido a la presencia de vidrios, metales, productos textiles, etc. Los RSU separados en el origen y aquel que no ha sido separado, pero si se ha sometido a los tratamientos previos de clasificación y separación que se realizan en las plantas de tratamiento de RSU pueden resultar aptos para tratamientos biológicos. La fracción utilizable es la fracción orgánica de dichos residuos (FORSU), que puede ser producida, por residuos de frutas y verduras en grandes cantidades en los mercados de las grandes ciudades.(García-Peña, E.I. et al (2011)) .

La utilización de FORSU para la producción de biogás ya fue utilizada en un estudio realizado en 1987. (Fannin,K.F et al. (1987))



Figura 2.1 Composición de RSU en España 2015.

Fuente: Brito Alayon, A (2016)

2.2.3 Tipos de tecnologías existentes para la valorización de los R.S.U.

La valorización energética de los RSU es una tecnología desarrollada y en evolución continua. Está en evolución en cuanto a nuevos materiales, nuevos procesos de tratamiento de gases, adaptación a las nuevas exigencias medioambientales y a las características de los residuos, búsqueda de mayores rendimientos, fiabilidad y reducción de costes.

La selección de la tecnología debe considerar algunos aspectos fundamentales como son:

- El tipo de residuo o mezcla de residuos a valorizar energéticamente.
- Que la tecnología sea flexible, que sea capaz de responder ante variaciones en las características de los residuos que presentan una heterogeneidad en su composición.
- La experiencia y madurez de la tecnología en aplicaciones de las mismas características a las que se quiere implantar.
- La viabilidad económica.

En las aplicaciones industriales más pobladas y desarrolladas se utilizan métodos como la incineración, la digestión anaerobia y la co-incineración. Un esquema de estos procesos se presenta en la figura 2.2:

El proceso de incineración reduce significativamente el volumen de desechos, pero produce dioxinas que contaminan los alimentos, el aire y son absorbidas por la piel, lo que plantea riesgos graves para la salud pública. (Xiong, H. et al (2017))

La incineración consiste en la combustión de materia orgánica en una atmósfera con exceso de aire. En el interior del horno se llegan a alcanzar temperaturas de 500 °C que llegan a

descomponer la materia orgánica. Todo este calor generado se aprovecha para la obtención de electricidad. (López Cuesta, J (2015))

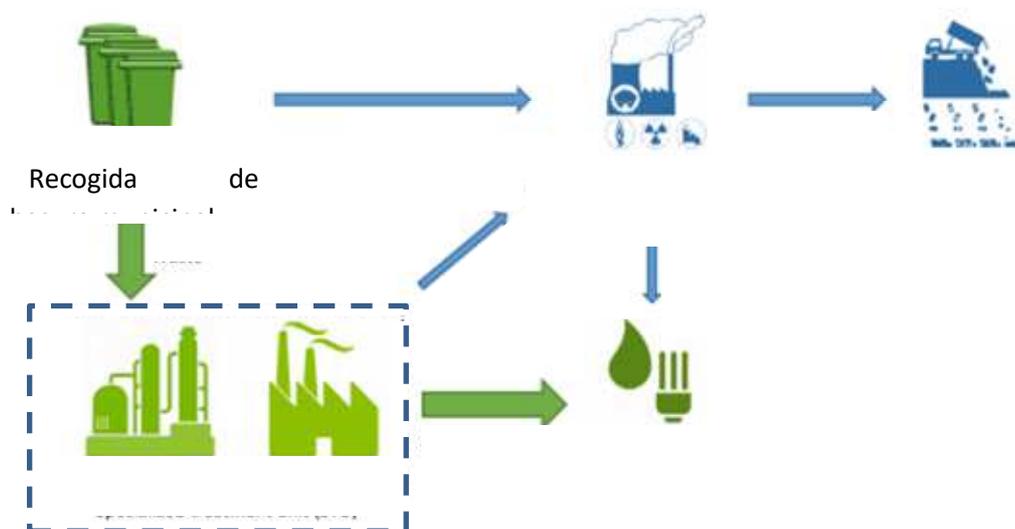


Figura 2.2: Sistema de tratamiento de residuos sólidos municipales.
Fuente: He, Z., Xiong, J., Sheng Ng, T., Fan, B., Shoemaker, C., A. (2017)

Esto quiere decir que el enfoque tradicional de incineración-vertedero es insuficiente para hacer frente a la creciente generación de residuos. Por ello se requiere de instalaciones de purificación de los gases de escape para limitar los gases contaminantes a la atmósfera. También es necesario realizar un tratamiento de los residuos sólidos ya que contienen un gran contenido de metales pesados.

En las últimas décadas los avances tecnológicos sobre el tratamiento de los RSU han hecho una mejora en sostenibilidad y recuperación de energía.

Un ejemplo es la digestión anaerobia, que se puede aplicar de manera eficiente para los desechos orgánicos y recuperar biogás, una mezcla de gases que puede ser utilizada para la generación de energía. (He, et al. (2017)).

Otra tecnología sería la gasificación que consiste en la oxidación parcial de la materia orgánica bajo condiciones subestequiométricas de oxígeno. De esta forma se consigue un gas de síntesis que puede ser utilizado como combustible para la obtención de electricidad. Dependiendo de la composición de dicho gas, tanto el poder calorífico como las posibles emisiones se verán afectados.

También puede ser utilizada la pirolisis que consiste en la descomposición térmica de la materia orgánica en ausencia de un agente oxidante. Para lograr descomponer los últimos compuestos volátiles es necesario llegar a temperaturas de 800 °C. Las emisiones que se generan con esta tecnología son menores que con la incineración y la gasificación. (López Cuesta (2015))

Estas tecnologías tan innovadoras hoy en día están disponibles en varias escalas, lo que da lugar a que el capital privado ingrese al mercado de tratamientos de RSU con una inversión relativamente baja.

Como se ilustra en la Fig. 2.2, las diferentes unidades de tratamiento de RSU pueden reutilizar mutuamente los subproductos y los residuos del proceso para de esta forma lograr un beneficio ambiental y económico colectivo.

2.3 Biogás

A lo largo de los últimos años se ha hecho un estudio en profundidad a nivel mundial sobre el biocombustible conocido como biogás y se ha llegado a la conclusión de que es uno de los principales recursos energéticos más sostenibles y con mayor potencial de crecimiento.

El biogás es una fuente de energía renovable compuesta principalmente de metano (CH_4) del orden del 40% y dióxido de carbono (CO_2) del orden de 60%, generados a partir de la biodegradación de materia orgánica en ausencia de oxígeno. Presenta una gran importancia medioambiental ya que se obtiene a partir del tratamiento y la valorización energética de residuos orgánicos de origen animal, vegetal, forestal, etc.

Además, cabe destacar que, como otros combustibles, el biogás puede ser aplicado para múltiples necesidades de la vida cotidiana, desde generación de electricidad o calor, hasta carburante en vehículos adaptados para ello.

Las principales ventajas de la producción del biogás es que se trata de un combustible sostenible, renovable, neutral respetando al ciclo del carbono y reduce la dependencia de la importación de combustibles fósiles (Gamer Tobal, C. (2013)).

Otros beneficios medioambientales de la producción del biogás son:

- Reduce las emisiones de los gases de efecto invernadero y la mitigación del calentamiento global.
- Establece centros descentralizados de producción de energía.
- Da lugar a un fertilizante natural de alta calidad.
- Reduce la producción de los malos olores de la materia orgánica en descomposición.
- Se crea un valor añadido sobre los residuos.
- Se minimiza la dependencia de recursos energéticos exteriores.
- Aumenta el empleo ya que se requiere personal.
- Reduce la cantidad de patógenos en los fertilizantes que se aplican al suelo.

La producción del biogás presenta ciertos inconvenientes como puede ser la menor producción de energía por unidad de volumen, plantea dificultad a la hora de almacenarse y distribuirse, etc. A continuación, se hablará brevemente sobre los inconvenientes de dicho combustible:

- En el caso de almacenar grandes cantidades de biogás se requieren de sistemas complejos y costosos. Un almacenamiento eficiente implica condensar el gas, ya que ocupa grandes volúmenes. Pero hay que tener en cuenta que el biogás se condensa a temperaturas menores de $-200\text{ }^\circ\text{C}$, por lo que es un proceso complicado.
- Además, la quema de biogás continúa generando emisiones de CO_2 .

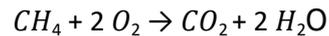
- Es un combustible inestable propenso a explosiones.

2.3.1 Posibles usos del biogás.

Una vez obtenido el biogás, existen diversas opciones para su utilización. Las principales aplicaciones del biogás son:

- Producción de calor o vapor:

El biogás puede ser utilizado para la obtención de energía térmica mediante la combustión del metano que lo compone produciendo la siguiente reacción exotérmica:



Los sistemas pequeños de dicho combustible pueden proporcionar energía calorífica para las actividades básicas como es el caso de cocinar y calentar el agua.

Incluso los quemadores de gas convencionales pueden adaptarse fácilmente para operar con biogás cambiando la relación aire-gas. Aunque hay que destacar que su rendimiento es menor (Varnero,M.T(2011))

- Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad:

Los sistemas combinados de calor y electricidad utilizan la electricidad generada por el combustible y el calor residual que se produce. Hay dos tipos de sistemas combinados: los que producen principalmente calor y la electricidad es secundaria, o los que producen principalmente electricidad y el calor se utiliza para calentar el agua del proceso. En ambos casos aumenta la eficiencia al tratarse de un proceso combinado.

Las turbinas de gas pueden utilizarse para la producción de calor y energía con una eficiencia comparable a la de los motores de encendido por chispa. Por otro lado, los motores de combustión interna requieren la eliminación de H₂S por debajo a 100ppm y del vapor de agua.

Las celdas de combustible se consideran las plantas de energía del futuro con una eficiencia superior a 60% y bajas emisiones de gases. (Varnero,M.T(2011))

- Combustible para vehículos:

La utilización del biogás para vehículos de automoción necesita un enriquecimiento de la mezcla en metano y purificación del mismo.

El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto a gasolina como diésel. Pero por otro lado presenta una serie de problemas: Debe de ser almacenado en contenedores cilíndricos de presiones entre 200-300 bar, lo que implica que debe ser purificado antes de su compresión; la conversión de los motores es costosa y el peso de los cilindros disminuye la capacidad de carga de los vehículos; y por último hace falta una red de abastecimiento adecuada y la energía involucrada en la compresión a gran escala. (Agencia Andaluza de la Energía (2011))

- Redes de gas:

Una vez depurado el biogás eliminando compuestos como el SH₂ y aumentando la concentración de metano, el biogás enriquecido resultante con una composición de

metano al 91-95% puede inyectarse en las redes de transporte de gas. De esta forma el biogás se emplea como combustible doméstico para la calefacción o como materia prima en el ámbito industrial. (Agencia Andaluza de la Energía (2011))

2.4 Obtención del biogás mediante digestión anaerobia.

La digestión anaerobia es un proceso que involucra la transformación de la materia orgánica en biogás, que se fundamenta en la oxidación biológica de dicha materia orgánica mediante la actuación de microorganismos específicos y en ausencia de oxígeno molecular. Dicho proceso es uno de los más idóneos para la reducción de emisiones de efecto invernadero, el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos y el mantenimiento y mejora del valor fertilizante de los productos tratados.

La digestión anaerobia permite convertir gran cantidad de residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y química en subproductos útiles.

Durante la digestión anaerobia participan varios grupos de microorganismos que llevan a cabo un metabolismo coordinado en cuatro etapas: la primera es la hidrólisis, donde la materia orgánica es fermentada produciendo monómeros; la siguiente etapa es la acidogénesis, que produce ácidos orgánicos; la tercera es la acetogénesis, que da lugar a la formación de acetatos, propionatos y butiratos, y la última etapa es la metanogénesis, donde finalmente los microorganismos producen metano.

Durante estas etapas los principales factores ambientales que afectan en el proceso son: la temperatura, el potencial redox, el pH y la composición bromatológica de los residuos orgánicos (Gonzalez- Sánchez, M.E. et al (2015)). Posteriormente se hablarán de estas variables de operación y su efecto sobre la obtención de biogás.

Este proceso anaerobio también puede ocurrir en la naturaleza de manera espontánea como ocurre con el gas metabólico producido en el estómago de los rumiantes o el gas que generan los plátanos.

2.4.1 Etapas de la digestión anaerobia.

La digestión anaerobia es un proceso bastante complejo debido a las reacciones bioquímicas que se generan y a la cantidad de grupos de bacterias involucradas en dichas reacciones.

El proceso de digestión anaerobia consta de una serie de etapas conectadas en serie y/o paralelo en las que cada grupo microbiano, relacionado tróficamente aprovecha como sustrato los productos generados por el metabolismo de los microorganismos responsables de la etapa anterior. (Fernández Rodríguez,J.(2012))

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

- Hidrólisis:

La materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a no ser que se hidrolice en compuestos solubles. La hidrólisis se produce por medio de las exoenzimas secretadas por las bacterias de la microbiota acidogénica y supone la ruptura de las macromoléculas orgánicas.

De esta forma las proteínas son degradadas a aminoácidos, los polisacáridos a monómeros de azúcares y las grasas a polioles y ácidos grasos de cadena larga. (Fernández Rodríguez,J.(2012))

Por otra parte, la hidrólisis está condicionada a las temperaturas del proceso, al tiempo de retención hidráulico, a la composición bioquímica del sustrato, granulometría y grado de trituración del FORSU, nivel de pH y la concentración de NH_4^+ .(VarneroMoreo, M.T.(2011))

- Acidogénesis:

Consiste en metabolizar los productos de la hidrólisis en el interior celular. Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas, como el acético fórmico y el H_2 . Además, también se obtienen compuestos orgánicos más reducidos que tendrán que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa.

La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no se centra solamente en producir alimento para las siguientes etapas, sino que además elimina cualquier traza de oxígeno disuelto en el sistema. (VarneroMoreo, M., T. (2011))

Hay que destacar que en el caso de la degradación de los RSU se producen grandes cantidades de H_2 durante su hidrólisis y acidogénesis llegando a alcanzar hasta un 20-25% del volumen del biogás generado. Por lo tanto, en algunas ocasiones se ha llegado a forzar la degradación incompleta del residuo para obtener H_2 como producto final del proceso en lugar de CH_4 . (Fernández Rodríguez,J.(2012))

- Acetogénesis:

Esta etapa puede desarrollarse de dos formas diferentes. Por un lado, la deshidrogenación acetogénica, que genera acetato a partir de otros ácidos grasos y algunos alcoholes; y por otro lado la hidrogenación acetogénica, donde las bacterias homoacetogénicas sintetizan acetato a partir de H_2 y CO_2 . Al contrario que las bacterias acetogénicas, este grupo de bacterias no producen H_2 si no que pueden realizar funciones metanogénicas a partir de este, cuando estas están inhibidas por un pH bajo. (Fernández Rodríguez,J.(2012))

Durante la acetogénesis la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y así eliminan sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles son los que utilizarán las bacterias metanogénicas como sustrato.(Varnero Moreno, M., T.(2011))

- Metanogénesis:

Es la última etapa del proceso de digestión anaerobia, donde los microorganismos metanogénicos conocidos como Archaea actúan sobre los productos resultantes de las etapas anteriores produciendo metano.

Además, la inhibición por acidez generada en la etapa anterior se puede evitar gracias al consumo de ácidos de dichas bacterias. En ausencia de metanogénesis se llegaría a alcanzar niveles excesivos de acidez e inhibir el proceso completamente.

Hay dos grandes grupos de microorganismos metanogénicos: la Archaea acetoclásticas, que utilizan el acetato para generar metano y la Archaea utilizadora de hidrógeno, que consumen el H₂ generado en las etapas anteriores consiguiendo mantenerlo en un nivel bajo de modo que se puedan desarrollar algunos grupos acidogénicos que solo crecen en estas condiciones. (Fernández Rodríguez, J. (2012))

2.4.2 Factores implicados en la operación de digestión.

La digestión anaerobia es un proceso de degradación del FORSU que está condicionado por una serie de variables de estado que permiten conocer y estudiar el proceso en sus diferentes fases. Los microorganismos, especialmente los metanogénicos son susceptibles a los cambios de dichas condiciones por lo que sería conveniente llevar un seguimiento de estas.

Las variables que afectan al proceso de degradación anaerobia son:

- Efecto del pH:

El proceso anaeróbico está influenciado por el pH ya que afecta a la velocidad del proceso y determina los tipos de microorganismos que se pueden desarrollar. Las actividades producidas por los microorganismos provocan que el pH se estabilice en valores ligeramente alcalinos, 7,4-8,0. En condiciones mesofílicas el pH se sitúa en torno a 7,2-7,5, mientras que para las condiciones termofílicas oscila entre 7,5 y 8,0. (Fernández Rodríguez, J. (2012))

Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6,0 ni subir de 8,0. Su valor no solo determina la producción de biogás, sino también su composición. Uno de los motivos por los que se acidifica la muestra puede ser que el biogás producido sea muy pobre en metano, por lo que tiene menos cualidades energéticas. Por otra parte, un pH demasiado alcalino puede producir la inhibición del sistema debido al aumento de toxicidad por el amoníaco presente. (Varnero Moreno, M., T. (2011))

El pH afecta a los diferentes equilibrios presentes en el medio, pudiendo desplazarlos hacia la formación de un determinado componente que tenga influencia en el proceso.

Para conseguir el nivel de pH deseado se puede ajustar su valor en las materias primas que entran en el digestor.

- Efecto de la acidez volátil y de la alcalinidad:

Uno de las principales causas de inestabilidad de un sistema anaerobio es el incremento de la concentración de acidez volátil, provocado por un fallo de la población metanogénica como consecuencia de una sobrecarga orgánica o la entrada de sustancias tóxicas al digestor. La acumulación de ácidos produce un desajuste en las cinéticas de las reacciones de producción por parte de la microbiota acidogénica y eliminación por la microbiota metanogénica.

La alcalinidad es un modo de asimilar la acidez de los residuos sometidos a digestión. Si la acidez volátil aumenta, la alcalinidad debe ser suficiente para contrarrestar este aumento y favorecer la estabilidad del proceso.

La recuperación de un digestor acidificado se puede acelerar con la neutralización de los ácidos con sustancias alcalinas como el NaOH. Esta neutralización produce un aumento del

pH hasta un valor óptimo que produzca el crecimiento de microorganismos formadores de metano.(Fernández Rodríguez,J.(2012))

- Efecto de la producción de biogás:

La materia orgánica se transforma en CH_4 y CO_2 , pero una vez que el sistema se desestabiliza las cantidades y porcentajes producidos se alteran. Esto quiere decir que el porcentaje de metano producido depende del estado de oxidación del compuesto que se degrada.

Cuando se presentan cambios en la producción de CO_2 presente en el biogás es un síntoma de que hay variaciones en el comportamiento del digestor, lo que asegura que el proceso se encuentra inestable. Como se trata de un parámetro de respuesta rápida y de fácil análisis, el porcentaje de CO_2 en el biogás puede ser utilizado como índice de estabilidad.

- Nutrientes e inhibidores:

Una de las principales ventajas de los procesos de digestión anaerobia frente a los procesos aerobios es su baja necesidad de nutrientes derivada de los bajos índices de producción de biomasa que presentan los microorganismos anaeróbicos. Los principales nutrientes a considerar son el nitrógeno y el fósforo. Además, hay otro parámetro importante que es la relación C/N.

Una correcta fermentación de materia orgánica procedente de los RSU debe tener un índice de C/N entre 25 y 35. Para valores menores se deberá agregar materiales ricos en carbono y en el caso contrario materiales ricos en nitrógeno. La relación C/N de los RSU es muy variable dependiendo de su composición que depende del proceso de selección llevado a cabo.

Durante el proceso de digestión la relación C/N disminuye debido a las pérdidas de carbono como CO_2 . Si después de la fermentación el valor C/N es alto, indica que no ha sufrido una descomposición completa, y si el índice es muy bajo puede ser por una excesiva mineralización.

En algunas ocasiones la exposición del tóxico para la población de microorganismos provoca la aclimatización del cultivo al compuesto tóxico y permite que el sistema sea capaz de alcanzar un funcionamiento estable incluso para concentraciones del tóxico muy superiores a las admitidas normalmente.

Los principales compuestos tóxicos son:

- El nitrógeno amoniacal, el amonio es un nutriente importante para el crecimiento microbiano, pero altos niveles del mismo inhiben el metabolismo metanogénico.
- Los metales pesados, la digestión anaerobia del FORSU se inhiben con dichos metales porque son tóxicos para la Archaea metanogénica.
- Los sulfatos, la reducción de este compuesta es más favorable energéticamente que la producción de metano, así las bacterias reductoras de sulfato competirán con la Archaea por sustratos como H_2 .

- Los ácidos grasos de cadena larga y el oxígeno cuya penetración en el digestor puede inhibir el proceso que será recuperado una vez que éste sea expulsado. (Fernández Rodríguez, J. (2012))

- Velocidad de carga orgánica:

La velocidad de carga es la relación entre la carga orgánica y el tiempo de retención hidráulico, es un índice muy importante para el correcto funcionamiento del reactor.

La carga orgánica alimentada al sistema determina la cantidad de sustrato disponible para la biomasa presente. Cuando la cantidad de sustrato es baja, los microorganismos utilizan la carga orgánica para el mantenimiento de la población existente, y cuando la concentración de sustrato es elevada, se modifica la fuerza iónica del medio y la población no es suficiente para asumir la degradación del sustrato originando periodos de latencia y suponiendo la inhibición del proceso.

El tiempo de retención (TR) es el tiempo necesario para renovar todo el contenido del reactor en un proceso continuo, el tiempo de retención de sólidos (TRS) hace referencia al tiempo de permanencia de los sólidos y microorganismos y el tiempo de retención hidráulico (TRH) se refiere al tiempo de retención de la alimentación líquida del digestor. Cuando se trata de un reactor ideal dichos tiempos de retención son iguales.

Si la velocidad de carga presenta un valor alto, los microorganismos no permanecerán el tiempo correcto con el sustrato y por lo tanto no se degradará toda la materia orgánica. Si por el caso contrario es bajo se puede producir el metabolismo basal debido a la carencia de sustrato.

- Tamaño de partícula:

La reducción del tamaño de partícula supone un aumento de la superficie disponible y mejora el proceso biológico ya sea incrementando el rendimiento de la producción de biogás o reduciendo los tiempos necesarios para la digestión.

En el caso del FORSU, el tamaño de partícula insoluble depende del origen de la materia prima, tipo de recogida y concentración de residuos, etc.

Además hay que destacar que la generación de lixiviados durante el transporte puede generar una pre-hidrólisis del residuo orgánico antes del inicio del proceso anaerobio.

- Grado de mezcla:

La velocidad de agitación puede influir en el desarrollo del proceso siendo necesario el equilibrio entre la buena homogeneización y la correcta formación de agregados bacterianos. Una velocidad de agitación excesivamente alta puede llegar a disminuir la producción de biogás por ruptura de agregados bacterianos.

Los principales objetivos de la agitación en el proceso de digestión anaerobia son:

1. Aumentar el contacto del sustrato con la población bacteriana.
2. Favorecer la salida de los gases.
3. Producir una densidad uniforme de población bacteriana.
4. Prevenir la formación de la capa superficial y la sedimentación en el reactor.
5. Prevenir los espacios muertos que reducen el volumen efectivo del reactor.

6. Mantener una temperatura uniforme en el reactor.
7. Aumentar la producción del gas y disminuir el TRH.

Hay tres tipos de agitación: la mecánica, por medio de agitadores manuales o con motores; la hidráulica, a través de bombas de flujo lento se hace recircular la biomasa y la de burbujeo de biogás, se recircula el biogás producido al fondo del biodigestor por medio de cañerías para producir un burbujeo y un movimiento de la biomasa.

- Tipo de inoculación:

La biodegradación de un inóculo aumenta después de un periodo de aclimatación del sustrato, debido a que las enzimas hidrolíticas para el inicio del proceso necesitan ser inducidas.

La materia orgánica puede ser degradada por inóculos viables de un ambiente en el que se produzca una degradación anaerobia como es el caso de los lodos de depuración de aguas.

Otro parámetro importante para tener en cuenta es la relación entre inóculo/sustrato, una baja concentración de sustrato resulta negativa para el crecimiento de los microorganismos. Y una alta concentración de sustrato puede inhibir el proceso debido a la liberación de ácidos al medio, disminuyendo el pH.

Los dos factores a tener en cuenta en la inoculación de un digestor es la proporción en que se agrega y la edad del mismo. Cuanto mayor sea la proporción y menor la edad del inóculo, mayor será la eficiencia.

- Temperatura:

La temperatura de operación de un digestor es uno de los principales parámetros de diseño debido a su gran influencia en la velocidad de digestión anaerobia. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados, y estos a su vez dependen de la temperatura.

Los microorganismos anaerobios se desarrollan en un amplio rango de temperaturas que se clasifican en tres grandes grupos según el rango óptimo:

1. Psicrófilos: Por debajo de 20 °C cuya temperatura óptima se encuentra en 15°C. Este grupo es el menos estudiado, se plantea poco viable debido a la necesidad de un reactor de gran tamaño, aunque presenta menores problemas de estabilidad.
2. Mesófilos: Temperaturas entre 20 y 45 °C, la temperatura óptima es 35 °C. Es el rango de temperaturas más utilizado, se consigue un aumento de velocidad en el proceso y una eliminación de organismos patógenos.
3. Termófilos: Temperaturas superiores a 45 °C y la óptima es 55 °C. Es el grupo más inestable para cualquier cambio en las condiciones de operación y presenta mayor toxicidad de determinados compuestos a elevadas temperaturas.

La temperatura óptima indica la máxima actividad microbiana, es decir, son las condiciones en las que se alcanza máxima eficacia. En la figura 2.3 se presenta la producción de Biogás en función de la temperatura.

Además, la temperatura influye directamente en determinados equilibrios químicos con gran influencia sobre el proceso anaerobio.

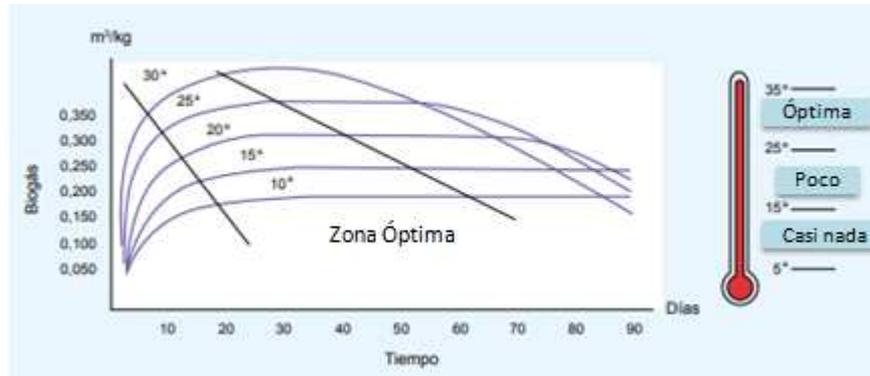


Figura 2.3. Producción de biogás en función de la temperatura.

Fuente: Varnero, M.T (1991)

- Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles:

La materia orgánica está compuesta por agua y una fracción sólida llamada sólidos totales (ST). La cantidad de dichos sólidos contenidos en la mezcla es un factor importante para asegurar un buen funcionamiento sobre el proceso, debido a que las bacterias metanogénicas del sustrato se ven limitadas a medida que dichos sólidos aumentan.

Por otro lado, los sólidos volátiles son la porción de sólidos totales que se liberan de una muestra. Este tipo de sólidos contienen componentes orgánicos que son los susceptibles de procesos de digestión y teóricamente deben de ser convertidos en metano.

2.4.3 Tecnologías de purificación del biogás.

El gas que sale del digestor debe ser acondicionado con el fin de asegurar un permanente y buen funcionamiento de los equipos que se alimentan de él. Esto quiere decir, que el biogás contiene partículas y trazas de otros gases no deseados que deben ser eliminados dependiendo del tipo de utilización que se le vaya a dar.

La purificación del biogás es importante para aumentar el poder calorífico de este y para cumplir con los requerimientos de algunas aplicaciones del gas.

A continuación, se nombrará una serie de procesos para realizar dicha purificación de una manera correcta:

- Eliminación del CO₂.

El dióxido de carbono no tiene ningún poder calorífico y debe ser calentado en la combustión. Su eliminación es aconsejable en los casos en el que el almacenaje del biogás sea a altas presiones ya que sería inútil gastar energía de compresión y volumen de almacenaje de alto costo en un gas que no daría ningún beneficio adicional.

En el caso de querer obtener un biogás enriquecido en metano con una concentración superior a 95% también es aconsejable eliminar el CO₂.

Sin embargo, para aplicaciones del biogás como calentadores, motores de combustión interna o sistemas generadores la eliminación del CO₂ no es necesaria.

La eliminación del CO_2 y H_2S se puede llevar a cabo con lavados a alta presión con agua en contracorriente. Los factores críticos para dicha eliminación que hay que tener en cuenta son el pH, presión y temperatura.

- Eliminación del agua:

El biogás que sale del digestor está saturado de vapor de agua. Dicho gas debe tener una humedad relativa inferior al 60% para prevenir la formación de condensado en las tuberías de transporte, debido a que este condensado junto con otras impurezas pueden llegar a corroer las paredes de la tubería.

Por lo tanto, debe pasar un proceso de secado por compresión y/o enfriamiento del gas, adsorción en carbón activado o sílica gel o absorción, principalmente en soluciones de glicol y sales higroscópicas.

- Eliminación del H_2S :

El sulfuro de hidrógeno es un compuesto peligroso debido a que en combinación con el vapor de agua puede llegar a formar ácido sulfúrico. El carbón activo puede utilizarse como catalizador convirtiendo el H_2S en azufre elemental. Otra forma de eliminar el H_2S es usando soluciones de NaOH, agua o sales de hierro.

Uno de los procesos más baratos es hacer pasar una corriente de O_2 a través del biogás que provocará la oxidación del sulfuro de hidrógeno convirtiéndolo en azufre elemental.

El óxido de hierro también puede anular el H_2S combinándose y formando sulfuro de hierro. Esta reacción es reversible y el hidróxido de hierro puede ser regenerado exponiendo el sulfuro al aire.

- Eliminación del oxígeno:

El oxígeno puede ser eliminado mediante procesos de desulfuración y adsorción como es el caso del carbón activado, tamices moleculares o la tecnología de diafragma.

- Eliminación del amonio:

El amoníaco se origina en mezclas con pH elevados a partir del amonio, estos compuestos se forman en casos en los que se utilizan residuos alimenticios como sustratos.

La eliminación del amoníaco se combina con otros procedimientos de purificación del biogás, como puede ser una solución ligeramente ácida.

2.5 Situación del biogás en España y Europa.

A principios de este siglo se produjo la eclosión de las energías renovables en Europa, surge entonces el desarrollo de energías fotovoltaica, eólicas, de biomasa y biogás.

El biogás es una energía limpia, ya que su utilización no se basa en evitar el consumo de las energías fósiles, sino que, al realizarse mediante un proceso anaeróbico de residuos, evita directamente la emisión libre a la atmósfera de dióxido de carbono y metano.

Según los datos proporcionados por el Observatorio Europeo de Energías Renovables (E Observ ER), en 2016 la producción de energía primaria de la Unión Europea a partir del biogás aumentó en un 3%. Cada país de la UE posee una recuperación de energía en forma de biogás,

pero el 77% de la producción se centra en Alemania, Reino Unido e Italia, ocupando España el décimo lugar.

Durante varios años la categoría de “otro biogás”, es decir el biogás que se obtiene a partir de plantas agrícolas descentralizadas, plantas de metanación de RSU y codigestión, ha dominado la producción de energía primaria de biogás en la UE. Así, en la tabla 2.1 se presenta la producción de biogás en la E.U para los años 2015 y 2016 desglosado en: gas de relleno sanitario, gas procedente de lodos de aguas residuales y el biogás comentado anteriormente. En ella se observa que el biogás procedente del proceso de digestión y metanación significa un 73,2% y un 74,1% para los años 2015 y 2016 respectivamente y durante muchos años representó la mayor producción de biogás. En el año 2016 el biogás de vertedero representó un 17,2% del total de biogás producido y el 8,7% restante pertenece al procedente de plantas de tratamiento de aguas residuales.

La producción de electricidad es el principal método de recuperación de energía del Biogás y puede o no ser recuperado en plantas de cogeneración. En la tabla 2.2 se muestra, para los años 2015 y 2016, los datos de producción de electricidad tanto en plantas eléctricas como de calor y potencia combinadas. Se observa que en 2016 se produjo un crecimiento de 2,5% con respecto al año y la utilización de plantas de cogeneración representan un 63,7%.

La utilización de biogás para obtener calor es una opción minoritaria y solo es significativa en 23 países de los 28 que producen biogás, no encontrándose datos significativos para España.

Dentro de este apartado de nuevo las plantas de calor y potencia combinada representan la mayoría del uso del biogás como calor, un 86,5% en el año 2016. El incremento de esta opción entre el año 2015 y 2016 fue del 3,19%. El biogás se puede utilizar por completo para producir calor con la máxima eficiencia energética si hay puntos de venta cerca de la planta de metanización. También se puede purificar para convertirlo en biometano, en cuyo caso se recupera de la misma manera que el gas natural, en forma de electricidad en plantas de cogeneración, y también se almacena para vehículos de gas natural (GNV) o incluso se inyecta en el medio natural. En los últimos años, la inyección de biometano se ha convertido en una tendencia floreciente del mercado de biogás.

Según la Asociación Europea de Biogás EBA, hubo al menos 17 376 plantas de biogás en Europa a finales de 2015 que equivale a un aumento internacional del 3%. La electricidad que se ha producido mediante estas plantas cubre las necesidades de consumo de más de 14 millones de hogares europeos. (EurObserv'ER (2017))

Tabla 2.1 . Producción primaria de Biogás en la Unión Europea (Ktep)

	2015				2016			
<i>País</i>	<i>Gas de relleno sanitario</i>	<i>Gas de lodos de aguas residuales (1)</i>	<i>Otro biogás (2)</i>	<i>Total</i>	<i>Gas de relleno sanitario</i>	<i>Gas de lodos de aguas residuales (1)</i>	<i>Otro biogás (2)</i>	<i>Total</i>
Alemania	94	451,7	7306,6	7852,3	84,6	461,5	7410,2	7956,3
Reino Unido	1450,8	327,8	473,8	2252,4	1400,4	345,6	660,9	2406,9
Italia	369	53,5	1448,9	1871,4	400,1	58	1570,8	2028,9
Rep.Checa	27,1	40	546,2	613,3	25,4	41,5	534	600,9
Francia	355	31,7	152,3	539	350	35	194,6	579,6
Holanda	13,5	55,3	252,2	321	16,4	57,5	250,5	324,4
Austria	4,4	11,3	284,3	300	3,1	11,7	294	308,8
Polonia	50,8	96,6	81,5	228,9	51	100	121,8	272,8
Bélgica	25,7	24,1	176,9	226,7	26,8	25,2	184,6	236,6
España	140,6	70,4	50,6	261,6	124,1	62,1	44,6	230,8
Suecia	16,1	59,9	90,7	166,7	15	61	97,6	173,6
Eslovaquia	3,4	14,8	130,5	148,7	3,4	14,7	130	148,1
Dinamarca	4,2	21,8	125,6	151,6	3,4	17,7	101,8	122,9
Finlandia	27,9	15,5	59,9	103,3	28	15	64,5	107,5
Grecia	69,9	15,9	5,6	91,4	72,5	16,6	12,6	101,7
Letonia	8,4	2	77,4	87,8	7,8	2,6	79,5	89,9
Hungría	13,9	20,3	45,5	79,7	13,9	20,4	46,2	80,5
Portugal	71,2	2,6	8,8	82,6	68,2	3	9,2	80,4
Irlanda	41	8	5,6	54,6	40,3	8,5	7,5	56,3
Croacia	5,1	3,4	27,5	36	6	4,1	32,8	42,9
Eslovenia	5	2,4	22,2	29,6	3,7	2,2	24,3	30,2
Bulgaria	5	14	0	19	9	19	0	28
Lituania	8,5	7,5	16	32	8,2	7	8,2	23,4
Luxemburgo	0	1,6	16,1	17,7	0	2,3	17,6	19,9
Rumania	1	0,1	17	18,1	1	0,1	17	18,1
Chipre	0	0	11,5	11,5	0	0	11,7	11,7
Estonia	11,6	1,5	0	13,1	10,7	0	0	10,7
Malta	0,1	1	0,5	1,6	0	1,2	0,5	1,7
UE	2823,2	1354,7	11433,7	15611,6	2773	1393,5	11927	16093,5

(1) Urbano e industrial (2)Plantas agrícolas descentralizadas, plantas de metanización de residuos urbanos, centralizado co-gestión de las plantas

Tabla 2.2. Producción bruta de electricidad a partir de biogás (GWh).

<i>País</i>	2015			2016		
	<i>Plantas de electricidad</i>	<i>Plantas de calor y potencia combinadas</i>	<i>Electricidad total</i>	<i>Plantas de electricidad</i>	<i>Plantas de calor y potencia combinadas</i>	<i>Electricidad total</i>
Alemania	8844	24220,2	33064	9088	24625	33713
Reino Unido	3139	5072,9	8221,9	3073,2	5185,5	8258,7
Italia	6513,3	723,7	7237	6934,5	770,5	7705
Rep. Checa	51	2560	2611	49	2540	2589
Francia	713	1070	1783	786	1179,5	1965,5
Holanda	0	906	906	0	1049	1049
Austria	42,9	993	1035,9	36	970	1006
Polonia	87,5	867	954,5	85,5	847,5	933
Bélgica	742	239	982	893	0	893
España	579	44	623	584	55	639
Suecia	117	424	541	107,7	390,3	498
Eslovaquia	1	472	473	1	475	476
Dinamarca	0	392	392	0	397	397
Finlandia	222	94	316	258	117	375
Grecia	203,3	153,8	357,1	204,9	155,1	360
Letonia	278,9	16	294,9	267,7	17,8	285,5
Hungría	33,6	196,7	230,3	32,8	216,7	249,5
Portugal	171,9	29,6	201,5	168	44	212
Irlanda	24,7	151,4	176,1	28	172	200
Croacia	34	86	120	42,5	107,5	150
Eslovenia	4	128	132	4,3	137,7	142
Bulgaria	0	78	78	0	126	123
Lituania	0	61,6	61,6	0	72,6	72,6
Luxemburgo	29	32	61	29	32	61
Rumania	0	51	51	0	52	52
Chipre	0	50	50	0	45	45
Estonia	0	11	11	0	9	9
Malta	0	2,6	2,6	0	2,9	2,9
UE	18496,3	39125,5	60967,4	22673,1	39791,6	62461,7

Tabla 2.3. Producción bruta de calor a partir de biogás (ktoe)

<i>País</i>	2015			2016		
	<i>Plantas de calor</i>	<i>Plantas de calor y potencia combinadas</i>	<i>Total</i>	<i>Plantas de calor</i>	<i>Plantas de calor y potencia combinadas</i>	<i>Total</i>
Italia	0,3	205,2	205,5	0,3	223,6	223,9
Alemania	66,9	150	216,9	67,8	153,8	221,6
Dinamarca	7,3	32,1	39,4	2,7	33,1	35,8
Francia	2,7	31,6	34,3	2,7	31,6	34,3
Letonia	0	21,3	21,3	0	22,7	22,7
Finlandia	6,8	11,4	18,2	6,9	11,7	18,6
Rep. Checa	0	14,9	14,9	0	14,3	14,3
Polonia	0,3	10,1	10,4	0,3	13,1	13,4
Eslovaquia	0	11,3	11,3	0	10,3	10,3
Bélgica	0	9,3	9,3	0	9,3	9,3
Suecia	3	3,6	6,6	3,1	3,7	6,8
Eslovenia	0	7,3	7,3	0	6,6	6,6
Croacia	0	5,2	5,2	0	6	6
Austria	1,6	1,8	3,4	1,6	3,7	5,3
Rumania	0,1	3,7	3,8	0,1	3,7	3,8
Hungría	1,3	1,8	3,1	1,3	2	3,3
Lituania	0	2,2	2,2	0	2,2	2,2
Estonia	0	2,7	2,7	0	1,3	1,3
Chipre	0	1,2	1,2	0	1,2	1,2
Holanda	0	1,1	1,1	0	1,1	1,1
Bulgaria	4	0,6	4,6	0	0,6	0,6
Luxemburgo	0	0,5	0,5	0	0,6	0,6
Malta	0	0,1	0,1	0	0,2	0,2
UE	94,3	529	623,3	86,8	556,4	643,2

2.6 Perspectivas de futuro.

Se estima que para el año 2030 la bioenergía moderna producida mediante el uso de tecnologías de biomasa como biorrefinerías, digestión anaeróbica de residuos, biorreactores para torrefacción, carbonización o gasificación y otras tecnologías alcanzará el potencial de ser la fuente renovable de mayor crecimiento de fuente de energía.

En la Unión Europea (UE), los objetivos políticos para el clima y la energía en 2030 representa un 40% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, un 27% de capacidad

instalada de energía renovable para todo el suministro energético de la UE y un 27% de mejora en la eficiencia energética.

Se espera que el biogás desempeñe un papel importante para alcanzar estos objetivos energéticos debido a la flexibilidad y capacidad de almacenamiento del biogás como portador de energía, a las diversas fuentes biológicas que pueden utilizarse para su producción y a su amplia gama de aplicaciones. (Meyer, A.K.P. et., al. (2018))

El gran potencial de la bioenergía en el futuro es evidente debido a la alta oferta y demanda. La dependencia de la producción de dicha bioenergía en recursos naturales puede provocar riesgos en la perturbación geográfica local o condiciones socio-económicas ya que los recursos naturales se consumirán y después se podrá esperar el tiempo necesario para que crezca y vuelvan a completar el ciclo ecológico. (Sahota, A. et., al.2018))

En la figura 2.4 se muestra la expectativa del porcentaje de combustibles renovables en Europa para el año 2020.

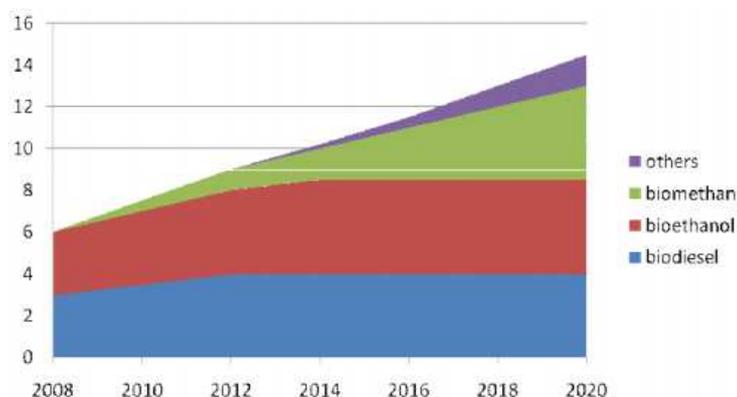


Figura 2.4. Expectativas de biocombustibles para el 2020 en la UE.
 Fuente: Agencia andaluza de la energía (2011).

2.7 Objetivos.

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es estudiar el proceso de digestión anaerobia a partir de mezclas de residuos orgánicos de distintos orígenes para su transformación en productos de alto valor añadido, como es el caso del biogás.

El principal residuo a estudiar es un FORSU, que a falta de recogida selectiva en la Isla de Tenerife se ha preparado a partir de residuos agrarios en un estado avanzado de maduración y restos de comida procedente de la cafetería de la Facultad de Química de La Universidad de La Laguna y lodos recogidos en la EDAR de S/C de Tenerife.

Los objetivos específicos llevados a cabo en este estudio fueron:

1. Actualización bibliográfica que aporte información sobre el estudio a realizar, y de este modo poder elaborar un contraste sobre los resultados obtenidos.
2. Estudio sobre la influencia de la composición del FORSU sobre la producción y composición del biogás obtenido mediante procesos de digestión anaerobia.

3. Estudio sobre la influencia de la incorporación al FORSU de podas de campo de golf como estructurante en el proceso de digestión, analizando además la influencia de la concentración de estrcutrante en la mezcla a digerir
4. Analizar el efecto de añadir un inóculo al sistema de digestión, utilizando lodos de depuradora. También se estudiará la influencia de la concentración de inóculo.
5. Análisis de la influencia del pH sobre el tiempo de producción del gas.
6. Caracterización de los residuos utilizados antes y después del proceso de digestión anaerobia mediante el análisis de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV).

3. Técnica experimental.

En este trabajo se analizó la producción y composición del biogás en fermentación anaerobia basado en un estudio en discontinuo del pH con biodigestores de 250 mL, utilizando diferentes materias primas.

La materia prima, los productos químicos, los materiales utilizados y el procedimiento experimental que se llevó a cabo serán explicados con más exactitud en los siguientes apartados.

3.1 Material del laboratorio.

A continuación, se presenta una lista con el material de laboratorio utilizado:

- Termómetro.
- Crisoles de porcelana.
- Conexiones y acoples correspondientes como es el caso de las tuberías pequeñas, los codos, las T, etc.
- Ocho biodigestores de 250 mL y sus tapones de goma correspondientes.
- Ocho botellones de 1L y sus tapones de goma correspondientes.
- Recipiente de vidrio de 6L.
- Válvulas.
- Matraces, probetas, etc.
- Bomba de vacío.
- Jeringa estanca con válvula para gases.
- Termostato.
- Cromatógrafo de gases, Agilent 7820.
- Peachímetro.
- Estufa.
- Mufla.
- Desecador.
- Pesa.

3.1.1 Equipos utilizados.

- Termostato.

Los biodigestores están sumergidos en un baño termostático a 31,5 °C para favorecer las condiciones mesofílicas. Ya que como se ha nombrado en la introducción, es la temperatura óptima para estos procesos de fermentación anaerobia dado que permite la descomposición completa de la materia orgánica.



Figura 3.1. Termostato.

- Cromatógrafo de gases.

La técnica de laboratorio utilizada para el análisis de composición de la muestra fue la cromatografía de gases. (Knox, 1965)

El cromatógrafo utilizado tenía dos columnas en serie para la detección de los componentes.

Este equipo está conectado a un ordenador para procesar los datos de análisis de composición mediante un programa de software llamado “OpenLab CDS ChemStation”, donde se podría apreciar la aparición de unos picos para diferentes tiempos de residencia, los cuales corresponden a los gases que componen el biogás.

Primero se introducía la muestra de biogás en el inyector, la cual se calienta y se produce la vaporización de los solutos volátiles de la muestra. Estos solutos vaporizados se introducen posteriormente en la columna mediante el gas portador. Los solutos pasan por la columna a distintas velocidades, lo cual está determinado principalmente por sus propiedades físicas y por la temperatura y composición de la columna. El soluto más rápido sale de la columna en primer lugar, seguido de los solutos restantes en el orden correspondiente.

Como se ha nombrado, este cromatógrafo consta de dos columnas con distintas polaridades colocadas en paralelo donde se produce la separación de los distintos componentes de la muestra a analizar. En la primera columna se produce la separación del oxígeno, nitrógeno, metano y monóxido de carbono; y en la segunda, la del aire, metano y dióxido de carbono. Debido a que el gas se bifurca en dos columnas es necesario calcular la relación que hay entre ambas para saber exactamente la cantidad de componente que pasa por cada una.

Para calcular dicha relación primero se toma el área del componente que se resuelve en ambas columnas, en este caso el metano, y se calcula el cociente entre el área de metano de la columna 2 entre el área de metano de la columna 1. A continuación es necesario saber el área

del CO_2 , en la columna 1, el cual se obtiene mediante el gráfico dividiendo el área de CO_2 de la columna 2 con la relación calculada anteriormente.

A continuación se presentan las ecuaciones para calcular tanto la relación de metano en ambas columnas, como el área total de CH_4 y CO_2 en la muestra:

$$RelCH_4 = \frac{AreaCH_4Col2}{AreaCH_4Col1} \quad [3.1]$$

$$Area\ CO_2\ Col1 = \frac{Area\ CO_2\ Col2}{Rel\ CH_4} \quad [3.2]$$

$$\sum A(CH_4)_{total} = A(CH_4)_{col_1} + A(CH_4)_{col_2} \quad [3.3]$$

$$\sum A(CO_2)_{total} = A(CO_2)_{col_1} + A(CO_2)_{col_2} \quad [3.4]$$

Finalmente, para obtener el porcentaje de CH_4 y CO_2 final se siguen los siguientes pasos:

1. Calcular el área total:

$$\sum A_{total} = A(CO_2)_{total} + A(CH_4)_{total} \quad [3.5]$$

2. Cálculo del porcentaje de CH_4 :

$$\%CH_4 = \frac{A(CH_4)_{total}}{\sum A_{total}} \quad [3.6]$$

3. Cálculo del porcentaje de CO_2 :

$$\%CO_2 = 100 - \%CH_4 \quad [3.7]$$

En la figura 3.2 se muestra una imagen del cromatógrafo empleado:



Figura 3.2. Cromatógrafo de gases, Agilent 7820

- Mufla, estufa, pesa y desecador.

Estos cuatro aparatos se utilizaban a la hora de calcular los sólidos totales y los sólidos volátiles. La estufa se utiliza para introducir la muestra durante 24 horas a una temperatura de $100\ ^\circ C$ y de esta forma se consigue eliminar la humedad que presenta la muestra; la mufla se emplea a $550\ ^\circ C$ durante 1 hora, temperatura a la cual se descomponen los sólidos volátiles posteriormente por diferencia de pesado se pueda calcular la cantidad de sólidos volátiles de

la muestra, quedando los sólidos fijos retenidos en la cápsula; y el desecador se emplea para enfriar la muestra después de ser introducida tanto en la estufa como en la mufla.



Figura 3.3. Pesa.



Figura 3.4. Desecador.

- Peachímetro.

El peachímetro es un sensor utilizado por el método electroquímico para medir el pH de una disolución. Funciona a través de un par de electrodos, uno de calomel y otro de vidrio, que poniendo de referencia uno de ellos mide la diferencia de potencial con el otro electrodo en función de la alcalinidad que presente la muestra. Este equipo se emplea para determinar el pH a lo largo de la preparación de los biodigestores, una vez finalizado la digestión, y al realizar la reactivación de los sistemas de digestión.

3.1.2 Productos químicos.

Los productos químicos para alcanzar las condiciones óptimas de fermentación fueron:

- Agua destilada.
- Ácido clorhídrico HCl, Merk 37%.
- Cloruro de amonio (NH₄Cl), Sigma-Aldrich.99,5-100,5%.
- Carbonato cálcico (CaCO₃), Riser.
- Disolución de buffer con pH 7.
- Lentejas de hidróxido sódico (NaOH), Schalau 99%.
- Nitrógeno como atmósfera inerte.

3.2 Set de biodigestores.

El experimento a realizar consistía en un set con biodigestores y sus duplicados colocados en un baño termostático a 31,5 °C.

Los biodigestores son recipientes de vidrio de unos 250 mL de capacidad que contiene su propia tapa de plástico. En el set van colocados en 2 líneas paralelas, cada frasco al lado de su respectiva réplica. Cada biodigestor se encuentra cerrado herméticamente mediante unos tapones de goma y conectado con sus respectivas conexiones y válvulas a otro recipiente (botellón) de 1 L de capacidad. Este botellón en su interior contiene una disolución de agua destilada y HCl en una concentración de 0,1M, que contiene una tira de papel milimetrado que se utilizará para mantener un control sobre el volumen de gas producido. Se emplea la solución acidulada para evitar que el dióxido de carbono se disuelva en el medio acuoso. De cada botellón sale una manguera que está acoplada a un recipiente de unos 6 L donde se recogerá el agua que ha sido desplazada por el gas generado.

El motivo por el que cada muestra se realiza dos veces es la posible variación del equilibrio del sistema provocada por la extracción del gas a la hora de medir su composición. Por ello, los digestores colocados a la derecha del termo están destinados a la toma de muestra, mientras que los colocados a la izquierda se utilizan para la medida precisa de la producción de gas diaria.



Figura 3.5. Set de biodigestores.

3.2.1 Preparación de los biodigestores.

La materia prima utilizada en este proyecto fue restos de la poda de un campo de golf, restos de comida de la cafetería de la facultad de Química de la Universidad de La Laguna, residuos agrícolas en mal estado y los lodos de depuradora, que se obtuvieron de la EDAR de S/C de Tenerife.

Para comenzar, lo primero que se realizó fue una mezcla de unos 500g lo más homogénea posible a la que se llamó FORSU. La fracción de FORSU utilizada varió a lo largo de los experimentos. La mezcla inicial fue elaborada a partir de 1/3 de restos de cafetería; que contenía granos de arroz, pan, restos de pollo, chorizo, garbanzos, carne guisada, patatas fritas y restos de charcutería, etc. Y 2/3 de residuos agrícolas en mal estado como era el caso de plátanos, tomate, lechuga, naranjas, calabaza, etc. Estas proporciones de FORSU fueron aplicadas en los biodigestores F1, F2 y FG1.

Según los resultados que se iban obteniendo se decidió cambiar la fracción del FORSU para el resto de las muestras, esta vez estaba compuesto por 2/3 de restos de una cafetería y 1/3 de residuos agrícolas. De esta forma los resultados obtenidos fueron más apropiados.

Previamente a la elaboración de dicha mezcla es necesario que la materia prima haya sido troceada en un tamaño lo más pequeño posible, entre 1 y 2 cm.

Una vez hechos los cálculos necesarios se prepararon los biodigestores en las siguientes proporciones:

Tabla 3.1. Composición de los experimentos realizados.

Experimento	FORSU		Poda campo de golf	Lodos
	Crudo	Cafetería		
F1	20	10	----	---
F2				
FL	1,37	2,73	----	120,9**
FG1	17,5	8,75	8.75	----
FG2	8,75	17,5		
FG3				
FGL1	0,5	1	0,5	48
FGL2	3,27	6,53	3,3	37*
FGL3				
* Relación lodo/Residuos=1/1				
** Relación Lodo Residuo según Norma DIN 38414-S8 y directriz VDI 4630				

Como se puede comprobar se montaron un total de 9 digestores. Se pesaron las cantidades de cada residuo según la Tabla 3.1 y se introdujeron en los correspondientes biodigestores. El digestor FL tuvo un procedimiento diferente en su elaboración, este fue llevado a cabo según la Norma DIN 38414-S8 y directriz VDI 4630, que se explicará posteriormente.

A continuación, se agregó 145 mL de agua destilada, se mezcla el contenido y se mide el pH inicial. Posteriormente se agregan 2,4g de NH_4Cl ; 5 mL de una disolución de buffer de pH7 y 270 mg de CaCO_3 . Se vuelve a mezclar el contenido de cada biodigestor y se accede a medir el

pH, para comprobar que esté dentro del rango óptimo de la actividad metanogénica, entre 7,5-8,5. Dado que en todos los biodigestores elaborados se encontraban con un pH más ácido del adecuado, se añadió hidróxido sódico en forma de lentejas hasta obtener el pH óptimo.

Para el digestor FL fue necesario preparar una disolución de lodos condicionada a la Norma DIN 38414-S8 y directriz VDI 4630, una vez que se cumplan los requisitos de dicha norma lo único que se añade es una disolución saturada de CaCO_3 en agua destilada y se mide su pH inicial, el pH tendrá que estar en el rango nombrado en el párrafo anterior. Por lo que en el caso de que sea necesario se podrá añadir NaOH hasta obtener el pH buscado.

Finalmente se cerraron todos los biodigestores y se conectaron con sus correspondientes válvulas y conexiones. Una vez sellado el biodigestor se procede a realizar vacío durante 5 minutos para desplazar el O_2 contenido en el digestor y se inyecta N_2 gaseoso para crear una atmósfera inerte necesaria para el proceso anaerobio.

Por último, se comprueba que no haya posibilidad de fuga de gas, se abren y cierran las válvulas rápidamente para expulsar el exceso de N_2 y se sumergen los biodigestores en el baño a $31,5\text{ }^\circ\text{C}$.



Figura 3.6. Realización de vacío para una muestra.

Cada día se realiza una agitación manual de cada digestor y se procede a la posterior lectura de variación de volumen de gas producido y determinación de la composición del biogás.

3.2.2 Condiciones de diseño según la Norma DIN 38414-S8 y directriz VDI 4630.

El acondicionamiento del digestor FL, se basó en la Norma DIN 38414-S8, para la que se requiere que el sistema permita determinar el volumen de biogás generado en un proceso estándar de fermentación, con la capacidad de contener una muestra homogénea a una temperatura de trabajo en el rango mesofílico.

- 1) De acuerdo con la norma DIN 38414-S8 y directriz VDI 4630 son necesarios los siguientes pasos:
- 2) Adquisición de muestras (sustrato) e inóculo.

- 3) Determinación del contenido de materia seca (MS) del sustrato y el inóculo de acuerdo con la norma DIN EN 12880, en la cual se indica que cada muestra debe ser colocada en un horno a $105 \pm 5^\circ\text{C}$, dejándolo secar hasta obtener una masa constante. Los valores relacionados con la masa para el residuo seco y contenido de agua son la diferencia entre la masa antes y después del secado.
- 4) Determinación del contenido orgánico de materia seca (MSO) del sustrato y el inóculo de acuerdo con la norma DIN EN 12879, se indica que cada muestra debe ser colocada en un horno de mufla a $550 \pm 25^\circ\text{C}$. La pérdida por ignición se calcula a partir de la diferencia de la masa antes y después del proceso de recocido.
- 5) Cálculo de los pesos del sustrato y el inóculo, basados en la directriz VDI 4630:
 - a) Con el fin de estandarizar el proceso de fermentación, en cada muestra se deberá tener entre el 1,5% a 2% del peso total de la mezcla (M_w) presente como inóculo. La cantidad de inóculo a utilizar para el experimento está dada por la siguiente ecuación:

$$m_{MSO} = MF * MSO \quad [3.8]$$

- b) Para evitar inhibiciones en el proceso de fermentación, debe cumplirse la siguiente relación:

$$\frac{MSO_{sustrato,mezcla}}{MSO_{inóculo,mezcla}} \leq 0,5 \quad [3.9]$$

- c) Con la ayuda de esta ecuación, podemos determinar el contenido de materia orgánica seca del sustrato (MSO):

$$\frac{\frac{m_{MSO,sustrato}}{m_{mezcla}}}{\frac{m_{MSO,inóculo}}{m_{mezcla}}} \leq 0,5 \quad [3.10]$$

$$\frac{m_{MSO,sustrato}}{m_{MSO,inóculo}} \leq 0,5 \quad [3.11]$$

- d) El contenido de materia seca en la mezcla no debe ser más del 10%, con el fin de garantizar la cantidad de masa adecuada para el experimento.

$$MS = \frac{MF_{sustrato} * MS_{sustrato} + MF_{inóculo} * MS_{inóculo}}{MF_{mezcla}} \quad [3.12]$$

Finalmente, preparación de la mezcla (sustrato, inóculo y agua) hasta alcanzar un volumen de 250 ml tal cual se ha explicado en el epígrafe 3.2.



Figura 3.7. Preparación de la muestra FL.

3.2.3 Reactivación de los biodigestores.

Cuando se observa una parada durante días en la producción de biogás, hay que tener en cuenta que esto puede ser debido a la disminución del pH por debajo del rango de operación óptimo (7,5-8,5). Para poner fin a este problema es necesario llevar a cabo una reactivación del sistema ajustando el pH hasta los valores adecuados.

El procedimiento para la reactivación de los digestores es el siguiente:

- 1) Se cierran las válvulas de salida de gas en ambas réplicas a la vez.
- 2) Se desconectan los biodigestores del sistema.
- 3) Abrir cada digestor y medir el pH.
- 4) Probablemente se encuentre con un pH ácido, por lo que se añaden las lentejas de NaOH para basificar la muestra.
- 5) Se vuelve a medir el pH.
- 6) Se repite el paso 4 y 5 hasta conseguir un pH óptimo.
- 7) Se cierran los digestores herméticamente con sus correspondientes tapones y conexiones y se somete a un proceso de vacío durante 5 minutos.
- 8) Se vuelve a inyectar N₂ gaseoso y posteriormente se eliminará su exceso.
- 9) Finalmente se introducen en el baño a 31,5 °C conectándolo nuevamente al sistema.

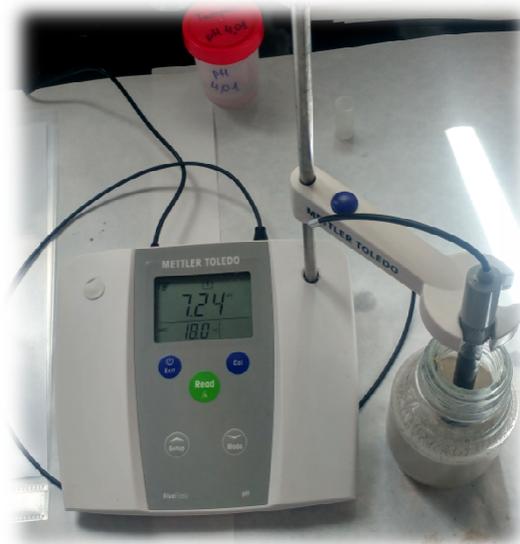


Figura 3.8 Medida del pH para la reactivación de la muestra

3.2.4 Análisis de la composición de biogás.

El análisis de la composición de biogás se realizó en un cromatógrafo de gases con la ayuda de una jeringa estanca con válvula para gases de 1 mL. Debido a que el cromatógrafo se encontraba dos plantas por debajo del set de biodigestores era aconsejable cerrar dicha válvula después de cada toma de muestra para evitar la pérdida de gas en el trayecto.

A continuación, se puede observar en la figura 3.2 que el punto de toma de muestra está compuesto por una T que conecta por un lado al digestor con su frasco volumétrico y por otro lado lo conecta a una pipeta con un septum por donde se tomará la muestra.

Para la toma de muestra, primero se debe cerrar la válvula que conecta el digestor con su frasco volumétrico y posteriormente introducir la jeringa en el septum, es aconsejable bombear unas 3 veces para que el gas que se vaya a medir sea representativo de lo que haya en el interior del digestor.

Finalmente se inyectaba en el biogás muestreado en el cromatógrafo, solo se inyectan una cantidad de 0,6 ml de biogás.

El tiempo de análisis del cromatógrafo se estableció en 5 minutos, para que le dé tiempo de analizar todos los gases presentes en la muestra de biogás, siendo el último gas analizado el CO₂, el cual tiene un tiempo de residencia algo más de 4 minutos.

De esta forma se obtendrá una serie de picos como aparecen en la figura 3.9, que representará el gas presente para cada tiempo de residencia. Midiendo el área de estos picos se adquiere la composición del gas.

dicha figura se puede encontrar dos picos de metano, esto es debido a que la peculiaridad del cromatógrafo utilizado tiene dos columnas en serie específicas para la detección de los componentes principales del biogás, al introducir el gas, éste se bifurca por ambas columnas. En la figura 3.9 se pueden apreciar los tres primeros picos que están analizados por la primera columna y los tres últimos por la segunda columna.

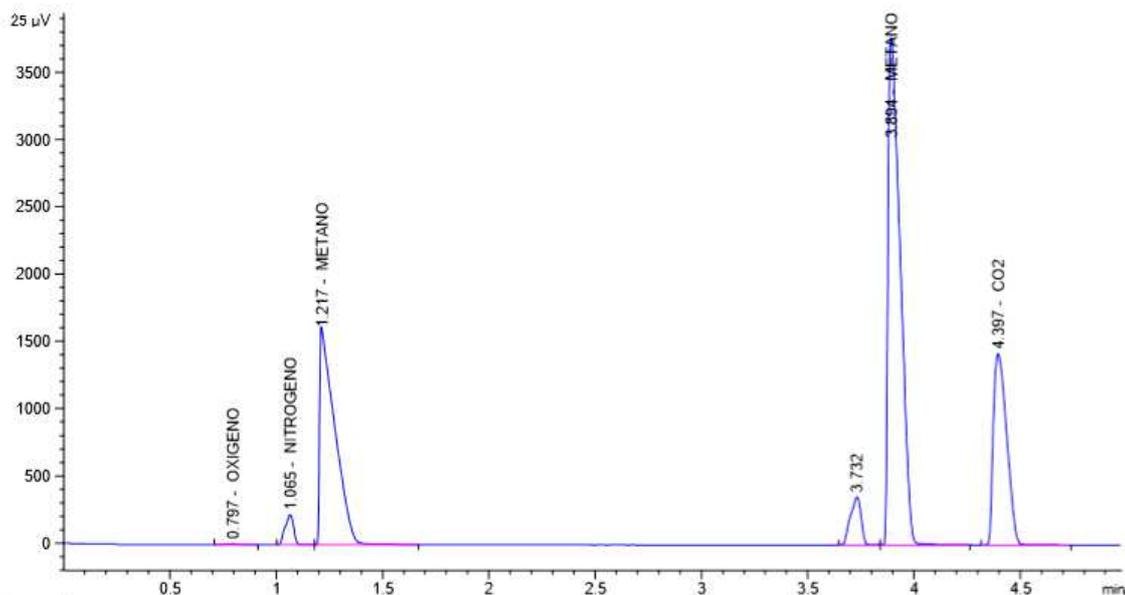


Figura 3.9. Ejemplo de la composición de gases obtenida del cromatógrafo.

3.2.5 Volumen de biogás producido.

Para poder llevar un control sobre la cantidad de biogás producido, es necesario colocar una tira de papel milimetrado al frasco volumétrico de 1 L que está conectado para cada digestor. Por diferencia de altura de la cantidad de agua desplazada (h) y sabiendo el diámetro de dicho frasco (d= 9,2 cm) se podrá calcular el volumen de biogás generado según la ecuación [3.13].

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * h \quad [3.13]$$

El volumen calculado se llevó a condiciones normales, siendo las condiciones de laboratorio, temperatura de 18 °C y presión de 724 mmHg para cada muestra.

La medida se realizaba de lunes a viernes apuntando la hora de lectura, para obtener una variación de volumen en un tiempo determinado.

3.2.6 Determinación de Sólido totales(ST)y volátiles (SV).

Todas las materias primas utilizadas en las mezclas han sido sometidas a un análisis de sólidos antes del montaje del digestor y una vez finalizado el proceso de digestión. Ya que es importante conocer el porcentaje de sólidos volátiles y totales, porque se tratan de unos de los parámetros que nos da información de la materia orgánica que hay en las muestras, con posibilidad de ser transformada en biogás.

El procedimiento que se siguió fue el siguiente:

- 1) Se pesan dos capsulas de porcelana donde se colocarán posteriormente las muestras (A).
- 2) Se pesan los crisoles con un gramo de muestra a analizar.(B)
- 3) Se colocan los crisoles en la estufa a 105 °C durante 24 hora, de esta forma se consigue eliminar la humedad que presenta la muestra.
- 4) Una vez transcurrido el tiempo se sacan ambas muestras de la estufa y se coloca durante media hora en el desecador para su posterior pesado (C).
- 5) A continuación, se colocan las capsulas en la mufla durante 1 hora a 550 °C.
- 6) Finalmente se sacan los crisoles de la mufla se coloca nuevamente en el desecador durante media hora y por último se vuelve a pesar (D).

Aplicando las siguientes ecuaciones se puede obtener el porcentaje de ST y SV:

$$7) \%ST = \frac{C-A}{B-A} * 100\% \quad [3.14]$$

$$8) \%SV = \frac{C-D}{C-A} * 100\% \quad [3.15]$$

Donde:

A= Peso de crisoles (g).

B= Peso de Crisol más muestra (g).

C= Peso de la cápsula con la muestra después de sacarla de la estufa a 105 °C durante 24 horas (g).

D= Peso de la cápsula con la muestra después de sacarla de la mufla a 550 °C durante 1 hora (g).



Figura 3.10. Medida de sólidos volátiles



Figura 3.11. Muestras para medir los sólidos en suspensión.



Figura 3.12. Residuos que quedan en el biodigestor.

4. Resultados y discusión.

En este trabajo se analiza la influencia de la composición del digestato en producción y composición del biogás obtenido durante su procesado. Se estudia la digestión de una fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, FORSU, formada por distintas concentraciones de residuos agrícolas crudos y cocinados procedentes de una cafetería. Se analiza además cómo influye en el proceso de digestión la incorporación de un estructurante, podas de campos de golf, al FORSU anterior, así como utilizar en ambos casos un inóculo. El inóculo escogido ha sido lodos aerobios y anaerobios recogidos en la EDAR de S/C de Tenerife.

También se estudia qué puede originar la parada de producción de gas, analizando la influencia del pH del digestato y la posible reactivación del sistema mediante ajuste del pH. Además se busca una relación de la producción de gas con la composición del digestato medida en porcentaje en sólidos totales y volátiles.

Se comienza presentando un estudio sobre la generación de FORSU en la Comunidad Autónoma de Canarias, así como de la posible cuantificación de las podas de campos de golf. La digestión de las diferentes muestras estudiadas se muestran analizando en primer lugar la digestión cuando solo se utiliza FORSU como materia prima tanto sin inóculo como con inóculo, pasando a continuación a los resultados obtenidos cuando se utiliza estructurante junto con el FORSU, de nuevo con y sin inóculo.

4.1 Producción de residuos.

Se conoce como Residuos Sólidos Urbanos (RSU) los que son generados en los domicilios, comercios, oficinas y servicios, y que además carezcan de algún tipo de peligro. Dentro de este tipo de residuos, los utilizados en este proyecto y por lo tanto del que se va a hablar más detalladamente es de la fracción orgánica (FORSU).

Los datos de la producción de FORSU se calculan tomando en consideración los datos del Estudio de Composición y Caracterización de los Residuos Sólidos Urbanos de la Comunidad Autónoma de Canarias.

En Canarias en el año 2012 la cantidad de RSU generada por habitante fue 1,74 kilogramos, esto ha llevado a un valor promedio de 1.269.000 t/año, mientras que su fracción orgánica representa 361.000 t/año, es decir representa un 28,45%.

Debido al crecimiento de población y el conocimiento de la cantidad de residuo que se produce, así como el porcentaje de este residuo que se convierte en FORSU, se ha estimado de forma aproximada la cantidad de esta fracción que se obtendrá en el periodo 2013-2020 para Canarias que se muestra en la figura 4.1.

Otro tipo de residuo muy interesante y utilizado en esta experiencia son los lodos de depuradora, se trata de una mezcla de agua y sólidos separada del agua residual procedente de las estaciones de depuradoras.

El lodo se caracteriza por ser muy líquido, más de un 95% es agua. Su composición es variable y depende de la carga de contaminación del agua residual inicial y de las características técnicas de los tratamientos llevados a cabo en las aguas residuales.

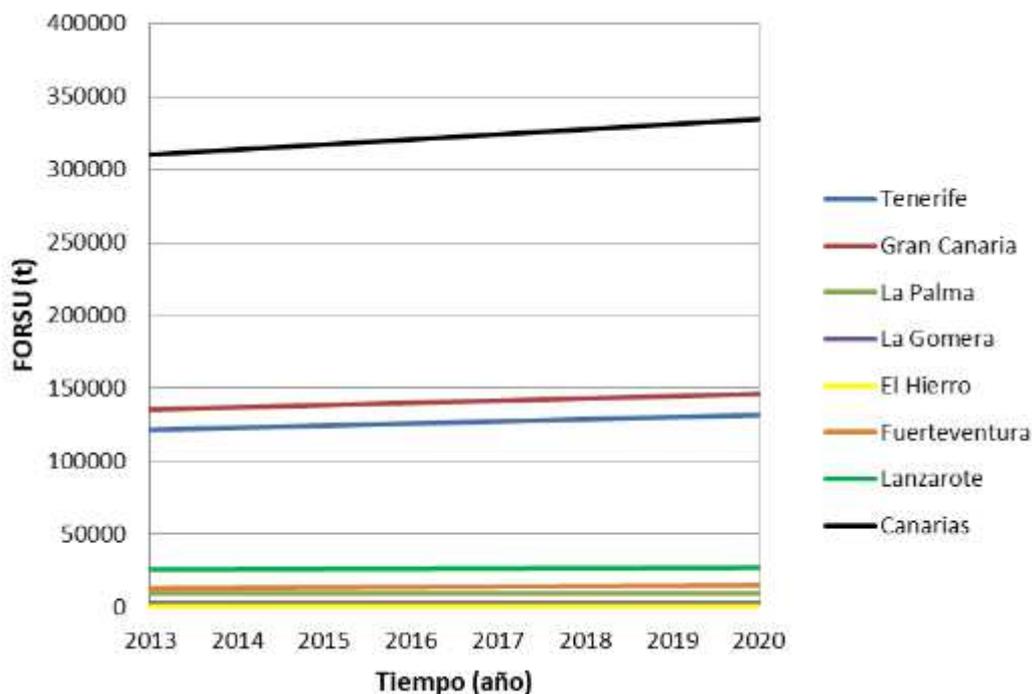


Figura 4.1. Estimación de la cantidad de FORSU para el periodo 2013-2020.

Fuente: Brito Alayón A. 2016

Según los datos del Registro Nacional de Lodos, en Canarias la generación de dicho residuo presentó ciertas fluctuaciones entre los años 2003 al 2009, pero a partir de ese momento se mantiene prácticamente constante en ≈ 31.400 toneladas de materia seca al año.

Teniendo los datos de la generación de lodos correspondiente al total en Canarias, y con los datos de población y de generación de lodos totales se ha estimado la distribución por Islas, para el año 2020 tomando solo en consideración aquellas islas donde la cantidad de residuos generados son significativos. Dicha estimación se muestra en la tabla 4.1:

Tabla 4.1. Generación de Residuos de Lodos de Depuradoras estimados para el 2020.

Isla	Producción total (t.m.s)
Tenerife	13.470
Gran Canaria	12.980
La Palma	1.290
Fuerteventura	1.560
Lanzarote	2.120
CANARIAS	31.420

En este trabajo se ha utilizado como estructurante restos de podas de campo de golf, de los que no existen datos oficiales de su generación. Se ha procedido a buscar información directamente en los diferentes campos de golf de la Isla de Tenerife y en general no disponen de ese dato, solo uno de ellos los tiene cuantificado, siendo su valor $109 \text{ m}^3/\text{año}$, recogido en una única poda al año. Teniendo en cuenta que en la isla existen ocho campos de golf de aproximadamente las mismas dimensiones podría suponerse una producción total de unos $872 \text{ m}^3/\text{año}$. Para saber su producción en toneladas sería necesario hacer un estudio de la

densidad del vegetal, pero en cualquier caso la generación de residuo es alta y justifica intentar encontrar un posible aprovechamiento.

4.2 Producción de biogás: FORSU.

En este apartado se representan los resultados obtenidos para la digestión de FORSU con y sin inóculo, experimentos F1, F2 y FL.

Se analiza tanto la producción de biogás como su composición. Además, se estudia el efecto de la digestión en las características del digestato, sus sólidos volátiles (SV) y sólidos totales (ST). Los resultados obtenidos de dichos ensayos se presentan en las tablas AI.1 a AI.3 del Anexo I de esta Memoria, y se comenzará analizando la digestión del FORSU en ausencia de inóculo.

4.2.1 FORSU sin inóculo.

El FORSU utilizado en estos experimentos está compuesto por 2/3 de residuos agrícolas, frutas y vegetales, denominados a partir de este momento como “crudo” y 1/3 de restos de comida procedentes de una cafetería, es decir, la relación crudo/cafetería es igual a 1/2.

De los dos experimentos realizados en las mismas condiciones, uno de ellos no se pudo completar debido a ciertos problemas de tipo técnicos. El experimento restante, F2, presenta una producción de biogás que se muestra en la figura 4.2.

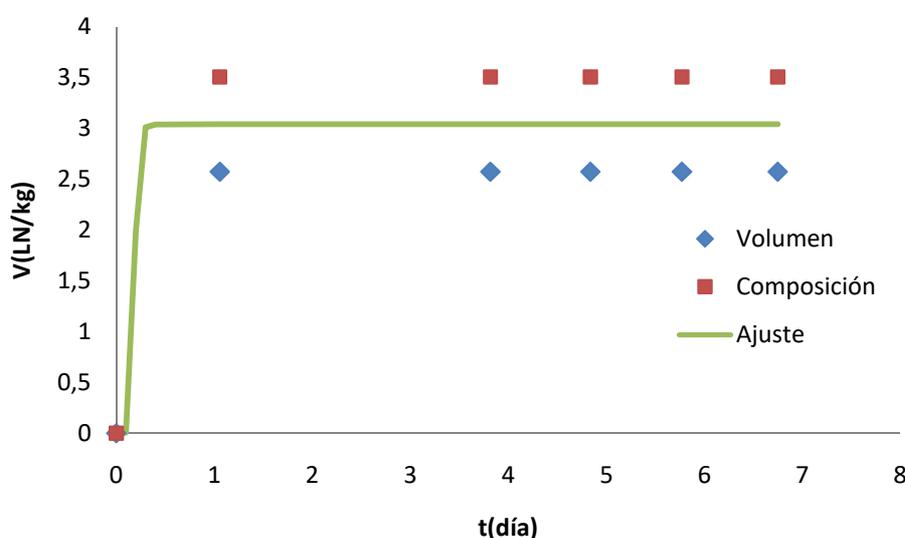


Figura 4.2. Producción de biogás: FORSU: Crudo/Cafetería=1/2

La producción de gas se presenta como volumen específico (V) en LN de gas/kg de muestra en función del tiempo y en ella se presentan los valores experimentales como puntos tanto para los digestores utilizados para medir el volumen como los de medida de la composición y que se identifican como volumen y composición en la leyenda. Esta terminología se usará en el resto de la Memoria. La diferencia entre los valores de producción de biogás en ambos sistemas se debe principalmente a la heterogeneidad del material, lo que dificulta la toma de

muestras homogéneas para pequeñas cantidades de masa. Los valores de volumen de gas producidos en las dos réplicas se pueden ajustar a una ecuación del tipo:

$$V_G = \frac{a}{1+bt^c} \quad [4.1]$$

Donde a, b y c son constantes y V_G el volumen de gas producido en LN/kg y t el tiempo en días. Los valores de a, b y c obtenidos cuando se utiliza solo FORSU son:

$$a=3,042$$

$$b=1,05 \cdot 10^{-7}$$

$$c=-9,58$$

La curva que representa esta ecuación se ajusta a los datos experimentales con una desviación de $\approx 10\%$, dentro del error experimental de estos sistemas.

En la figura se puede observar que durante las primeras 24 horas el sistema ya había alcanzado su máxima producción. A continuación sufrió una parada, se esperó unos días para ver si el sistema se reactivaba por sí mismo pero no se obtuvo ningún resultado, por lo que el día 7 se decidió analizar el pH de la muestra para comprobar si un exceso de acidez había detenido la digestión.

En la tabla 4.2 se presentan los valores del pH tanto de la muestra inicial como del digestato al que se le ha ajustado el pH justo antes de comenzar la digestión a un valor entre 7 y 8. Además también se encuentran los valores correspondientes al digestor después de haberse sometido al proceso de digestión.

Tabla 4.2. Valores de pH para la muestra de FORSU sin inóculo.

	PRIMERA DIGESTIÓN			1ª REACTIVACIÓN		2ª REACTIVACIÓN
	Muestra	Digestato, pH _o	Final, pH _f	Inicial, pH _o	Final, pH _f	Inicial, pH _o
Composición	4,4	7,97	4,11	8,12	6,47	8,1
Volumen	4,38	8,07	4,02	8,28	6,32	8,13

Si el pH obtenido se encuentra por debajo de 7 unidades se considera un pH ácido, y podría ser una de las principales causas de dicha parada por muerte bacteriana. Como se observa en la tabla, el pH había disminuido a valores en entorno a 4 por lo que en ese momento se realiza un nuevo ajuste del pH a valores sobre 8. Este procedimiento se repetirá cuando ocurra la próxima parada de producción.

En la figura 4.3 se presenta la producción de gas desde el comienzo de la digestión teniendo en cuenta todas las reactivaciones para los dos digestatos, de nuevo los puntos representan los datos experimentales y la línea continua la curva que mejor los representa.

Se observa que, tras la primera reactivación, la respuesta del sistema es muy buena llegando a producir más del doble de gas que la generación inicial. Sin embargo, para la segunda reactivación no se origina ningún tipo de respuesta por parte del sistema, a pesar de no haber sufrido una gran disminución del pH como se muestra en la tabla 4.2. Esto puede ser ocasionado por la muerte de los microorganismos que actúan en la producción del biogás o por falta de materia prima en el digestato.

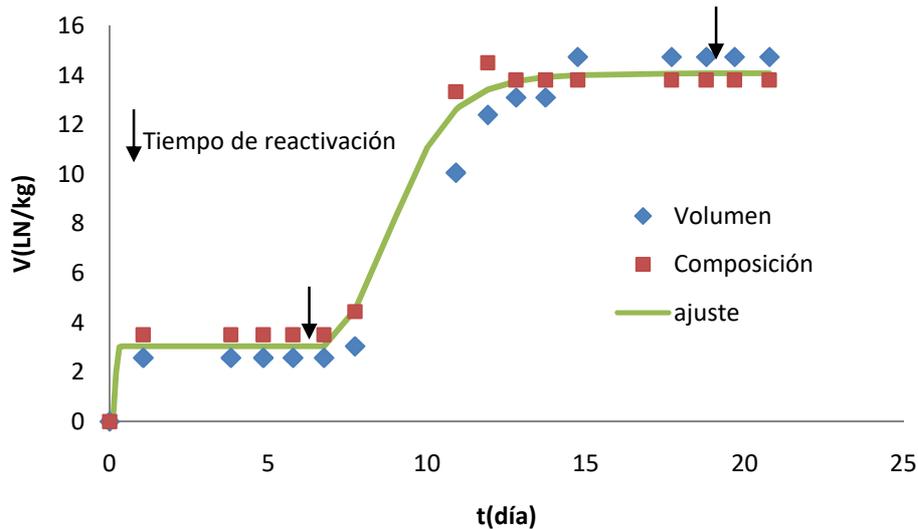


Figura 4.3. Producción de biogás. FORSU: Crudo/Cafetería=1/2, con reactivación por pH.

La producción de gas después de la reactivación puede ajustarse a curvas del tipo:

$$V_G = n + \frac{a}{1+bt^c} \quad [4.2]$$

Siendo los valores de las diferentes constantes:

$$n=2,49$$

$$a=11,58$$

$$b=4,26 \cdot 10^9$$

$$c=-10,09$$

En la figura 4.3 la línea continua muestra la curva que representa esta ecuación y de nuevo los puntos experimentales solo muestran desviaciones inferiores al 10%.

Para conocer el estado del digestato una vez ocurrida la biodigestión éste se ha caracterizado determinando su composición en sólidos totales y sólidos volátiles, éstos últimos son los que dan lugar al proceso de digestión anaerobia y producen el biogás.

En la tabla 4.3 se presenta la caracterización de las muestras y del digestato mediante la medida de los sólidos totales y sólidos volátiles obtenida según las ecuaciones [3.14] y [3.15] del capítulo de Técnica experimental.

Tabla 4.3. Variación del porcentajes de sólidos totales y sólidos volátiles antes y después de la digestión. Experimento F2

	ST(%)	SV(%)
MUESTRA	57,15	30,75
DIGESTATO V	3,48	96,78
DIGESTATO C	4,03	69,27

Se observa para los dos digestores una disminución de los porcentajes de sólidos totales, pero un aumento del de los sólidos volátiles disponibles en ese sólido. Los datos indican que,

en total, ha habido una disminución de sólidos volátiles entre el 84 y el 81% y por tanto aún queda un 17% por digerir, por lo que la falta de sólidos volátiles no puede ser el motivo de la parada de producción, como tampoco lo es el pH, ya que se mantiene dentro de los valores establecidos. Lo que sí puede ser la causa es la baja concentración de sólidos existentes en el digestato, que aunque sean principalmente sólidos volátiles ya están muy diluidos en el digestato. En cualquier caso sería interesante hacer un estudio microbiano del digestato para ver en qué estado se encuentra la flora bacteriana.

En lo que respecta a la composición del gas obtenido en todos los casos es 100% CO₂, por lo que su utilización posterior debería de ir dirigida a obtener BioDME o Metanol.

4.2.2 FORSU con inóculo.

Los resultados obtenidos cuando se utiliza en la digestión solo FORSU indican una baja producción de gas de composición solo CO₂, con el objetivo de aumentar la producción se ha añadido a la mezcla, como inóculo, lodos anaerobios procedentes de la EDAR de S/C de Tenerife. En el experimento, FL, se utilizó un FORSU compuesto por 1/3 de "crudo" y 2/3 de restos de cafetería, es decir Crudo/Cafetería=1/2 y la cantidad de lodos se determinó utilizando la Norma DIN 38414-S8. Los resultados de producción de biogás se muestran en la figura 4.4, donde los símbolos representan los valores obtenidos para las dos réplicas utilizadas.

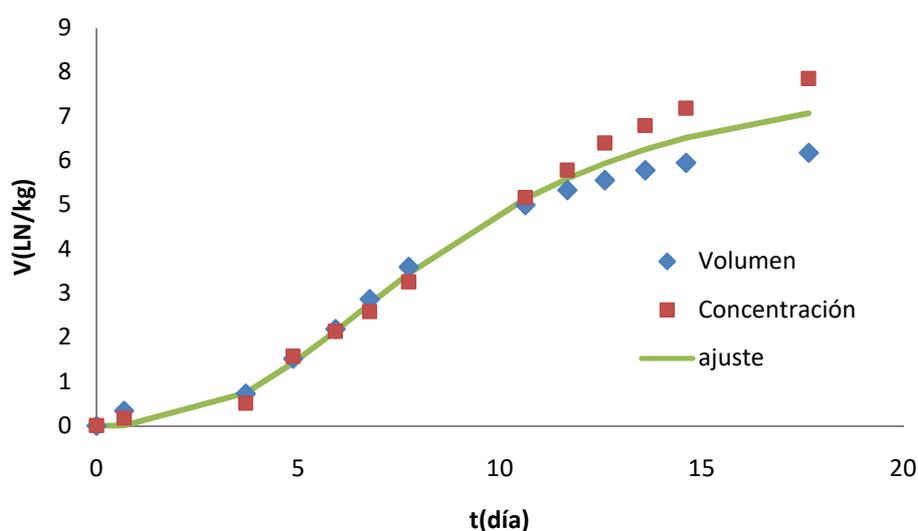


Figura 4.4. Producción de biogás. FORSU con inóculo. Experimento FL.

La diferencia entre los valores de producción de biogás en ambos sistemas se debe principalmente a la heterogeneidad del material.

Si se compara la producción de gas cuando no se utilizó inóculo, figura 4.3, se puede apreciar que con inóculo la generación es continua de una forma suave y del día 5 hasta el día 10 la producción lo hace de una forma más rápida llegando a casi duplicar el gas obtenido cuando no se usa inóculo, hasta obtener ≈ 7 LN/(kg de muestra). Es entonces cuando se observa que comienza a aumentar más lentamente, síntoma que significa que se está comenzando a parar el sistema.

Los valores de volumen de gas producidos en los dos sistemas se pueden ajustar al tipo de ecuación [4.1], obteniéndose los siguientes parámetros:

$$V_G = \frac{8,124}{1+332,68(t)^{-2,685}} \quad [4.3]$$

La generación de gas acumulada obtenida mediante esta ecuación se representa mediante la línea sólida de la figura 4.4, y los puntos experimentales presentan una desviación inferior al 10%, aceptable teniendo en cuenta la naturaleza heterogénea de la muestra.

La variación de las características del digestato, antes y después de la digestión se presentan en la Tabla 4.4 donde se muestra la medida de los sólidos totales y sólidos volátiles obtenida según las ecuaciones [3.14] y [3.15] del capítulo de técnica experimental.

Tabla 4.4. Variación de porcentajes de sólidos totales y sólidos volátiles durante la digestión. Experimento FL.

	ST(%)	SV(%)
MUESTRA	3,35	97,21
DIGESTATO V	23,19	7,32
DIGESTATO C	23,91	6,98

Se observa para los dos digestores un aumento de los porcentajes de sólidos totales, probablemente debido a la fuerte disminución de sólidos volátiles. Los datos indican que ésta disminución se encuentra entre el 48 y el 49% y por tanto aún queda aproximadamente un 50% por digerir. Es decir, el experimento podría haberse mantenido durante más tiempo para ver como sería su evolución.

Por tanto, la incorporación de inóculo al digestato aumenta la cantidad de gas generado, haciéndolo además de una forma más gradual.

En lo que respecta a la composición del gas obtenido, en la figura 4.5 se presenta la variación de la concentración de metano con el tiempo en dicho gas expresada en porcentaje en volumen.

Una diferencia muy importante con los resultados obtenidos cuando solo se utiliza FORSU es la aparición de metano desde el primer día de digestión, aumentando su concentración con el tiempo, siendo de más de un 40% el segundo día y por tanto cumpliendo con los requerimientos para ser considerado como biogás desde el punto de vista energético. La concentración llega a ser de prácticamente un 70% a los siete días.

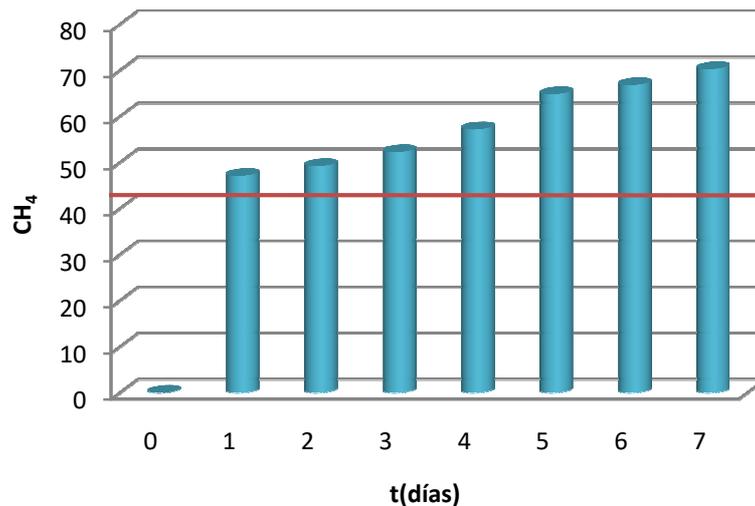


Figura 4.5. Variación de la composición del biogás. % en CH₄. Experimento FL.

4.3 Residuo: FORSU y podas de campo de golf.

En este apartado se analiza la influencia de añadir un estructurante como son los restos de campo de golf al FORSU para su digestión posterior con o sin inóculo y los experimentos realizados se identifican como FG1 a FG3 y FGL1 a FGL3 en la Tabla 3.1 del capítulo de técnicas experimentales, donde además se detallan los datos de los materiales utilizados. Se estudia tanto la producción de biogás como su composición analizando el efecto de la digestión en las características del digestato, a través de sus medidas de sólidos volátiles (SV) y sólidos totales (ST).

Los datos de producción y composición del gas obtenido durante la digestión en estos ensayos se encuentran en las tablas AI.4 a AI.9 y AII.4 a AII.5 de los Anexos I y II de esta Memoria.

4.3.1 Producción de biogás sin inóculo.

Como ya se comentó, se analiza la influencia del estructurante en la calidad y cantidad del gas obtenido, así como de diferentes composiciones de FORSU, es decir, con distinta relación crudo/cafetería.

Se comienza analizando los resultados obtenidos para un FORSU compuesto por 2/3 de crudo y 1/3 de restos de cafetería, con una relación 2/1 de FORSU/Estructurante, Experimento FG1. Los datos de producción de gas obtenidos para este caso se presenta en la figura 4.6, donde se presentan el volumen de gas generado, por kilogramo de residuo utilizado, antes y después de un proceso de reactivación por ajuste de pH.

En la figura 4.6 se muestran, por medio de símbolos las dos producciones de Biogás obtenidas de los dos biodigestores utilizados en el experimento, uno para medida de solo volumen de gas y otro para medidas de composición y volumen.

Como se puede apreciar, hubo una producción de Biogás bastante rápida durante las primeras 24 horas, después se produjo una parada. Se decidió esperar hasta el día 5 por si se

producía algún cambio por parte del sistema y al no ocurrir esto, se procedió a comprobar si había habido cambios de pH y proceder a su ajuste.

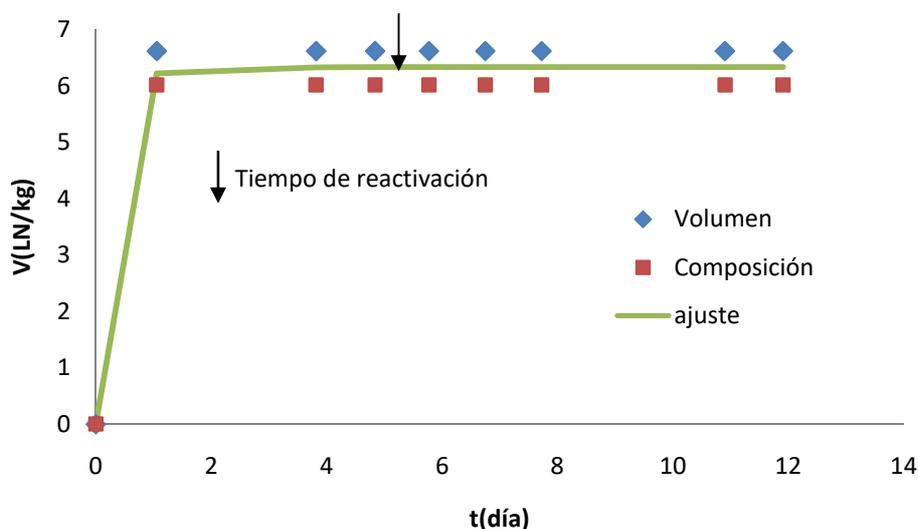


Figura 4.6. Producción de biogás. Crudo/Cafetería=2/1, Estructurante/FORSU=1/2.Experimento FG1

En la tabla 4.5 se encuentran los valores del pH de la muestra y del digestato, antes y después, de someterse al proceso de digestión.

Tabla 4.5. Medidas del pH para el experimento FG1.

	PRIMERA DIGESTIÓN			1ª REACTIVACIÓN
	Muestra,pH ₀	Digestato,pH _f	Final,pH _f	Inicial,pH ₀
Composición	4,66	8,25	5,65	8,32
Volumen	4,64	8,22	5,97	8,21

Se observa que durante la digestión el pH disminuyó de valores cercanos a 8 hasta valores inferiores a 6 en los dos biodigestores, por lo que se procedió a ajustar el pH y se continuó la digestión.

Una vez se reactivaron las muestras no se obtuvo ninguna respuesta por parte del sistema, esto puede ser debido a una parada de la producción provocada por la muerte de los microorganismos metanogénicos encargados de la producción de biogás. Por lo que se dio por finalizada la prueba a los 12 días desde su iniciación.

Todos los resultados experimentales de producción de gas obtenidos se ajustaron al mismo tipo de ecuación [4.1], ya comentada, siendo en este caso sus parámetros:

$$V_G = \frac{6,34}{1+0,020(t)^{-2,51}} \quad [4.4]$$

La línea continua de la gráfica muestra la ecuación anterior y los resultados experimentales se desvían de ella menos del 4%, por lo que se puede decir que la ecuación representa bien a los datos experimentales.

En la Tabla 4.6 se presenta la caracterización de las muestras y del digestato obtenido una vez finalizada la digestión, mediante una medida de los sólidos totales y sólidos volátiles.

Tabla 4.6. Variación del porcentaje de sólidos totales y sólidos volátiles antes y después de la digestión. Experimento FG1.

	ST(%)	SV(%)
Muestra	48,64	38,62
DIGESTATO V	4,44	84,24
DIGESTATO C	3,81	81,25

Se observa para los dos digestores una disminución de los porcentajes de sólidos totales, pero un aumento del de los sólidos volátiles disponibles en ese sólido. Esto indica que ha habido una disminución de sólidos volátiles entre el 80 y el 86%, es decir, aún queda un $\approx 14\%$ por digerir. Por tanto, la falta de sólidos volátiles no puede ser el motivo de la parada de producción, ya que aún quedan disponibles en el medio, pero si puede ser la causa la baja concentración de sólidos totales. En cualquier caso sería interesante realizar un estudio microbiano del digestato para conocer el estado de la flora microbiana.

La baja cantidad de gas obtenida para este digestato podría ser debida a que la proporción de crudos/cafetería en la muestra no sea la idónea para producir una buena digestión, por lo que se han realizado dos experimentos, FG2 y FG3 en las mismas condiciones, donde la relación crudo/cafetería del FORSU está en una proporción de 1/3 de crudo y 2/3 de cafetería, es decir en relación inversa ala anterior, pero con la misma concentración de estructurante.

Como ya se comentó los resultados obtenidos se encuentran en el Anexo I y en las figuras 4.7 y 4.8 se muestran los valores de la producción de biogás generado para cada uno de ellos, teniendo en cuenta que al igual que en los experimentos anteriores cada uno de ellos está a su vez duplicado. Estos datos corresponden al periodo de digestión comprendido entre su inicio y hasta la parada de producción de gas sin ninguna reactivación del sistema:

Las dos figuras muestran un comportamiento similar, con un aumento rápido de la producción de gas en los primeros cinco días, para luego aumentar ligeramente y detenerse la producción sobre los 10 días de digestión. En cualquier caso el comportamiento de las muestras no es exactamente igual, ya sea comparando FG2 con FG3 como haciendo la comparación con las réplicas de cada una de ellas. Esta diferencia en la producción de biogás demuestra la importancia de la homogeneidad del residuo que se utiliza como materia prima. Estos errores experimentales suelen ser muy comunes cuando las muestras son de poca cantidad de materia prima, debido a la dificultad de conseguir una mezcla uniforme de residuo.

La variación de la producción de biogás con el tiempo se ajusta a la misma línea de tendencia encontrada en los experimentos anteriores, es decir a la ecuación 4.1:

$$V_G = \frac{a}{1+b(t)^c} \quad [4.5]$$

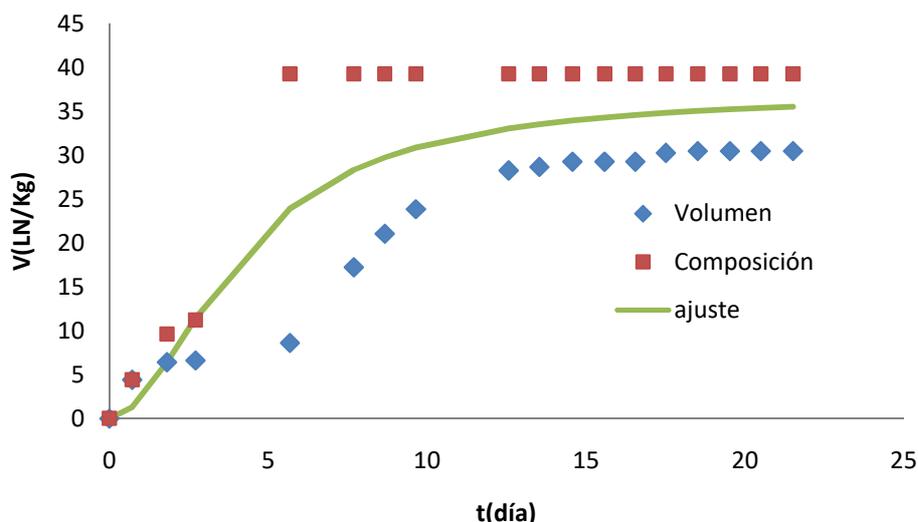


Figura 4.7. Producción de biogás. Crudo/cafetería=1/2, Estructurante/FORSU=1/3. Experimento FG2.

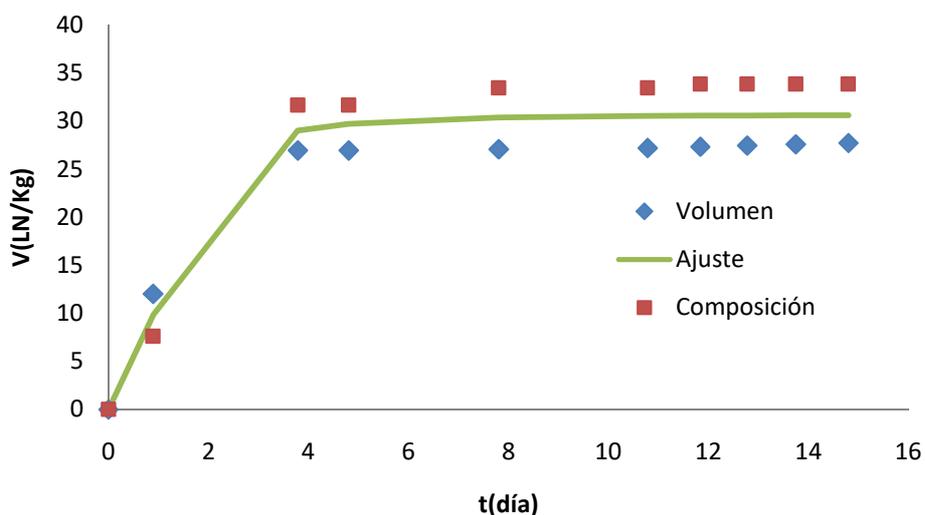


Figura 4.8. Producción de biogás. Crudo/cafetería=1/2, Estructurante/FORSU=1/3. Experimento, FG3.

Los valores de las constantes para los dos experimentos comentados se presentan en la Tabla 4.7:

Tabla 4.7 Coeficientes de la ecuación 4.1 para los experimentos FG2 y FG3.

Experimento	a	b	c
FG2	37,108	14,807	-1,894
FG3	30,679	1,591	-2,494
Total	36,181	8,199	-1,534

Considerando el error experimental ya comentado se podrían ajustar todos los datos experimentales a una sola curva y los coeficientes obtenidos son los que se encuentran en la Tabla 4.7 en la fila identificada como Total.

Con el objeto de comparar de una forma más clara las diferencias encontradas al utilizar las diferentes composiciones de residuos, en la figura 4.9 se muestra la producción de biogás obtenida para las diferentes mezclas.

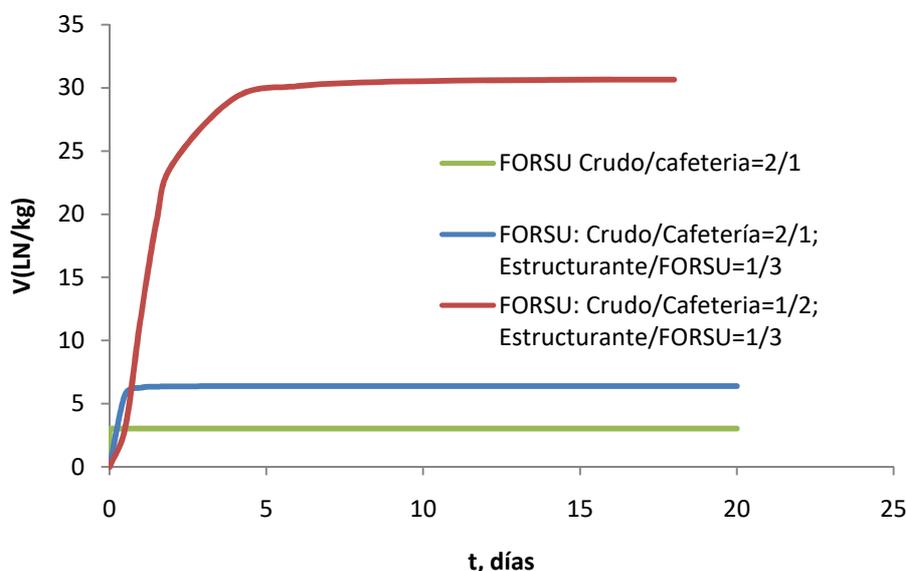


Figura 4.9. Comparación de la producción de biogás para las distintas proporciones de estructurantes y de componentes de FORSU.

En ella se observa que para un FORSU de la misma composición, Crudo/Cafetería=2/1, la presencia del estructurante duplica la producción máxima de gas, pasando de 3 a 6,4 LN/(kg de muestra), pero todavía el volumen final obtenido es muy bajo. En cambio la figura muestra que manteniendo la misma concentración de estructurante, al variar la composición del FORSU con una mayor proporción de los componentes obtenidos en una cafetería es decir Crudo/Cafetería=1/2, la proporción de gas prácticamente se quintuplica, pasando de 6,4 a 30,6 LN/(kg de muestra). Por tanto, añadir estructurante al FORSU hace que este aumente la producción de gas, y la composición del FORSU tiene una gran influencia en la digestión del residuo.

Una vez que la producción de gas fue nula durante un periodo de varios días, en el experimento FG2 se procedió a un análisis de los sólidos totales y volátiles del digestato para comprobar si todavía quedaba materia prima por digerir, los resultados se encuentran en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Variación del porcentaje de sólidos totales y sólidos volátiles antes y después de la digestión. Experimento FG2.

	ST(%)	SV(%)
MUESTRA	31,28	97,57
DIGESTATO V	9,02	89,00
DIGESTATO C	14,76	88,26

Como se comentó anteriormente, Digestato V y C se refiere a los duplicados realizados para medir solo volumen (V) y composición y volumen (C). Para los dos digestores se observa una

disminución de los porcentajes de sólidos totales y volátiles disponibles en ese sólido. Los datos indican que ha habido una disminución de sólidos volátiles entre el 74 y el 57% y por tanto aún queda entre un 26 y 46% por digerir. Esto quiere decir que la falta de sólidos totales y volátiles no puede ser el motivo de la parada de producción, por lo que sería conveniente realizar un estudio microbiano del digestato para ver las condiciones en que se encuentra la flora microbiana. Otra razón podría ser una disminución del pH, por lo en el experimento FG3 se procedió a medir el pH del digestato, encontrándose los resultados que se muestran en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9. Medidas del pH para el experimento FG3.

	PRIMERA DIGESTIÓN			1ª REACTIVACIÓN
	Muestra,pH0	Digestato,pHf	Final,pHf	Inicial,pHo
Composición	6,09	8,07	5,74	8,21
Volumen	6,03	8,04	5,6	8,6

En dicha tabla en las columnas pertenecientes al periodo inicial se observa que el pH ha disminuido a valores inferiores a seis, lo que explica la parada de producción de gas.

Por tanto se procedió a un proceso de reactivación ajustando el pH a los valores que se encuentran en las columnas pertenecientes a la primera reactivación y se continuó la digestión, obteniéndose los resultados representados en la figura 4.10:

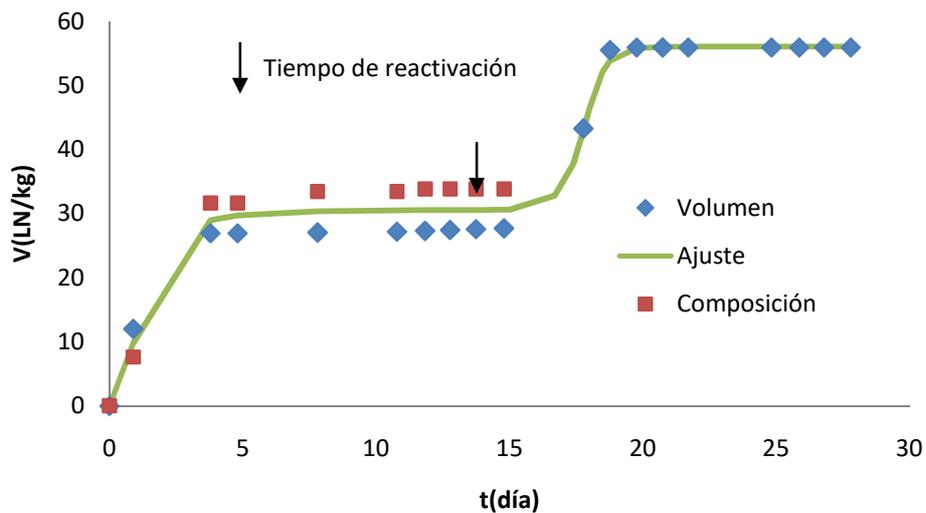


Figura 4.10. Producción de biogás: Crudo/cafetería=1/2, Estructurante/FORSU=1/3. Experimento, FG3 reactivado.

Después de la reactivación, el comportamiento fue análogo a la inicial, con un aumento brusco en la producción de biogás tras la reactivación del proceso. Durante los primeros 5 días dando lugar a unos 28 LN/kg de muestra, es decir prácticamente duplicó el volumen que se había obtenido en el momento de la parada. A partir de ese instante no se volvió a producir gas, dando por finalizado el experimento a los 27 días.

La variación de la generación de gas con el tiempo después de la reactivación de la digestión se ajusta de nuevo a una curva del tipo de la ecuación [4.2], que solo tiene validez en el

intervalo de tiempo estudiado, siendo valores de las constantes obtenidas mediante el programa “table curve” los siguientes:

$$V_G = 27,716 + \frac{28,22}{(1 + 7,48 \cdot 10^{91}(t)^{-73,58})}$$

El aumento en la producción de gas obtenido sugiere que el motivo de la parada se debe a la disminución de la acidez del medio, que en el caso de no reajustar los pH a tiempo podría provocar la muerte de los microorganismos metanogénicos.

Al finalizar el experimento se caracterizaron los digestato mediante las medidas de sus sólidos totales y volátiles y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.10:

Tabla 4.10. Variación del porcentaje de sólidos totales y sólidos volátiles antes y después de la digestión. Experimento FG3

	ST(%)	SV(%)
MUESTRA	26,42	91,76
DIGESTATO V	15,76	86,72
DIGESTATO C	14,41	86,17

Se observa para los dos digestores una disminución de los porcentajes de sólidos totales y de los sólidos volátiles disponibles en ese sólido. Los datos indican que ha habido una disminución de sólidos volátiles entre el 44 y el 49% y por tanto aún queda aproximadamente un 53% por digerir, lo que de nuevo sugiere que la falta de sólidos volátiles no sea el motivo de la parada de producción y también se podría proceder a realizar un estudio microbiano del digestato para encontrar la razón de la parada de la digestión.

Cuando se comparan las figuras 4.3 y 4.10 se vuelve observar el efecto positivo de la inclusión del estructurante en la mezcla, desde el punto de vista de la producción de gas, ya que el volumen final generado es de 55LN/(kg de muestra) frente a los 14LN/(kg de muestra) que se obtienen cuando solo se utiliza FORSU.

4.3.2 Producción de biogás digestión con inóculo.

La mejora observada cuando al FORSU se le añade como inóculo lodo de depuradora hace pensar que éste sería también el caso cuando se tienen mezclas de FORSU/Estructurante, por lo que se ha estudiado la influencia en la producción y composición del biogás de añadir inóculo a la mezcla comentada. El inóculo utilizado ha sido lodos anaerobios procedentes de la EDAR de S/C de Tenerife.

Se llevaron a cabo tres experimentos, todos ellos con el mismo FORSU, formado por crudos y restos de cafetería en la proporción Crudo/Cafetería=1/2 y con la misma composición de estructurante de Estructurante/FORSU=1/3. Dos de ellos presentaban las mismas proporciones de residuo a lodo de 1:1, experimentos FGL2 y FGL3, en el restante se utilizó la concentración de lodo correspondiente a la Norma DIN 38414-S8, FGL1.

Los resultados obtenidos para la producción y composición del biogás se encuentran en las Tablas AI.7 hasta la AI.9 del Anexo I y AII.7 a AII.9 del Anexo II de esta Memoria.

En la Figura 4.11 se presentan los datos de la producción de biogás obtenidos para el experimento FGL1:

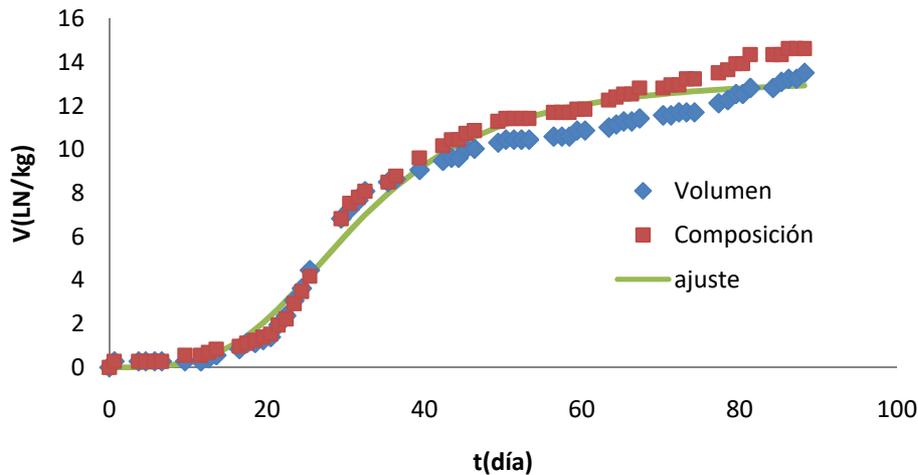


Figura 4.11. Producción de biogás: Crudo/cafetería=1/2, Estructurante/FORSU=1/3. Inóculo según la Norma DIN 38414-S8. Experimento FGL1.

En la figura 4.11 los símbolos representan los valores experimentales para las dos réplicas del experimento, y en ella se observa un comportamiento similar al de la figura 4.4 cuando se digería solo FORSU con inóculo. Durante los primeros 10 días la producción de biogás fue prácticamente nula, produciéndose a partir de entonces una autoreactivación por parte del propio sistema. La producción de gas creció rápidamente hasta los 50 días, continuando a partir de ese momento de una forma más suave hasta los 70 días desde el inicio, donde la muestra comenzará a detenerse.

De nuevo se observa el efecto positivo del estructurante, ya que la adición del mismo supone que la producción de biogás se duplique.

En este caso la producción de biogás se correlacionó con el tiempo mediante una ecuación del mismo tipo que la utilizada en los casos anteriores ecuación [4.1], obteniéndose:

$$V_G = \frac{13,271}{1+2,31 \cdot 10^5 (t)^{-3,554}} \quad [4.7]$$

La curva de tendencia que representa esta ecuación se muestra como una línea sólida en la figura 4.11 y todos los puntos se ajustan a ella con un error inferior al 7%.

En la tabla 4.11 se presenta la caracterización de las muestras y del digestato resultante después de la digestión, mediante las medidas de los sólidos totales y volátiles obtenidas según las ecuaciones [3.14] y [3.15] situadas en el capítulo de técnica experimental.

Se observa para los dos digestores una disminución de los porcentajes de sólidos totales y de los sólidos volátiles disponibles en ese sólido. Los datos indican que ha habido una disminución de sólidos volátiles entre el 75 y el 76% y por tanto aún queda un $\approx 24,5\%$ por digerir y el experimento podría haberse continuado por un periodo más largo de tiempo.

Tabla 4.11. Variación del porcentaje de sólidos totales y volátiles antes y después de la digestión. Experimento FGL1

	ST(%)	SV(%)
MUESTRA	23,23	97,02
DIGESTATO V	7,87	71,15
DIGESTATO C	8,35	65,09

En las figuras 4.12 y 4.13 se presentan la generación de gas producida cuando se utiliza el mismo digestato del experimento anterior, pero una concentración diferente de lodo, en este caso la relación digesto/lodo es igual a 1/1, experimentos FGL2 y FGL3, y entre ellos solo se diferencian en que en el FGL3 los lodos eran frescos.

Como en experimentos anteriores cada uno de ellos está duplicado para seguir el volumen y la composición del gas obtenido, y se representan los valores obtenidos como símbolos. Los digestores presentan un comportamiento similar, con una pequeña producción los dos primeros días, que se ralentiza hasta aproximadamente el día 14 donde comienza una producción rápida. Es en esta zona de la generación donde se observan diferencias entre los dos digestores, el experimento FGL2 a partir del día 30 el aumento es más suave presentando tendencia a detenerse hacia los 90 días. En cambio el experimento FGL3 presenta un crecimiento continuo más lento que el anterior y que solo comienza a suavizarse hacia los 60 días.

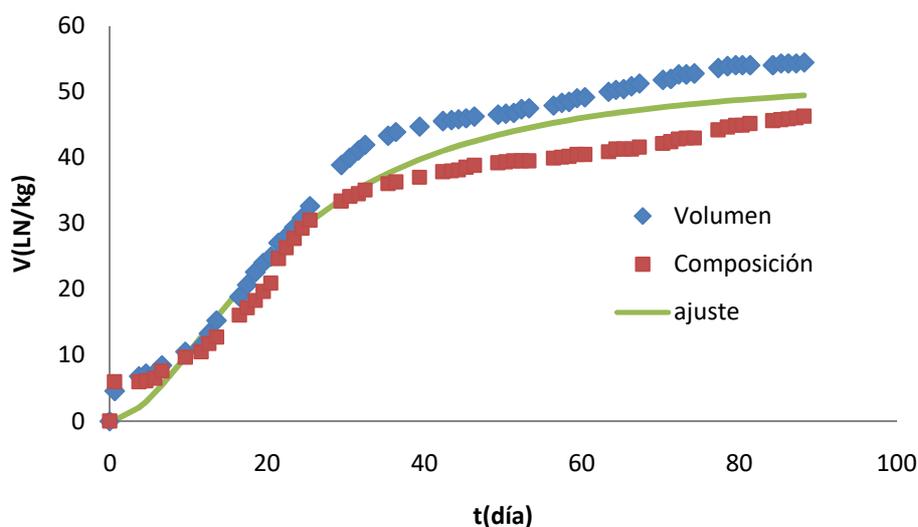


Figura 4.12. Producción de biogás: Crudo/cafetería=1/2, Estructurante/FORSU=1/3. Digestato/inóculo=1/1. Experimento FGL2.

Los valores experimentales de ambas figuras se correlacionan con la misma línea de tendencia encontrada en experimentos anteriores, es decir a la ecuación [4.1] y los valores de los coeficientes encontrados se muestran en la Tabla 4.12 y las curvas de tendencias se muestran como líneas sólidas en el gráfico.

El comportamiento, ya comentado, de que el experimento con lodos frescos presenta una generación de gas más continua una vez que ha pasado el periodo inicial de poca actividad, que se observa siempre que se utiliza inóculo, se muestra en la tabla 4.12 con mayores valores

de los coeficientes a y b. En cualquier caso, teniendo en cuenta el error experimental que conllevan estas muestras, así como que en general en la práctica se usan los lodos disponibles en cada momento, se pueden expresar todos los puntos por una única ecuación que se refleja en la fila señalada como total en la tabla 4.12.

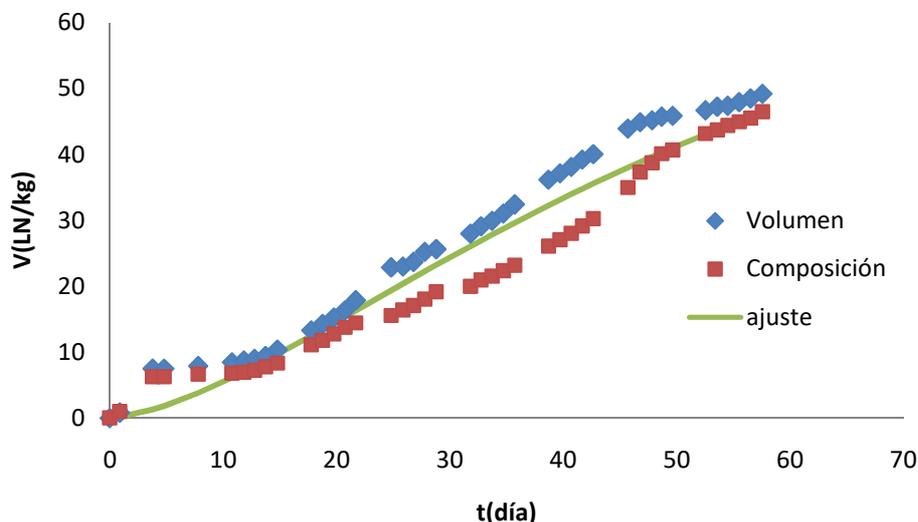


Figura 4.13. Producción de biogás: Crudo/cafetería=1/2, Estructurante/FORSU=1/3. Digestato/inóculo=1/1. Experimento FGL3.

Tabla 4.12. Coeficientes de la ecuación 4.1 para los experimentos FGL2 y FGL3

Experimento	a	B	c
FGL2	53,351	279,28	-1,824
FGL3	93,856	614,23	-1,578
Total	59,765	313,85	-1,681

En la figura 4.14 se establece una comparación entre el biogás generado sin y con presencia de inóculo durante la digestión. En ella se representa la variación de biogás producido, obtenido a partir de las ecuaciones de ajuste encontradas anteriormente.

Se puede observar que la presencia de inóculo produce un retraso en el comienzo de la generación de gas, así, las líneas 2, 3 y 4 presentan un periodo inicial sin producir gas, más largo cuanto mayor es la cantidad de inóculo utilizado, es decir los digestores preparados con proporciones de lodo según la Norma DIN 38414-S8. Ahora bien, esto no significa que den lugar a una menor cantidad de gas, sino que tarda más en comenzar a generarse, siendo el volumen final acumulado más alto, lo que se aprecia cuando se comparan las líneas 1 y 2 y la 3 y 4 que presentan la misma composición en la muestra a digerir uno sin inóculo (1 y3) y otro con inóculo (2 y 4), llegándose a casi duplicar el volumen cuando se utiliza una relación Digestato/inóculo de 1/1.

Cuando se comparan las líneas 3 y 4 se observa de nuevo el efecto beneficioso de incorporar estructurante a la mezcla a digerir y de las líneas 4 y 2 se deduce claramente que un exceso de inóculo hace que el volumen generado de gas sea menor, por lo que se debería realizar un

estudio de cuál sería la concentración óptima de inóculo, para este trabajo sería la comentada de digestato/inóculo=1/1.

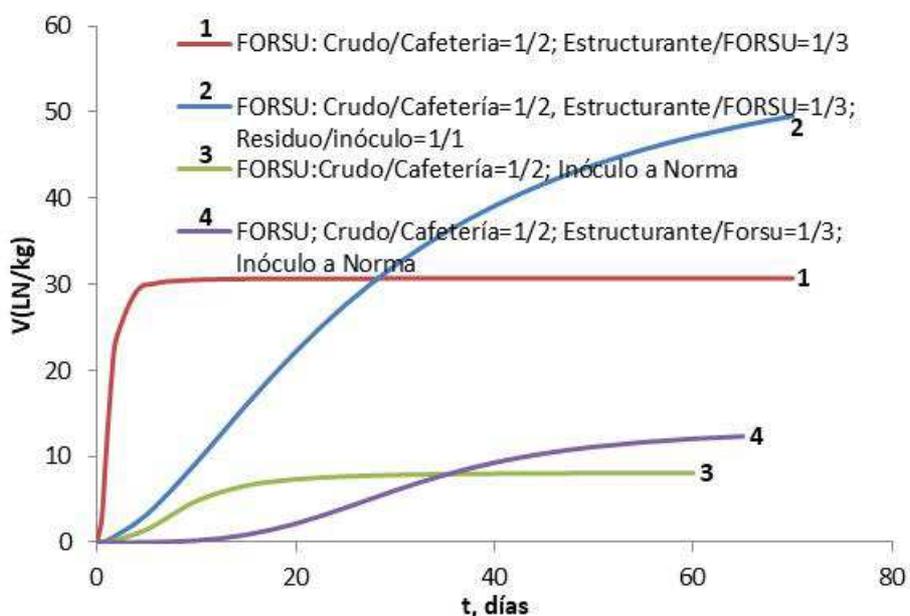


Figura 4.14. Comparación de la Producción de biogás para diferentes concentraciones de inóculo.

Una vez que se dio por finalizada la digestión en los experimentos FGL2 y FGL3, se procedió a un análisis de los sólidos totales y volátiles de digestato, comparándolos con los de muestra original a digerir, y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4. 13:

Tabla 4.13 Variación del porcentajes de sólidos totales y sólidos volátiles antes y después de la digestión. Experimentos FGL2 y FGL3

	Experimento FGL2		Experimento FGL3	
	ST(%)	SV(%)	ST(%)	SV(%)
MUESTRA	10,25	91,12	7,89	40,55
DIGESTATO V	7,31	76,82	4,54	38,61
DIGESTATO C	7,66	65,9	3,89	46,33

Se observa para los cuatro digestores una disminución de los porcentajes de sólidos totales y de los sólidos volátiles disponibles en ese sólido. Los datos indican que ha habido una disminución de sólidos volátiles entre el 40 y el 46% en el experimento FGL2 y entre el 44 y el 45% en el FGL3 y por tanto aún queda aproximadamente un 56,5% de sólidos volátiles. Esto indica que se podría haber mantenido la digestión durante un periodo más largo de tiempo para ver cómo afecta la presencia del inóculo al momento que se detiene la digestión, ya sea por falta de sólidos o por exceso de pH.

4.3.3 Estudio de la composición del biogás a partir de digestatos con y sin inóculo.

En el apartado 4.2 se encontró que el FORSU cuando se digería solo daba lugar a un gas cuyo contenido era solo CO₂, mientras que al añadirle lodo de depuradora como inóculo producía

un biogás con hasta un 70% de CH_4 . En este apartado se estudiará cómo influye la inclusión de inóculo cuando se digiere FORSU y restos de campo de golf (estructurante) en la composición del gas obtenido.

En todas las digestiones donde se utilizó FORSU de distintas composiciones y estructurante, Experimentos FG1 a FG3, se obtuvo un gas que era 100% CO_2 , es decir que no cumple las condiciones para ser considerado Biogás. Estos resultados indican que la presencia del estructurante influye en la cantidad de gas obtenido, aumentándola, pero no en su calidad.

Cuando se introduce inóculo en las muestras se producen cambios significativos en la composición del gas obtenido, como se observa en las figuras 4.15 a 4.17 donde se muestra la variación con el tiempo de la composición del biogás obtenido en los experimentos FGL1 a FGL3 respectivamente.

En la figura 4.15 se puede observar la presencia de metano desde los primeros días de la digestión, llegando a concentraciones superiores al 40% a partir del sexto día, apreciándose a partir de ese momento un aumento progresivo de la concentración de metano hasta llegar a valores prácticamente del 70%. Un porcentaje de metano importante, ya que a partir del 40% como se encuentra señalado en la figura, ya se considera que se trata de biogás.

En lo que respecta a las muestras donde la concentración de inóculo es menor, relación digestato/inóculo=1/1, figuras 4.16 y 4.17 muestran una variación de la concentración de metano similar a la de la producción de gas, con una etapa inicial muy baja aumentando con el tiempo de forma suave. El comportamiento de los dos digestores es muy similar, obteniéndose concentraciones de metano del orden del 60% a partir de los 15 días y manteniéndose prácticamente constante a partir de ese momento. Se podría destacar que en la muestra FGL3 la composición de metano es mayor a tiempos cortos, y esto puede ser ocasionado porque los lodos empleados eran lodos frescos, por lo que los microorganismos podrían encontrarse de una manera más activa que en el caso de FGL2.

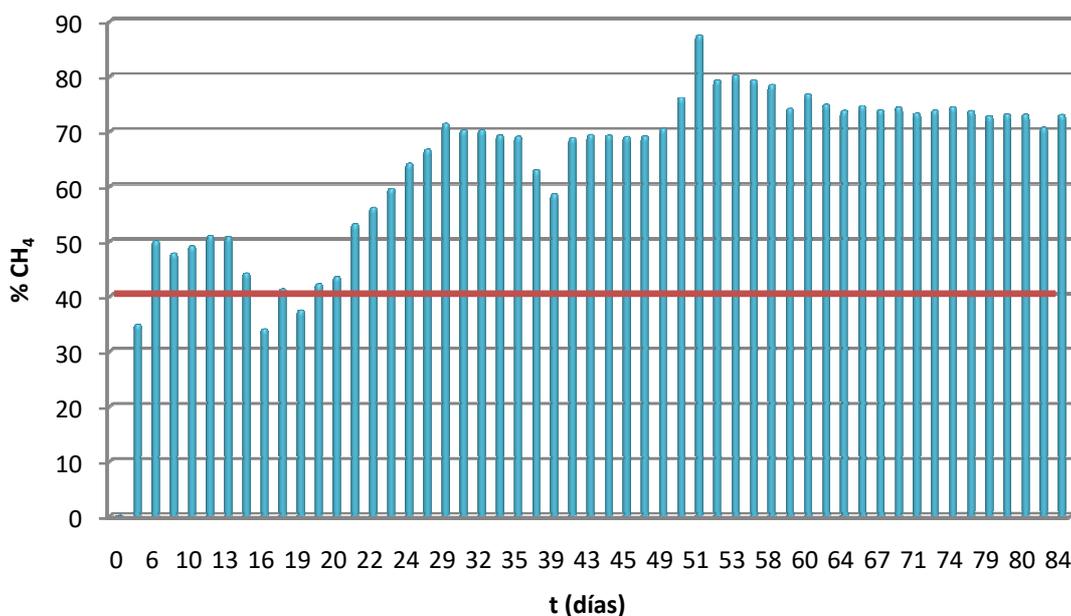


Figura 4.15. Composición de biogás. Porcentaje en CH_4 para el Experimento FGL1

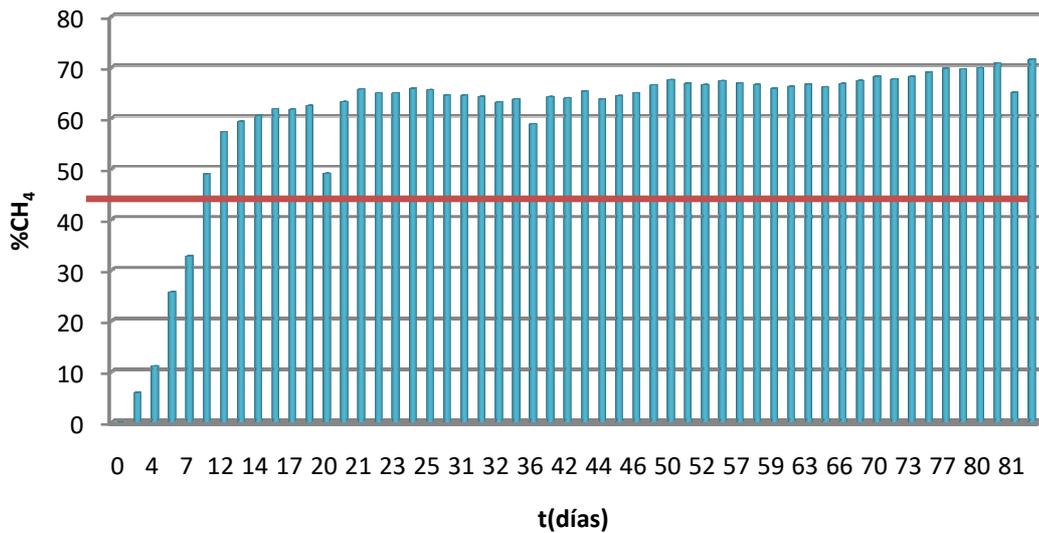


Figura 4.16. Composición de biogás. Porcentaje en CH₄. Experimento para la muestra FGL2.

El experimento FGL1 presentaba un contenido en inóculo superior a los experimentos FLG2 y FGL3, observándose en ese caso que la concentración de metano era más alta a tiempos inferiores.

Por tanto, también en el caso de existir estructurante en la mezcla, la presencia de inóculo influye en la composición del gas obtenido, dando lugar a biogás con concentraciones de CH₄ entre el 60 y el 70%. Pero, al contrario de lo que ocurre con la producción de biogás, que es superior para una menor concentración de inóculo, la concentración de metano es ligeramente superior cuando se utiliza una concentración de inóculo a Norma, es decir más alta.

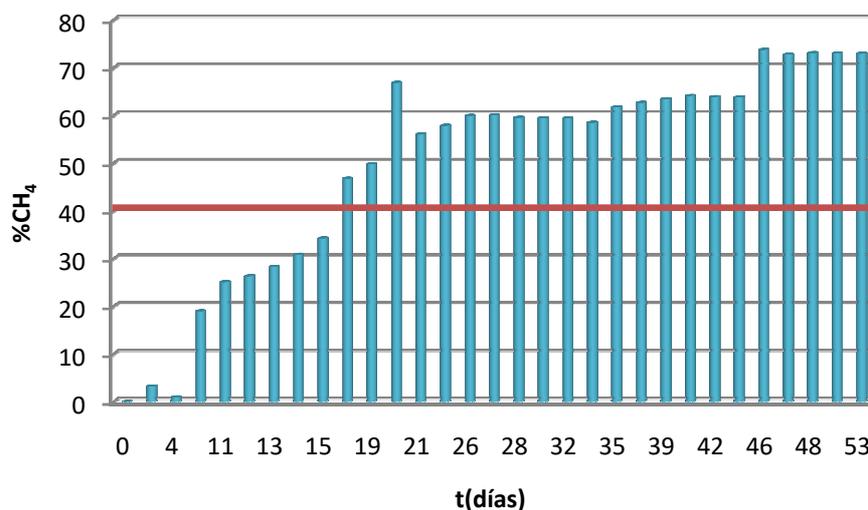


Figura 4.17. Composición de biogás. Porcentaje en CH₄. Experimento FGL3.

En cualquier caso, la composición del gas obtenido cumple claramente los requerimientos para ser considerado Biogás en todos los casos, por lo que si se quiere utilizar con fines energéticos, la digestión debería realizarse añadiéndole al FORSU estructurante, y con una concentración digestato/inóculo=1/1, ya que sería la que daría lugar a una mayor generación de Biogás.

5. Conclusión y Recomendación

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

1. La digestión de un FORSU de composición Crudo/Cafetería=1/2 da lugar a una baja producción de gas de composición solo CO₂. El sistema después de reactivado con un ajuste de pH produce más del doble del gas generado inicialmente, llegando a ≈14 LN/(kg muestra).
2. La variación de la producción de biogás con el tiempo antes de la reactivación por pH se ajusta a ecuaciones del tipo:

$$V_G = \frac{a}{1+bt^c} \quad \text{siendo } a=3,042, b=1,05 \cdot 10^{-7}, c=-9,58$$

Después de la reactivación la ecuación a la que se ajusta es:

$$V_G = n + \frac{a}{1+bt^c} \quad \text{siendo } n=2,49, a=11,58, b=4,26 \cdot 10^9, c=-10,09$$

3. La incorporación de inóculo al digestato, según la Norma DIN 38414-S8, aumenta la cantidad de gas generado a casi el doble, hasta obtener ≈ 7LN/(kg de muestra) haciéndolo además de una forma más gradual.

La producción de gas con el tiempo sigue el mismo tipo de tendencia señalada en la conclusión 1 y en este caso su composición muestra la presencia de metano, llegando a ser del 70% a los 7 días.

4. Al añadir al FORSU un estructurante en forma de podas de campo de golf se aumenta la producción de gas, pero no influye en su composición, que sigue siendo de solo CO₂.
5. La composición del FORSU, es decir la relación Crudo/Cafetería tiene una gran influencia en la digestión del residuo, dando una mayor producción a mayor concentración de residuos de cafetería, llegando a ser de ≈ 35 LN/(kg de muestra). El sistema después de reactivado con un ajuste de pH produce nuevamente hasta un volumen de ≈56 LN/(kg muestra).
6. La introducción de inóculo a la mezcla FORSU/Estructurante ralentiza la producción inicial de gas, dando menor generación para mayores concentraciones de inóculo, es decir el mayor volumen se obtiene para concentración de Residuo/inóculo=1/1, que coincide con la obtenida en ausencia de inóculo. La de generación de gas con el tiempo presenta la misma línea de tendencia de la conclusión 1.
7. También en el caso de existir estructurante en la mezcla la presencia de inóculo influye en la composición del gas obtenido, dando lugar a biogás con concentraciones de CH₄ entre el 60 y el 70%. La concentración de metano es ligeramente superior cuando se utiliza una concentración de inóculo a Norma, es decir más alta, produciéndose metano a tiempos más cortos cuando se utilizan lodos frescos.

8. La composición del gas obtenido, $\approx 70\%$, cumple los requerimientos para ser considerado biogás en todos los casos.
9. Para utilizar el gas obtenido con fines energéticos, la digestión debería realizarse añadiéndole al FORSU formado por Crudo/Cafetería=1/2, podas de campo de golf en una relación Residuo/poda=1/3, y con una concentración digestato/inóculo=1/1.

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

1. The digestion of a FORSU of Crude/Cafeteria waste = 1/2 composition results in a low production of gas which composition is only CO₂. After reactivation with a pH adjustment the system produces more than twice the gas initially generated, reaching ≈ 14 LN/(kg sample).
2. The variation of biogas production with time, before the reactivation by pH, is adjusted to equations of the type:

$$V_G = \frac{a}{1+bt^c} \quad \text{where } a=3,042, b=1,05 \cdot 10^{-7}, c=-9,58$$

After the reactivation the equation to which it adjusts is:

$$V_G = n + \frac{a}{1+bt^c} \quad \text{where } n=2,49, a=11,58, b=4,26 \cdot 10^9, c=-10,09$$

3. The incorporation of inoculum to the digestate, according to DIN 38414-S8, increases the amount of gas generated to almost double, up to ≈ 7 LN / (kg of sample), in addition the generation increases in a more gradual way.

Gas production over time follows the same type of trend indicated in conclusion 1 and in this case, its composition shows the presence of methane, reaching 70% after 7 days.

4. By adding a structuring in the form of golf field waste to FORSU, the gas production is increased, but it does not influence on its composition, which is still only CO₂.
5. The composition of the FORSU, that is the "Crudo" /Cafeteria waste relationship, has a great influence on the digestion of the waste, giving a greater production for a higher concentration of cafeteria waste, reaching ≈ 35 LN/(kg of sample). As Before the system, after being reactivated with a pH adjustment, produces up to a volume of ≈ 56 LN / (kg sample).
6. The incorporation of inoculum to the FORSU/Structuring mixture slows down the initial production of gas, giving less generation for higher concentrations of inoculum, that is, the greater volume is obtained for concentration of waste/inoculum = 1/1, which coincides with that obtained in absence of inoculum. The generation of gas over time presents the same trend line of conclusion 1.
7. In the case of existing structuring in the mixture, the presence of inoculum influences on the composition of the gas obtained, giving rise to biogas with CH₄ concentrations between 60 and 70%. The methane concentration is slightly higher when an inoculum concentration to Norm is used, that is, higher concentration, producing methane at shorter times when fresh sludge is used.

8. The composition of the gas obtained, $\approx 70\%$, meets the requirements to be considered biogas in all cases.
9. To use the gas obtained for energy purposes, the digestion should be done by adding to FORSU (formed by Crude/Cafeteria waste = $\frac{1}{2}$), golf course waste in a ratio waste/ Golf Course waste= $\frac{1}{3}$, and with a relation digestate/inoculum= $\frac{1}{1}$.

Como resultado del presente trabajo se proponen las siguientes **recomendaciones**:

1. Se debería realizar un estudio utilizando un FORSU obtenido de recogida selectiva
2. Se propone realizar un estudio detallado sobre la influencia de distintas concentraciones de estructurante obtenido de residuos de poda de campo de golf sobre la generación y composición del gas obtenido de la digestión del FORSU
3. Realizar un estudio detallado de la influencia de la concentración y tipo de inóculo sobre el proceso.

As a result of the present work, the following **recommendations** are proposed:

1. A study should be conducted using a FORSU obtained from selective collection.
2. A detailed study on the influence of different concentrations of structurant obtained from golf course pruning residues on the generation and composition of the gas obtained from the digestion of FORSU is proposed.
3. Carry out a detailed study of the influence of the concentration and type of inoculum on the process. As a result of this work, the following conclusions have been reached:

6. Bibliografía.

- Agencia Andaluza de la Energía. (2011). Estudio básico del biogás. Consejería de tecnología, innovación y ciencia.
- Brito Alayon, A. (2016). Analisis preliminar de una biorrefineria en Canarias, Rev. Acad. Canar. Cienc. XXVIII, 201-228.
- Camion Actualidad. (2012). Bio-DME, un combustible para reducir el impacto medioambiental
- Cristian Bustos, Karin Suárez. Universidad Politécnica Católica de Chile. "Incorporación del etanol a la matriz energética chilena". (2016)
- Cuesta López, J. (2018). Obtención de biogás a partir de Residuos Sólidos Urbanos para su inyección en Red. Universidad Carlos III de Madrid.
- EurObserver Project, (2017), A study about the Biogas Barometer. Recuperado de <https://www.eurobserv-er.org/biogas-barometer-2017/>
- Fannin, K.F, Biljetina, R. (1987). Reactor designs, in D.P. Chynoweth and R. Isaacson (Eds). Anaerobic Digestion of Biomass. *Elsevier Science, Londres*, pp.141-169.
- Fernández Rodríguez, J. (2012), Biometanización en fases de temperatura de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU), Sevilla, España, editada por la Universidad Internacional de Andalucía.
- Gamer Tobal, C. (3 de abril de 2013). El biogás. Recuperado de narutobal2013.blogspot.com/2013/
- García-Peña, E.I., Parameswaran, P., Kang, D.W., Canul-Chan, M.M., Krajmalnik-Brown, R. (2011). Anaerobic digestion and co-digestion processes of vegetable and fruit residues: Process and microbial ecology. *Bioresource Technology* 102 9447-9455.
- González-Sánchez, M.E, Pérez-Fabiell, S., Wong-Villarreal, A., Bello-Mendoza, R., Yañez-Ocampo, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Rev Argent Microbiol*, 47(3), 229-235.
- He, Z., Xiong, J., Shen Ng, T., Fan, B., Shoemaker, C. A. (2017). Managing competitive municipal solid waste treatment systems: An agent-based approach. *European Journal of Operational Research*, 263, 1063-1077.
- Knox, J.H. 1965. Cromatografía de gases. UTEHA Nº217.
- Leferna, G. A. (2018). Can we equitably manage the end of the fossil fuel era? *Energy Research & Social Science*, 35, 217-223
- Lei, Z., Zou, Z., Dai, C., Li, Q., Chen, B. 2011. Synthesis of dimethyl ether (DME) by catalytic distillation. *Chemical Engineering Science*, Vol.66(14), pp.3195-3203.
- Meyer, A.K.P., Ehimen, E.A., Holm-Nielsen, J.B. (2018). Future European biogas: Animal manure, Straw and grass potentials for a sustainable European biogas production. *Biomass and Bioenergy* 111, 154-164.

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

Ormazabal,M., Prieto-Sandoval,V.,Puga-Leal,R.,Jaca,C.(2018).Circular Economy in Spanish SMEs: Challenges and opportunities. *Journal of CleanerProduction*, 185, 157-167

Rafieenia,R., Pivato, A., Lavagnolo, M. C. (2018). Effect of inoculum pre-treatment on mesophilic hydrogen and methane production from food waste using two-stage anaerobic digestion. *International Journal of hydrogenenergy*, 43, 12013-12022

Sahota, A., Shah, G., Ghosh, P., Kapoor, R., Sengupta, S., Singh, P., Vijay, V., Sahay, A., Kumar Vijay, V., Shekhar Thakur, I.,(2018)). Review of trends in biogás upgradation technologies and future perspectives. *Bioresource Tchnology Reports* 1, 79-88.

Varnero Moreno, M.T. (2011). Manual de Biogás.

Varnero, M.T. 1991. Manual de Reciclaje Orgánico y Biogás. Ministerio de Agricultura (FIA) – Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Santiago, Chile, 48p.

Anexos.

ANEXO I.

Producción de Biogás

En este Anexo se presentan los resultados obtenidos de la producción de gas obtenido de las diferentes materias primas. En las Tablas AI.1 a AI.9 se encuentran los valores de volumen de biogás producido para cada digestor calculados a partir de las medidas de las alturas desplazadas a diferentes tiempos.

AI.1 Producción de Biogás: Residuo: FORSU

En este apartado se presentan los datos de los dos experimentos F1 y F2 donde la única materia prima empleada era el FORSU. Dicho FORSU estaba compuesto por una mezcla de 1/3 de restos de cafetería y 2/3 de crudo. También se mostrarán los datos del experimento FL donde la proporción de FORSU cambió a ser 1/3 de crudo y 2/3 de restos de cafetería y además la muestra inicial contiene inóculo.

Tabla AI.1. Alturas y Volúmenes acumulados para el experimento F1

t(h)	h,(cm)		Vg(cm ³)		VNg(LN/kg)	
	F1-V	F1-C	F1-V	F1-C	F1-V	F1-C
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	2,00	2,00	157,08	157,08	4,68	4,68
21	2,00	2,00	157,08	157,08	4,68	4,68
71	2,00	2,00	157,08	157,08	4,68	4,68
95	2,00	2,00	157,08	157,08	4,68	4,68
119	2,00	2,00	157,08	157,08	4,68	4,68
144	2,30	2,50	180,64	196,35	5,38	5,85
161	2,30	2,50	180,64	196,35	5,38	5,85

Las celdas de color azul indican el día en el que se produjo una reactivación.

Tabla AI.2. Alturas y volúmenes acumulados para el experimento F2.

t(h)	h,(cm)		Vg(cm ³)		VNg(LN/kg)	
	F2-V	F2-C	F2-V	F2-C	F2-V	F2-C
25,35	1,1	1,5	86,39	117,81	2,57	3,51
91,6	1,1	1,5	86,39	117,81	2,57	3,51
116,1	1,1	1,5	86,39	117,81	2,57	3,51
138,5	1,1	1,5	86,39	117,81	2,57	3,51
161,95	1,1	1,5	86,39	117,81	2,57	3,51
185,35	1,3	1,9	102,10	149,23	3,04	4,45
261,6	4,3	5,7	337,72	447,68	10,06	13,34
285,75	5,3	6,2	416,26	486,95	12,40	14,51
307,05	5,6	5,9	439,82	463,38	13,10	13,80
329,35	5,6	5,9	439,82	463,38	13,10	13,80

t(h)	h,(cm)		Vg(cm ³)		VNg(LN/kg)	
	F2-V	F2-C	F2-V	F2-C	F2-V	F2-C
353,65	6,3	5,9	494,80	463,38	14,74	13,80
424,65	6,3	5,9	494,80	463,38	14,74	13,80
450,8	6,3	5,9	494,80	463,38	14,74	13,80
472,2	6,3	5,9	494,80	463,38	14,74	13,80
498,5	6,3	5,9	494,80	463,38	14,74	13,80

Tabla AI.3. Alturas y volúmenes acumulados para el experimento FL.

t(h)	h,(cm)		Vg(cm ³)		VNg(LN/kg)	
	FL-V	FL-C	FL-V	FL-C	FL-V	FL-C
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16,45	0,60	0,30	47,12	23,56	0,34	0,17
88,85	1,30	0,90	102,10	70,69	0,73	0,51
117,00	2,70	2,80	212,06	219,91	1,52	1,57
142,20	3,90	3,80	306,31	298,45	2,19	2,13
162,55	5,10	4,60	400,55	361,28	2,86	2,58
185,80	6,40	5,80	502,65	455,53	3,59	3,26
255,20	8,90	9,20	699,00	722,57	4,99	5,16
280,20	9,50	10,30	746,13	808,96	5,33	5,78
302,50	9,90	11,40	777,54	895,35	5,56	6,40
326,50	10,30	12,10	808,96	950,33	5,78	6,79
350,80	10,60	12,80	832,52	1005,31	5,95	7,19

AI.2 Producción de Biogás: Residuo: FORSU con podas de campo de golf.

En este apartado se proporcionarán los datos sobre la producción de biogás de los seis experimentos realizados con FORSU y restos de poda de campo de golf con y sin inóculo. El FORSU empleado tiene la misma proporción de crudo/cafetería que el nombrado en el experimento FL.

Tabla AI.4. Alturas y volúmenes acumulados para el experimento FG1.

t(h)	h,(cm)		Vg(cm ³)		VNg(LN/kg)	
	FG1-V	FG1-C	FG1-V	FG1-C	FG1-V	FG1-C
0	0	0	0	0	0	0
25,35	3,3	3	259,18	235,62	6,62	6,02
91,6	3,3	3	259,18	235,62	6,62	6,02
116,1	3,3	3	259,18	235,62	6,62	6,02
138,5	3,3	3	259,18	235,62	6,62	6,02
161,95	3,3	3	259,18	235,62	6,62	6,02
185,35	3,3	3	259,18	235,62	6,62	6,02

t(h)	h,(cm)		Vg(cm ³)		VNg(LN/Kg)	
	FG1-V	FG1-C	FG1-V	FG1-C	FG1-V	FG1-C
261,6	3,3	3	259,18	235,62	6,62	6,02
285,75	3,3	3	259,18	235,62	6,62	6,02

Tabla AI.5. Alturas y volúmenes acumulados para el experimento FG2.

t(h)	h,(cm)		Vg(cm ³)		VNg(LN/kg)	
	FG2-V	FG2-C	FG2-V	FG2-C	FG2-V	FG2-C
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17,25	2,20	2,20	172,79	172,79	4,41	4,41
43,50	3,20	4,80	251,33	376,99	6,42	9,63
65,05	3,30	5,60	259,18	439,82	6,62	11,23
136,35	4,30	19,60	337,72	1539,38	8,62	39,31
184,60	8,60	19,60	675,44	1539,38	17,25	39,31
208,00	10,50	19,60	824,67	1539,38	21,06	39,31
231,50	11,90	19,60	934,62	1539,38	23,87	39,31
301,55	14,10	19,60	1107,41	1539,38	28,28	39,31
324,75	14,30	19,60	1123,12	1539,38	28,68	39,31
349,75	14,60	19,60	1146,68	1539,38	29,28	39,31
374,00	14,60	19,60	1146,68	1539,38	29,28	39,31
397,20	14,60	19,60	1146,68	1539,38	29,28	39,31
420,35	15,10	19,60	1185,95	1539,38	30,28	39,31
444,35	15,20	19,60	1193,81	1539,38	30,48	39,31
468,65	15,20	19,60	1193,81	1539,38	30,48	39,31
492,00	15,20	19,60	1193,81	1539,38	30,48	39,31
516,30	15,20	19,60	1193,81	1539,38	30,48	39,31

Tabla AI.6. Alturas y volúmenes acumulados para el experimento FG3.

t(h)	h,(cm)		Vg(cm ³)		VNg(LN/kg)	
	FG3-V	FG3-C	FG3-V	FG3-C	FG3-V	FG3-C
0	0	0	0	0	0	0
21,4	6	3,80	471,24	298,45	12,03	7,62
90,9	21	15,80	1055,58	1240,93	26,95	31,69
115,3	21	15,80	1055,58	1240,93	26,95	31,69
187,3	21,1	16,70	1060,60	1311,61	27,07	33,49
258,8	21,2	16,70	1065,63	1311,61	27,20	33,49
284,1	21,3	16,90	1070,65	1327,32	27,33	33,89
306,6	21,4	16,90	1075,68	1327,32	27,46	33,89
329,9	21,5	16,90	1080,71	1327,32	27,59	33,89

t(h)	h,(cm)		Vg(cm ³)		VNg(LN/kg)	
	FG3-V	FG3-C	FG3-V	FG3-C	FG3-V	FG3-C
355,15	21,6	16,90	1085,73	1327,32	27,72	33,89
426,65	21,6	16,90	1696,46	1327,32	43,31	33,89
450,65	27,7	17,00	2175,55	1335,18	55,54	34,09
474,65	27,9	17,00	2191,26	1335,18	55,94	34,09
497,95	27,9	17,00	2191,26	1335,18	55,94	34,09
520,95	27,9	17,00	2191,26	1335,18	55,94	34,09
595,95	27,9	17,00	2191,26	1335,18	55,94	34,09
620,95	27,9	17,00	2191,26	1335,18	55,94	34,09
643,25	27,9	17,00	2191,26	1335,18	55,94	34,09
667,25	27,9	17,00	2191,26	1335,18	55,94	34,09

Tabla AI.7. Alturas y volúmenes acumulados para el experimento FGL1.

t(h)	h,(cm)		Vg(cm ³)		VNg(LN/kg)	
	FGL1-V	FGL1-C	FGL1-V	FGL1-C	FGL1-V	FGL1-C
0	0	0	0	0	0	0
15,2	0,2	0,2	15,71	15,71	0,28	0,28
89,2	0,2	0,2	15,71	15,71	0,28	0,28
110,55	0,2	0,2	15,71	15,71	0,28	0,28
137,8	0,2	0,2	15,71	15,71	0,28	0,28
159,35	0,2	0,2	15,71	15,71	0,28	0,28
230,65	0,2	0,4	15,71	31,42	0,28	0,56
278,9	0,2	0,4	15,71	31,42	0,28	0,56
302,35	0,3	0,5	23,56	39,27	0,42	0,70
325,85	0,4	0,6	31,42	47,12	0,56	0,84
395,9	0,6	0,7	47,12	54,98	0,84	0,98
419,1	0,8	0,8	62,83	62,83	1,12	1,12
444,1	0,8	0,9	62,83	70,69	1,12	1,25
468,35	0,9	1	70,69	78,54	1,25	1,39
491,55	1	1,1	78,54	86,39	1,39	1,53
514,7	1,4	1,4	109,96	109,96	1,95	1,95
538,7	1,7	1,6	133,52	125,66	2,37	2,23
563	2,2	2,1	172,79	164,93	3,07	2,93
586,35	2,6	2,5	204,20	196,35	3,62	3,48
610,65	3,2	3	251,33	235,62	4,46	4,18
706,25	4,9	4,9	384,85	384,85	6,83	6,83
732,25	5,2	5,4	408,41	424,12	7,25	7,53
758,75	5,5	5,6	431,97	439,82	7,67	7,81
779,05	5,8	5,8	455,53	455,53	8,08	8,08
849,3	6,1	6,1	479,09	479,09	8,50	8,50

t(h)	h,(cm)		Vg(cm ³)		VNg(LN/kg)	
	FGL1-V	FGL1-C	FGL1-V	FGL1-C	FGL1-V	FGL1-C
872,85	6,2	6,3	486,95	494,80	8,64	8,78
945,05	6,5	6,9	510,51	541,92	9,06	9,62
1016,35	6,8	7,3	534,07	573,34	9,48	10,18
1042,4	6,9	7,5	541,92	589,05	9,62	10,45
1063,8	6,9	7,5	541,92	589,05	9,62	10,45
1087,1	7,2	7,7	565,49	604,76	10,04	10,73
1112,35	7,2	7,8	565,49	612,61	10,04	10,87
1184,35	7,4	8,1	581,19	636,17	10,31	11,29
1208,35	7,5	8,2	589,05	644,03	10,45	11,43
1232,35	7,5	8,2	589,05	644,03	10,45	11,43
1255,65	7,5	8,2	589,05	644,03	10,45	11,43
1278,65	7,5	8,2	589,05	644,03	10,45	11,43
1353,65	7,6	8,4	596,90	659,73	10,59	11,71
1378,65	7,6	8,4	596,90	659,73	10,59	11,71
1401,15	7,6	8,4	596,90	659,73	10,59	11,71
1425,15	7,8	8,5	612,61	667,59	10,87	11,85
1449,15	7,8	8,5	612,61	667,59	10,87	11,85
1521,6	7,9	8,8	620,46	691,15	11,01	12,27
1544,1	8	8,9	628,32	699,00	11,15	12,41
1567,35	8,1	9	636,17	706,86	11,29	12,54
1591,35	8,1	9	636,17	706,86	11,29	12,54
1615,55	8,2	9,2	644,03	722,57	11,43	12,82
1687,05	8,3	9,2	651,88	722,57	11,57	12,82
1711,2	8,3	9,3	651,88	730,42	11,57	12,96
1735,2	8,4	9,3	659,73	730,42	11,71	12,96
1758,55	8,4	9,5	659,73	746,13	11,71	13,24
1782,9	8,4	9,5	659,73	746,13	11,71	13,24
1856,05	8,7	9,7	683,30	761,84	12,13	13,52
1884,2	8,8	9,8	691,15	769,69	12,27	13,66
1909,4	9	10	706,86	785,40	12,54	13,94
1929,7	9	10	706,86	785,40	12,54	13,94
1953	9,2	10,3	722,57	808,96	12,82	14,36
2022,4	9,2	10,3	722,57	808,96	12,82	14,36
2047,4	9,4	10,3	738,27	808,96	13,10	14,36
2069,7	9,5	10,5	746,13	824,67	13,24	14,64
2093,7	9,5	10,5	746,13	824,67	13,24	14,64
2118	9,7	10,5	761,84	824,67	13,52	14,64

Tabla AI.8. Alturas y volúmenes acumulados para el experimento FGL2.

t(h)	h,(cm)		Vg(cm ³)		VNg(LN/kg)	
	FGL2-V	FGL2-C	FGL2-V	FGL2-C	FGL2-V	FGL2-C
0	0	0	0	0	0	0
15,2	3,3	4,3	259,18	337,72	4,58	5,96
89,2	4,9	4,3	384,85	337,72	6,81	5,96
110,55	5,2	4,4	408,41	345,58	7,22	6,10
137,8	5,3	4,7	416,26	369,14	7,36	6,52
159,35	6,1	5,5	479,09	431,97	8,47	7,63
230,65	7,6	7	596,90	549,78	10,56	9,71
278,9	8,2	7,6	644,03	596,90	11,39	10,54
302,35	9,6	8,5	753,98	667,59	13,33	11,79
325,85	11	9,2	863,94	722,57	15,28	12,76
395,9	13,6	11,6	1068,14	911,06	18,89	16,09
419,1	14,9	12,4	1170,24	973,89	20,69	17,19
444,1	16,3	13,2	1280,20	1036,73	22,64	18,30
468,35	17,3	14,2	1358,74	1115,27	24,03	19,69
491,55	18	15,1	1413,72	1185,95	25,00	20,94
514,7	19,5	17,8	1531,53	1398,01	27,08	24,68
538,7	20,2	19	1586,50	1492,26	28,05	26,35
563	21,2	20	1665,04	1570,80	29,44	27,73
586,35	22,2	21,1	1743,58	1657,19	30,83	29,26
610,65	23,5	22	1845,69	1727,88	32,64	30,51
706,25	28	24,1	2199,11	1892,81	38,89	33,42
732,25	28,8	24,6	2261,95	1932,08	40,00	34,11
758,75	29,6	24,9	2324,78	1955,64	41,11	34,53
779,05	30,2	25,3	2371,90	1987,06	41,94	35,08
849,3	31,2	26	2450,44	2042,04	43,33	36,05
872,85	31,6	26,2	2481,86	2057,74	43,89	36,33
945,05	32,2	26,7	2528,98	2097,01	44,72	37,02
1016,35	32,8	27,3	2576,11	2144,14	45,55	37,86
1042,4	32,9	27,4	2583,96	2151,99	45,69	37,99
1063,8	33	27,5	2591,81	2159,84	45,83	38,13
1087,1	33,1	27,8	2599,67	2183,41	45,97	38,55
1112,35	33,3	28	2615,38	2199,11	46,25	38,83
1184,35	33,5	28,3	2631,08	2222,68	46,53	39,24
1208,35	33,6	28,4	2638,94	2230,53	46,67	39,38
1232,35	33,7	28,5	2646,79	2238,38	46,80	39,52
1255,85	34,1	28,5	2678,21	2238,38	47,36	39,52
1278,85	34,2	28,5	2686,06	2238,38	47,50	39,52
1353,85	34,5	28,8	2709,62	2261,95	47,92	39,94
1378,85	34,8	28,9	2733,19	2269,80	48,33	40,07
1401,15	34,9	29	2741,04	2277,65	48,47	40,21

t(h)	h,(cm)		Vg(cm ³)		VNg(LN/kg)	
	FGL2-V	FGL2-C	FGL2-V	FGL2-C	FGL2-V	FGL2-C
1449,15	35,4	29,2	2780,31	2293,36	49,17	40,49
1521,6	36	29,5	2827,43	2316,92	50,00	40,91
1544,1	36,2	29,8	2843,14	2340,49	50,28	41,32
1567,35	36,3	29,8	2851,00	2340,49	50,42	41,32
1591,35	36,6	29,8	2874,56	2340,49	50,83	41,32
1615,55	36,9	30	2898,12	2356,19	51,25	41,60
1687,05	37,3	30,4	2929,54	2387,61	51,80	42,15
1711,2	37,4	30,6	2937,39	2403,32	51,94	42,43
1735,2	37,9	30,9	2976,66	2426,88	52,64	42,85
1758,55	37,9	31	2976,66	2434,73	52,64	42,99
1782,9	38	31	2984,51	2434,73	52,78	42,99
1856,05	38,6	31,9	3031,64	2505,42	53,61	44,23
1884,2	38,8	32,2	3047,34	2528,98	53,89	44,65
1909,4	38,9	32,4	3055,20	2544,69	54,03	44,93
1929,7	38,9	32,4	3055,20	2544,69	54,03	44,93
1953	38,9	32,6	3055,20	2560,40	54,03	45,20
2022,4	38,9	32,9	3055,20	2583,96	54,03	45,62
2047,4	39,1	33	3070,91	2591,81	54,30	45,76
2069,7	39,1	33,1	3070,91	2599,67	54,30	45,90
2093,7	39,1	33,2	3070,91	2607,52	54,30	46,04
2118,03	39,2	33,4	3078,76	2623,23	54,44	46,31

Tabla AI.9. Alturas y volúmenes acumulados para el experimento FGL3.

t(h)	h,(cm)		Vg(cm ³)		VNg(LN/kg)	
	FGL3-V	FGL3-C	FGL3-V	FGL3-C	FGL3-V	FGL3-C
0	0	0	0	0	0	0
21,4	0,6	0,7	47,12	54,98	0,83	0,97
90,9	5,4	4,5	424,12	353,43	7,49	6,25
115,3	5,4	4,5	424,12	353,43	7,49	6,25
187,3	5,7	4,8	447,68	376,99	7,90	6,67
258,8	6,1	4,9	479,09	384,85	8,46	6,81
284,1	6,3	5	494,80	392,70	8,74	6,94
306,6	6,5	5,2	510,51	408,41	9,01	7,22
329,9	6,8	5,6	534,07	439,82	9,43	7,78
355,15	7,5	6	589,05	471,24	10,40	8,33
426,65	9,6	8	753,98	628,32	13,31	11,11
450,65	10,3	8,5	808,96	667,59	14,28	11,81
474,65	11	9,2	863,94	722,57	15,25	12,78
497,95	11,8	9,9	926,77	777,54	16,36	13,75

t(h)	h,(cm)		Vg(cm ³)		VNg(LN/kg)	
	FGL3-V	FGL3-C	FGL3-V	FGL3-C	FGL3-V	FGL3-C
520,95	12,9	10,4	1013,16	816,81	17,89	14,44
595,95	16,5	11,2	1295,91	879,65	22,88	15,56
620,95	16,6	11,8	1303,76	926,77	23,02	16,39
643,25	17,1	12,3	1343,03	966,04	23,71	17,08
667,25	18,2	13	1429,42	1021,02	25,24	18,06
691,25	18,5	13,8	1452,99	1083,85	25,65	19,17
763,7	20,2	14,4	1586,50	1130,97	28,01	20,00
786,05	21	15,1	1649,34	1185,95	29,12	20,97
809,3	21,6	15,5	1696,46	1217,37	29,95	21,53
833,3	22,4	16,1	1759,29	1264,49	31,06	22,36
857,6	23,4	16,7	1837,83	1311,61	32,45	23,19
929,05	26,1	18,8	2049,89	1476,55	36,19	26,11
953,2	26,8	19,5	2104,87	1531,53	37,16	27,08
977,2	27,5	20,2	2159,84	1586,50	38,13	28,05
1000,55	28,3	21	2222,68	1649,34	39,24	29,17
1023,8	28,9	21,8	2269,80	1712,17	40,07	30,28
1096,95	31,7	25,2	2489,71	1979,20	43,96	35,00
1123,1	32,4	26,9	2544,69	2112,72	44,93	37,36
1148,3	32,6	27,9	2560,40	2191,26	45,20	38,75
1168,65	33	28,9	2591,81	2269,80	45,76	40,14
1191,9	33,1	29,3	2599,67	2301,22	45,90	40,69
1261,3	33,7	31,1	2646,79	2442,59	46,73	43,19
1286,3	34,1	31,5	2678,21	2474,00	47,28	43,75
1308,6	34,2	32	2686,06	2513,27	47,42	44,44
1332,6	34,6	32,4	2717,48	2544,69	47,98	45,00
1356,9	35	32,8	2748,89	2576,11	48,53	45,55

ANEXO II.

Composición de biogás.

En este Anexo se presenta la variación con el tiempo de la composición del gas obtenido para los diferentes biodigestores comentados anteriormente. Se encuentran en las Tablas AII.1 a AII.9.

AII.1 Composición de biogás: Residuo: FORSU

En este apartado se presentan los datos de composición obtenidos de los experimentos cuya única materia prima empleada era el FORSU con o sin inóculo, experimentos F1 a FL.

Tabla AII.1. Composición del biogás para el experimento F1.

t(h)	Composición
	%CO ₂
0,00	0
24 – 161	100

Tabla AII.2. Composición del biogás para el experimento F2.

t(h)	Composición
	%CO ₂
0,00	0
25,35–498,50	100

Tabla AII.3. Composición del biogás para el experimento FL.

t(h)	Composición	
	%CO ₂	%CH ₄
0,00	47,09	52,91
16,45	49,20	50,80
88,85	52,25	47,75
117,00	57,19	42,81
142,20	64,82	35,18
162,55	66,80	33,20
185,80	70,26	29,74

AII.2 Composición de biogás: Residuo: FORSU con podas de campo de golf.

En las próximas tablas se presentarán los datos obtenidos sobre la variación de la composición de gas con el tiempo de los experimentos FG1 a FGL3.

Tabla AII.4. Composición del biogás para el experimento FG1.

t(h)	Composición
	%CO ₂
0,00	100
25,35 - 285,75	100

Tabla AII.5. Composición del biogás para el experimento FG2.

t(h)	Composición
	%CO ₂
0,00	100
17,25516,30	100

Tabla AII.6. Composición del biogás para el experimento FG3.

t(h)	Composición
	%CO ₂
0,00	100
21,4 - 667,25	100

Tabla AII.7. Composición del biogás para el experimento FGL1.

t(h)	Composición	
	%CH ₄	%CO ₂
0,00	0	0
89,20	34,80	65,20
137,80	50,04	49,96
159,35	47,75	52,25
230,65	49,07	50,93
278,90	50,96	49,04
302,35	50,76	49,24
325,85	44,14	55,86
395,90	33,98	66,02
419,10	41,28	58,72
444,10	37,39	62,61
468,35	42,15	57,85
491,55	43,47	56,53
514,70	53,09	46,91
538,70	56,09	43,91
563,00	59,51	40,49
586,35	64,10	35,90
610,65	66,66	33,34
706,25	71,35	28,65
732,25	70,17	29,83
758,75	70,19	29,81
779,05	69,24	30,76
849,30	69,03	30,97
872,85	62,90	37,10
945,05	58,54	41,46
1016,35	68,75	31,25

t(h)	Composición	
	%CH ₄	%CO ₂
1042,40	69,34	30,66
1063,80	69,21	30,79
1087,10	68,99	31,01
1112,35	69,08	30,92
1184,35	70,47	29,53
1208,35	76,06	23,94
1232,35	87,42	12,58
1255,65	79,27	20,73
1278,65	80,14	19,86
1378,65	79,30	20,70
1401,15	78,41	21,59
1425,15	74,07	25,93
1449,15	76,73	23,27
1521,60	74,85	25,15
1544,10	73,73	26,27
1591,35	74,60	25,40
1615,55	73,82	26,18
1687,05	74,34	25,66
1711,20	73,23	26,77
1758,55	73,77	26,23
1782,90	74,37	25,63
1856,05	73,70	26,30
1884,20	72,73	27,27
1909,40	73,05	26,95
1929,70	73,00	27,00
1953,00	70,66	29,34
2022,40	72,94	27,06

Tabla AII.8. Composición del biogás para el experimento FGL2.

t(h)	Composición	
	%CH ₄	%CO ₂
0,00	0,00	0,00
15,20	5,80	94,20
89,20	11,05	88,95
137,80	25,64	74,36
159,35	32,71	67,29
230,65	48,86	51,14
278,90	57,21	42,79
302,35	59,24	40,76
325,85	60,45	39,55

t(h)	Composición	
	%CH ₄	%CO ₂
395,90	61,73	38,27
419,10	61,65	38,35
444,10	62,38	37,62
468,35	49,03	50,97
491,55	63,19	36,81
514,70	65,64	34,36
538,70	64,87	35,13
563,00	64,90	35,10
586,35	65,75	34,25
610,65	65,49	34,51
706,25	64,43	35,57
732,25	64,42	35,58
758,75	64,17	35,83
779,05	63,07	36,93
849,30	63,70	36,30
872,85	58,78	41,22
945,05	64,13	35,87
1016,35	63,90	36,10
1042,40	65,23	34,77
1063,80	63,68	36,32
1087,10	64,32	35,68
1112,35	64,90	35,10
1184,35	66,46	33,54
1208,35	67,44	32,56
1232,35	66,79	33,21
1255,85	66,53	33,47
1278,85	67,26	32,74
1378,85	66,82	33,18
1401,15	66,56	33,44
1425,15	65,76	34,24
1449,15	66,11	33,89
1521,60	66,61	33,39
1544,10	66,04	33,96
1591,35	66,74	33,26
1615,55	67,31	32,69
1687,05	68,18	31,82
1711,20	67,60	32,40
1758,55	68,12	31,88
1782,90	68,95	31,05
1856,05	69,74	30,26

t(h)	Composición	
	%CH ₄	%CO ₂
1909,40	69,85	30,15
1929,70	70,75	29,25
1953,00	65,03	34,97
2022,40	71,52	28,48

Tabla AII.9. Composición del biogás para el experimento FGL2.

t(h)	Composición	
	%CH ₄	%CO ₂
0,00	0,00	0,00
21,40	3,20	96,80
90,90	0,90	99,10
187,30	18,94	81,06
258,80	25,02	74,98
284,10	26,29	73,71
306,60	28,23	71,77
329,90	30,79	69,21
355,15	34,21	65,79
426,65	46,70	53,30
450,65	49,77	50,23
474,65	66,79	33,21
497,95	56,02	43,98
520,95	57,84	42,16
620,95	59,89	40,11
643,25	60,03	39,97
667,25	59,49	40,51
691,25	59,42	40,58
763,70	59,38	40,62
786,05	58,43	41,57
833,30	61,69	38,31
857,60	62,63	37,37
929,05	63,37	36,63
953,20	64,07	35,93
1000,55	63,85	36,15
1023,80	63,75	36,25
1096,95	73,70	26,30
1123,10	72,73	27,27
1148,30	73,05	26,95
1168,65	73,00	27,00
1261,30	72,94	27,06