

The logo of the University of La Laguna (ULL) consists of the letters 'ULL' in a stylized, purple, sans-serif font. The 'U' is larger and more rounded than the 'L's. Below the letters is a thin horizontal line.

Universidad  
de La Laguna

---

**“OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE  
RESIDUOS AGRÍCOLAS Y DE PRODUCCIÓN DE  
BIODIÉSEL”**

---

**Trabajo Fin de Grado**

**Titulación: Grado en Ingeniería Química Industrial**

**Rafael Navarro Soto**

**Tutores:**

**Candela Díaz García**

**Douglas J.Escalante Ayala**

**JULIO 2016**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quiero agradecer a mis tutores Candela Díaz García y Douglas J. Escalante Ayala por haber dedicado su tiempo a ayudarme, tanto en la realización experimental como en la redacción de este trabajo. Así como a Andrea Brito Alayón por su disponibilidad y entrega siempre que necesité de su ayuda o consejos.

También quiero agradecer a todos mis compañeros de laboratorio por haber hecho de esas intensas horas unos momentos agradables y amenos.

Por otro lado, agradecer a mis dos mejores amigas Suleima Padrino Hernández e Isfemar Berroterán Buyón por su apoyo en todo momento no sólo durante el proyecto sino durante estos cuatro años.

Finalmente agradecer a mi familia por el apoyo incondicional y por todo el esfuerzo que ha hecho para que hoy pudiera llegar a donde estoy. En especial quiero agradecer a mi madre, sin la cual no podría haber llegado hasta aquí ni haberme convertido en lo que soy a día de hoy. Agradecer también a mi padre y a mis hermanos que han estado siempre apoyándome en todos los aspectos.

# ÍNDICE

1-RESUMEN .....	1
2-INTRODUCCIÓN .....	4
2.1-Combustibles convencionales.....	6
2.1.1-Petróleo.....	6
2.1.2-Gas natural.....	7
2.1.3 -Carbón.....	7
2.1.4-Gas licuado del petróleo (GLP) .....	8
2.2-Biocombustibles .....	8
2.2.1-Biodiésel.....	9
2.2.2-Bioetanol .....	9
2.2.3-Biogás .....	10
2.2.3.1-Digestión de residuos orgánicos. ....	13
2.2.3.2-VARIABLES DE OPERACIÓN.....	18
2.2.3.3-Post-tratamiento del biogás.....	28
2.2.3.4-Aplicaciones de los residuos fermentados .....	32
2.2.3.5-Aplicaciones del biogás .....	34
2.3-Posibles alternativas en Canarias .....	37
3-OBJETIVOS .....	39
4-MATERIALES Y MÉTODOS .....	42
4.1.-Set de biodigestores.....	43

4.1.1.-Materias primas.....	43
4.1.2-Material de laboratorio.....	44
4.1.3-Instalación experimental.....	45
4.1.4-Preparación de los biodigestores .....	46
4.1.5-Reactivación de los biodigestores .....	48
4.1.6-Medida del volumen de biogás.....	49
4.1.7-Análisis de la composición del biogás producido .....	50
4.1.8- Estudio de los sólidos totales, fijos y volátiles .....	51
4.2- Biodigestor con control continuo de pH.....	53
4.2.1- Materias primas.....	55
4.2.2- Material de laboratorio.....	55
4.2.3- Preparación del biodigestor.....	56
4.2.4- Agitación.....	58
4.2.5- Control de volumen .....	59
4.2.6- Control de pH .....	61
4.2.7- Control de temperatura .....	61
4.2.8- Análisis del biogás producido .....	63
4.2.9- Estudio de los sólidos totales, fijos y volátiles .....	63
5- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	64
5.1- Estudio de la influencia de las diferentes mezclas de residuos sobre la producción de biogás .....	65
5.1.1- Mezcla de plátano y tomate (P-T) .....	66

5.1.2- Mezcla de plátano, tomate y glicerina (P-T-G) .....	71
5.1.3- Mezcla de plátano y jatropha (P-J).....	75
5.2- Estudio de la influencia de las diferentes mezclas de residuos sobre la calidad del biogás.....	83
5.3-Determinación del contenido en sólidos de las mezclas de residuos empleadas.....	84
5.4-Comparación de las producciones de biogás a partir de las mezclas de residuos con y sin glicerina .....	85
5.5-Estudio de la influencia del control continuo de pH sobre la producción de biogás.....	87
6-CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS .....	93
7-BIBLIOGRAFÍA .....	100
ANEXOS .....	105
ANEXO I:.....	106
ANEXO II.....	110
ANEXO III.....	112
ANEXO IV .....	146

## 1-RESUMEN

---

### Resumen

Este trabajo de investigación se ubica dentro del marco de las energías renovables y concretamente, se centra en los estudios para la obtención de biogás a partir de la fermentación anaeróbica de residuos agrícolas y procedentes del proceso de obtención de biodiésel.

En el contexto del creciente interés por las energías renovables, la producción de biocombustibles a partir de residuos agrícolas se propone como una de las posibles opciones para sustituir los recursos energéticos derivados del petróleo, siendo el biogás uno de los llamados biocombustibles de tercera generación, ya que procede de la biomasa no apta para el consumo humano o de desechos.

El biogás es una mezcla principalmente de metano y dióxido de carbono, siendo el metano el gas presente en mayor proporción. La población bacteriana transforma los residuos en biogás través de una serie de reacciones químicas pertenecientes a los procesos de: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

En este trabajo se han realizado estudios de producción y composición del biogás, mediante procesos de digestión anaerobia a partir de distintas mezclas de residuos de plátanos, tomates, y procedentes de la obtención de biodiésel. Para ello se utilizó un set compuesto por ocho biodigestores.

Una de las variables más importantes en el proceso de fermentación anaeróbica es el pH, ya que valores fuera del rango óptimo establecido causan la inhibición de la población microbiana responsable de la formación del biogás. Por ello, en segundo lugar, se estudió la influencia del control continuo del pH sobre la obtención del biogás empleando como biodigestor un reactor mezcla perfecta.

### Abstract

This research is within the framework of renewable energy and specifically focuses on studies for obtaining biogas from the anaerobic fermentation of agricultural and from the process of obtaining biodiesel waste.

In the context of the growing interest in renewable energy, the production of biofuels from agricultural waste is proposed as one of the possible options to

replace those derived energy resources of oil, being biogas one of the so-called third generation biofuels as it which comes from the unfit for human consumption or waste biomass.

Biogas is mainly a mixture of methane and carbon dioxide, with methane gas present in greater proportion. The bacterial population transformes waste into biogas through a series of chemical reactions located within four processes or main stages: hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis and methanogenesis.

In this work we have studied the production and composition of biogas through anaerobic digestion processes from different mixtures der waste bananas, tomatoes, and from obtaining biodiesel. This requires a set consisting of eight digesters was used.

One of the most important variables in the anaerobic fermentation process is the pH, because values outside the optimal range established cause inhibition of microbial population responsible for the formation of biogas. Therefore, secondly, the influence of continuous pH control over obtaining biogas digester using as one perfect mixing reactor was studied.



## **2-INTRODUCCIÓN**

---

En la actualidad existe una preocupación por el medioambiente como consecuencia de las investigaciones realizadas sobre la influencia del CO<sub>2</sub> sobre la capa de ozono y su potencial dañino sobre el planeta. Las mayores contribuciones de este gas a la atmósfera provienen de los procesos de obtención y utilización de combustibles fósiles. El petróleo necesita pasar por una serie de procesos químicos para ser transformado en diferentes productos comercializables, y es en esos procesos dónde se generan cantidades perjudiciales de CO<sub>2</sub>. Por este motivo, entre otros, va creciendo el interés por las alternativas a los combustibles fósiles, y continúa la búsqueda de procesos que no contaminen con tanta rapidez y en tanta cantidad.

Para gestionar eficazmente el CO<sub>2</sub> dentro de los límites tolerables dentro de la atmósfera, expertos en el cambio climático recomiendan el urgente desarrollo de nuevas tecnologías. La transformación química del CO<sub>2</sub> por ejemplo, en dimetiléter, es una forma atractiva del reciclaje del CO<sub>2</sub>. El DME se considera un posible combustible, en particular debido a su alto índice de cetano, que puede producirse a partir de la hidrogenación catalítica del CO<sub>2</sub> en una o varias etapas. Las investigaciones actuales en esta materia están encaminadas hacia el desarrollo de catalizadores eficaces y estables para los procesos de síntesis del DME.

Nacen de ahí los biocombustibles, denominados así porque se obtienen a partir de biomasa. Esto no implica que no exista contaminación, pero sí en menor proporción, de forma que permite que la vegetación del planeta pueda hacerse cargo de su transformación de forma natural, impidiendo así el aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> existente.

Las principales ventajas que presenta la utilización de biocombustibles son:

- Proporcionan energía reciclable.
- Las emisiones de gases de efecto invernadero son reducidas.
- En el caso de obtención de combustibles a partir de cultivos vegetales, se provoca una valorización del terreno.

A pesar de las ventajas evidentes del uso de biocombustibles, las investigaciones deben seguir avanzando para poder conseguir un combustible a partir de biomasa, que alcance las características mecánicas y energéticas que proporcionan los combustibles fósiles.

## **2.1-Combustibles convencionales**

Los combustibles fósiles han sido siempre la principal fuente de obtención de energía para su uso en diferentes áreas. Sin embargo, son fuentes limitadas, ya que el aumento de la población mundial y la cultura de consumo en la que se ve envuelta la sociedad están provocando su agotamiento.

Los principales combustibles de origen fósil son:

- Petróleo
- Gas natural
- Carbón
- Gases licuados del petróleo

### **2.1.1-Petróleo**

El petróleo es el combustible fósil más utilizado a nivel mundial, debido a su fácil obtención, transporte y transformación en energía útil. Su origen es fósil, fruto de la transformación de materia orgánica procedente de zooplancton y algas que, depositados en grandes cantidades en fondos de aguas anóxicas de mares o zonas lacustres del pasado geológico, fueron posteriormente enterrados bajo pesadas capas de sedimentos. Se originaron a partir de restos de plantas y microorganismos enterrados durante millones de años y sujetos a distintos procesos físicos y químicos.

La transformación química, denominada craqueo natural, debida al calor y a la presión durante la diagénesis produce, en sucesivas etapas, diferentes productos que van desde betún a hidrocarburos cada vez más ligeros (líquidos y gaseosos). Estos productos ascienden hacia la superficie, por su menor densidad, gracias a la porosidad de las rocas sedimentarias. Cuando las

circunstancias geológicas impiden dicho ascenso se forman entonces los yacimientos petrolíferos.

El factor económico es el principal elemento que condiciona la situación de los combustibles ya que las grandes reservas de petróleo se encuentran en países con una gran inestabilidad política, lo que ha provocado que el precio del barril de petróleo oscile con frecuencia, teniendo una repercusión inmediata en el resto de países.

### **2.1.2-Gas natural**

Según British Petroleum, las reservas petrolíferas probadas a finales de 2013 se sitúan en 185,7 billones de metros cúbicos, siendo suficientes para mantener la producción actual mundial durante un máximo de 35 años. Oriente Medio es la zona geográfica con mayores reservas, con un 43 % del total mundial, destacando Irán y Qatar, seguida de Asia Central con un 31 %, principalmente Rusia y Turkmenistán. También se puede encontrar gas natural en las cuencas patagónicas de Chile y Argentina, donde se extrae para consumo de estas regiones.

Aunque su composición varía en función del yacimiento, su principal especie química es el gas metano. Contiene además otros gases como etano, propano, butano, nitrógeno, dióxido de carbono, impurezas, y trazas de hidrocarburos más pesados, mercaptanos, gases nobles, etc.

### **2.1.3 -Carbón**

El carbón es un mineral que se formó a partir de los restos vegetales prehistóricos, principalmente de los helechos arborescentes. Esos restos sepultados por el fango y bajo los efectos del calor, la presión y la falta de oxígeno, tomaron la estructura mineral que hoy presentan.

La importancia del carbón radica en su poder energético como combustible y en el hecho de constituir la materia prima fundamental en la elaboración de infinidad de productos. Las primeras máquinas de vapor, como barcos, trenes y maquinaria industrial se movieron gracias a la energía que suministraba a este material. Posteriormente fue desplazado por el petróleo; sin embargo, hoy en día

el carbón parece recuperar su posición privilegiada, pues se emplea en la elaboración de plástico, colorantes, perfumes y aceites.

#### **2.1.4-Gas licuado del petróleo (GLP)**

El gas licuado del petróleo es una mezcla de gases fácilmente licuables presentes en el gas natural que se extrae en yacimientos o disueltos en el petróleo. En la práctica, se puede decir que los GLP son una mezcla de propano y butano.

Los usos principales del GLP son los siguientes:

- Obtención de olefinas, utilizadas para la producción de numerosos productos, entre ellos, la mayoría de los plásticos.
- Combustible para automóviles.
- Combustible de refinería.
- Combustible doméstico (mediante garrafas o bombonas, depósitos estacionarios o redes de distribución).
- Procesos industriales como calentamiento y secado de productos agrícolas.
- Combustible para generación eléctrica.

### **2.2-Bicombustibles**

A diferencia de los combustibles fósiles que provienen de la energía almacenada durante largos períodos de tiempo en yacimientos fósiles, los biocombustibles provienen de la biomasa, o materia orgánica presente en el planeta a cuya producción contribuyen todos los seres vivos. La biomasa es una fuente de energía renovable a partir de la cual se puede obtener diferentes productos que pueden sustituir total o parcialmente a los derivados del petróleo.

Atendiendo al origen de la biomasa y a cómo se generan los biocombustibles, éstos se pueden clasificar en:

- **Biocombustibles de primera generación:** Son aquellos que se obtienen directamente de cosechas que pueden destinarse a la alimentación humana o del ganado, y por lo tanto su producción es muy polémica.
- **Biocombustibles de segunda generación:** Son aquellos que se obtienen a partir de cosechas no aptas para consumo humano o residuos, por lo que no sirven para alimentación humana y no supone un conflicto social.
- **Biocombustibles de tercera generación:** Son aquellos que se obtienen de algas o micro algas.

Los principales biocombustibles obtenidos a partir de los grupos de biomasa anteriormente explicados son biodiesel, bioetanol y biogás. A continuación, se describen las características de cada uno de ellos.

### **2.2.1-Biodiésel**

El biodiesel es un biocombustible líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, con o sin uso previo, mediante procesos industriales de esterificación y transesterificación, y que se aplica con la intención de sustituir total o parcialmente los productos derivados del petróleo.

El biodiésel puede mezclarse con gasóleo procedente del refinado del petróleo en diferentes cantidades. Se utilizan notaciones abreviadas según el porcentaje por volumen de biodiésel en la mezcla: B100 en caso de utilizar sólo biodiésel, u otras notaciones como B5, B15, B30 o B50, donde la numeración indica el porcentaje por volumen de biodiésel en la mezcla.

### **2.2.2-Bioetanol**

El etanol es un compuesto químico obtenido a partir de la fermentación de los azúcares, que puede utilizarse como combustible puro o bien mezclado en cantidades variadas con gasolina, y cuyo uso se ha extendido principalmente para reemplazar el consumo de derivados del petróleo. El combustible resultante de la mezcla de etanol y gasolina se conoce como gasohol oalconafta. Dos

mezclas comunes son E10 y E85, con contenidos de etanol del 10% y 85%, respectivamente.

El etanol también se utiliza cada vez más como añadido para oxigenar la gasolina normal, reemplazando al éter metil tert-butílico (MTBE). Este último es responsable de una considerable contaminación del suelo y del agua subterránea.

Como fuente para la producción de etanol en el mundo se utiliza fundamentalmente biomasa, de ahí su denominación como “bioetanol”.

### **2.2.3-Biogás**

El biogás, es el producto de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica mediante los microorganismos metanogénicos y está compuesto principalmente de metano (50-70%), dióxido de carbono (20-40%), y otros gases como, monóxido de carbono, ácido sulfhídrico e hidrógeno, entre otros (Ofoefule, 2011). Se denomina biogás agroindustrial, al biogás obtenido a partir de subproductos o residuos orgánicos de origen ganadero, agrícola y de la industria alimentaria (Pascual et al., 2011).

Otros componentes minoritarios son el ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), el amoníaco ( $NH_3$ ), el nitrógeno ( $N_2$ ), el oxígeno ( $O_2$ ), el hidrógeno ( $H_2$ ) y el agua ( $H_2O$ ).

El metano ( $CH_4$ ) proporciona un poder energético más elevado y por tanto es el componente de mayor interés. El análisis del biogás se realiza normalmente mediante cromatografía gaseosa. Para ello se emplea un cromatógrafo de gases cuyo funcionamiento general se describe a continuación: el primer paso es suministrar uno o varios gases de alta pureza al cromatógrafo de gases (gas portador), que fluye hacia el interior del inyector, pasa por la columna y se introduce en el detector. A continuación, se introduce la muestra de biogás en el inyector, la cual se calienta normalmente hasta 150 - 250 °C, lo que conduce a la vaporización de los solutos volátiles de la muestra. Estos solutos vaporizados se introducen posteriormente en la columna mediante el gas portador, la cual se encuentra en el interior del horno dispuesto de un control de temperatura.

Los solutos pasan por la columna a velocidades variables, 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. A medida que se eluye cada soluto, se introduce en el detector caliente, donde se genera una señal electrónica basada en la interacción del soluto con el detector. El tamaño de la señal se registra en un sistema de datos (el software ChemStation de Agilent) y se representa gráficamente según el tiempo transcurrido para generar un cromatograma.

El tamaño de los picos se corresponde con la cantidad de compuesto de la muestra. Si aumenta la concentración del compuesto, se obtiene un pico de mayor tamaño. El tiempo de retención es el tiempo que tarda el compuesto en atravesar la columna. Si las condiciones de la columna y todas las condiciones de funcionamiento son constantes, un compuesto determinado siempre tendrá el mismo tiempo de retención.

El tamaño de los picos y el tiempo de retención se usan para establecer la determinación cuantitativa y cualitativa de un compuesto respectivamente. No obstante, es importante tener en cuenta que la identidad de un compuesto no se puede determinar únicamente por su tiempo de retención. En primer lugar, es necesario analizar una cantidad conocida de una muestra auténtica pura del compuesto para determinar el tiempo de retención y el tamaño de los picos. A continuación, este valor se puede comparar con los resultados de una muestra desconocida para determinar si está presente el compuesto de interés (mediante la comparación de los tiempos de retención) y en qué cantidad (mediante la comparación del tamaño de los picos).

Al igual que el gas natural, el biogás tiene una amplia variedad de usos, pero al ser un derivado de la biomasa, constituye una fuente de energía renovable. Existen diversos beneficios derivados del proceso de conversión de residuos orgánicos en biogás.

La presión económica sobre los productos agrícolas convencionales se encuentra en continuo aumento. Muchos agricultores se ven obligados a



renunciar a su producción, principalmente debido a que sus tierras no presentan rendimientos rentables. Sin embargo, en muchos países la producción de biogás se encuentra subvencionada o presenta incentivos económicos, proporcionando a los agricultores un ingreso adicional. Por lo tanto, en el sector agrícola, la implementación de tecnologías de digestión anaeróbica puede permitir obtener importantes beneficios económicos, ambientales y energéticos.

Por otra parte, permite una gestión mejorada de nutrientes, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y a la captura y uso de biogás. Cuando los residuos orgánicos se someten a una degradación aeróbica, se generan compuestos de bajo poder energético como  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , perdiéndose gran parte de la energía, pues éstos se liberan a la atmósfera. Se estima que la pérdida de energía de un proceso aeróbico es aproximadamente veinte veces superior al de un proceso anaeróbico.

En el caso de la degradación anaeróbica, se generan productos del metabolismo con alto poder energético (e.j. alcoholes, ácidos orgánicos y metano), los cuales pueden servir como nutrientes de otros organismos (alcoholes y ácidos orgánicos), o bien ser utilizados con fines energéticos por la sociedad (biogás). De esta forma se reducen significativamente los costos de la disposición de residuos orgánicos, e incluso se obtienen sub-productos con valor añadido (e.j. bioabono). Por otra parte, la digestión anaeróbica elimina el problema de emisión de olores molestos como, por ejemplo, el olor a amoníaco, producto de la acumulación de excretas y orina sin tratar.

La promoción de sistemas de producción de biogás colectivos -varias granjas-, y de co-digestión -tratamiento conjunto de residuos orgánicos de diferentes orígenes en una zona geográfica, usualmente agropecuarios e industriales- permite, además, la implantación de sistemas de gestión integral de residuos orgánicos por zonas geográficas, con beneficios sociales, económicos y ambientales. La digestión anaerobia se puede llevar a cabo con uno o más residuos con las únicas premisas de que sean líquidos, contengan material fermentable, y tengan una composición y concentración relativamente estable. La co-digestión es una variante tecnológica que puede solucionar problemas o carencias de un residuo, si son compensadas por las características de otro.

### 2.2.3.1-Digestión de residuos orgánicos.

El adecuado manejo de los residuos orgánicos se consigue a través de diferentes tratamientos que implican un reciclaje de estas materias orgánicas, transformándolas en productos con un valor añadido.

La población microbiana juega un importante papel en las transformaciones de estos residuos pues permite establecer bioprocesos en función de la presencia o ausencia de oxígeno, con el objetivo de tratar adecuadamente los diversos residuos orgánicos.

La digestión anaeróbica es un proceso biológico natural en el que los complejos materiales orgánicos son desintegrados a compuestos más simples en ausencia de oxígeno, por la acción de las poblaciones de microorganismos pertenecientes al dominio Archae, que comprende al grupo de los metanógenos (Cioabla *et al.*,2012; Trivedi *et al.*, 2010).

Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico.

En la digestión anaeróbica, los microorganismos metanogénicos desempeñan la función de enzimas respiratorios y, junto con las bacterias no metanogénicas, constituyen una cadena alimentaria que guarda relación con las cadenas enzimáticas de células aeróbicas. De esta forma, los residuos orgánicos se transforman completamente en biogás. Sin embargo, el biogás generado podría estar contaminado con diferentes componentes, que dificultan el manejo y aprovechamiento del mismo por lo que si se deseara realizar un proceso a escala industrial para obtener biogás sería necesario tener en cuenta un tratamiento posterior del mismo.

Los productos finales de la digestión anaeróbica son el conjunto de gases denominado biogás y los restos de materia orgánica degradada que podría ser utilizada como abono para cultivos.

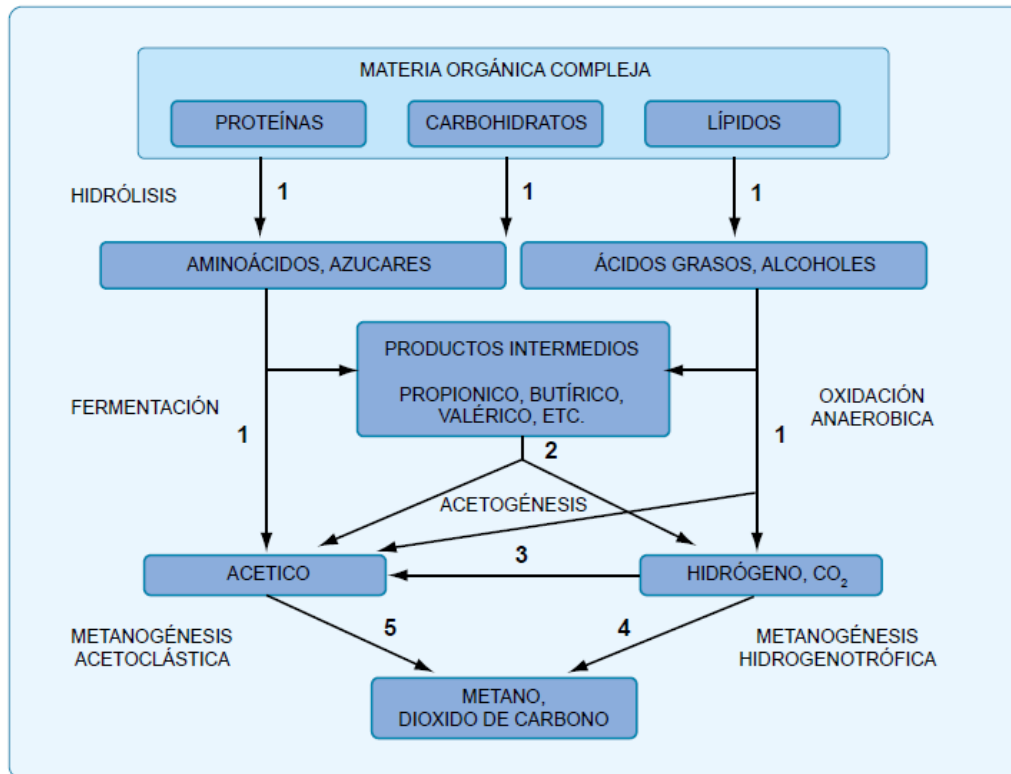
El proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica tiene lugar en cuatro fases o etapas (Cioabla *et al.*, 2012):

1. Hidrólisis
2. Acidogénesis
3. Acetogénesis
4. Metanogénesis

La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos) que son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga) que serán metabolizados por las bacterias acidogénicas dando lugar, principalmente, a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Por último, los microorganismos metanogénicos producen metano a partir de ácido acético, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Un esquema de las etapas del proceso de fermentación anaeróbica se ilustra en la Figura 2.1.

Donde los números indican la población bacteriana responsable del proceso:

- 1: bacterias fermentativas
- 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno
- 3: bacterias homoacetogénicas
- 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas
- 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.



**Figura 2.1. Etapas del proceso de fermentación anaeróbica.**  
Fuente: (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991)

A continuación, se describe de forma más detallada lo que sucede en cada una de las etapas de la digestión:

### Etapa de hidrólisis

La etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del valor de pH, de la concentración de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y de la concentración de los productos de la hidrólisis.

Cualquier sustrato se compone de tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos. Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaeróbica debido a que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis

tienen un elevado valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en posteriores etapas del proceso. La degradación de los lípidos en ambientes anaeróbicos comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol.

La velocidad de degradación de los materiales lignocelulósicos compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis. Esto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaeróbicos afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiasa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos. La tasa de hidrólisis, en general, aumenta con la temperatura y depende del tamaño de las partículas, debido fundamentalmente a la disponibilidad de superficie para la adsorción de las enzimas hidrolíticas. Los pretratamientos físico-químicos, cuyo principal efecto es la reducción del tamaño de las partículas, producen un aumento en la tasa de hidrólisis, y si esta fase es la limitante del proceso anaerobio, supone un beneficio para el proceso general, produciendo menores tiempos de retención y tamaños de reactor menores.

### *Etapa acidogénica*

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H<sub>2</sub>) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema. Este

grupo de microorganismos, se compone de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos.

### Etapa acetogénica

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (hidrógeno y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ) e hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), a través de las bacterias acetogénicas. Representantes de los microorganismos acetogénicos son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*. Un tipo especial de microorganismos acetogénicos, son los llamados homoacetogénicos. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como mezcla hidrógeno/dióxido de carbono) produciendo como único producto acetato. Al contrario que las bacterias acetogénicas, éstas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato. Según se ha estudiado, el resultado neto del metabolismo homoacetogénico permite mantener bajas presiones parciales del hidrógeno y, por tanto, permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas. Los principales microorganismos homoacetogénicos que han sido aislados son *Acetobacterium woodii* o *Clostridium aceticum*.

En esta etapa, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente.

### Etapa metanogénica

En esta etapa, y última del proceso de digestión, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del grupo de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio

de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización.

Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, metanol y algunas metilaminas.

Los organismos metanogénicos tienen características comunes que los diferencian del resto de procariotas y que se pueden clasificar en:

- Hidrogenotróficos, que consumen  $H_2$  / $CO_2$  y fórmico.
- Acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas.

Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético, a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el  $H_2$  como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato. Los dos géneros que tienen especies acetotróficas son *Methanosarcina* y *Methanotrix*. El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y metanol. El más importante es el carbónico, el cual es reducido por el hidrógeno, también producido en la etapa anterior.

#### 2.2.3.2-Variables de operación.

Es importante examinar algunos de los factores importantes que gobiernan el proceso metanogénico. Los microorganismos, especialmente los metanogénicos, son altamente susceptibles a los cambios en las condiciones ambientales. Las variables principales del proceso son las siguientes otros (Bagudo *et al.*, 2011; Nagy y Szabó, 2011; Ofoefule, 2011; Weiss *et al.*, 2009; Varnero, 2011):

- a) Naturaleza y composición bioquímica de materias primas
- b) Relación carbono/nitrógeno de las materias primas
- c) Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles

- d) Temperatura
- e) Rangos de pH y alcalinidad
- f) Nutrientes
- g) Tóxicos e inhibidores del proceso de metanogénesis
- h) Agitación

a) Naturaleza y composición bioquímica de materias primas

Las diversas materias primas que se pueden utilizar en la fermentación metanogénica, pueden ser residuos orgánicos de origen vegetal, animal, agroindustrial, forestal, doméstico u otros (Park et al., 2011; Weiss et al., 2009; Varnero, 2011). Las características bioquímicas que presenten estos residuos deben permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaeróbico. El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores).

Normalmente las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo, en la digestión de ciertos desechos industriales puede presentarse el caso de ser necesaria la adición de los compuestos enumerados o bien un post tratamiento aeróbico.

Las sustancias con alto contenido de lignina no son directamente aprovechables y por lo tanto deben someterse a tratamientos previos (cortado, macerado, compostaje) a fin de liberar las sustancias factibles de ser transformadas. En el caso de estiércoles animales, la degradación de cada uno de ellos dependerá fundamentalmente del tipo de animal y la alimentación que hayan recibido los mismos.

b) Relación carbono/nitrógeno de las materias primas



Prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a fermentación anaeróbica. La calidad y la cantidad del biogás producido dependerán de la composición y la naturaleza del residuo utilizado. Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las bacterias responsables de la metanogénesis, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes.

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1 (Varnero, 2011; Soria *et al.*, 2001).

La descomposición de materiales con alto contenido de carbono, superior a 35:1, ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la falta de nitrógeno, pero el período de producción de biogás es más prolongado. En cambio, con una relación C/N menor de 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso de producción de biogás (Varnero, 2011).

En términos generales, se considera que una relación C/N óptima que debe tener el material fresco que se utilice para iniciar la digestión anaeróbica, es de 30 unidades de carbono por una unidad de nitrógeno, es decir, C/N = 30/1. Por lo tanto, cuando no se tiene un residuo con una relación C/N inicial apropiada, es necesario realizar mezclas de materias en las proporciones adecuadas para obtener la relación C/N óptima.

La relación C/N en una mezcla de materias primas puede calcularse según la ecuación [2.1].

$$K = \frac{C_1Q_1 + C_2Q_2 + \dots + C_nQ_n}{N_1Q_1 + N_2Q_2 + \dots + N_nQ_n} \quad [2.1]$$

Siendo:

K = relación carbono/nitrógeno de la mezcla de materias primas.

C = % de carbono orgánico contenido en cada materia prima.

N = % de nitrógeno orgánico contenido en cada materia prima.

Q = Peso fresco de cada materia, expresado en kilos o toneladas.

#### c) Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles

Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida llamada sólidos totales (ST). El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla con que se carga el digester es un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se efectúe satisfactoriamente (Chenet *et al.*, 2010; Varnero, 2011). La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas.

Experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores semicontinuos no debe tener más de entre un 8% y un 12% de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso, a diferencia de los digestores discontinuos, que tienen entre un 40 a 60% de sólidos totales.

Los sólidos totales representan el peso de las materias primas sin humedad (seco), y los sólidos volátiles son los sólidos de la materia seca que pasan a formar parte de la fase gas. De forma que los sólidos restantes son los denominados sólidos fijos.

#### d) Temperatura

Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros sistemas biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que, a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los

microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás.

La temperatura de operación del digestor es considerada uno de los principales parámetros de diseño debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica. Las variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden provocar la desestabilización del proceso. Por ello, para garantizar una temperatura homogénea en el digestor, es imprescindible un sistema adecuado de agitación y un controlador de temperatura.

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos: psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos (entre 25 y 45°C) y termófilos (entre 45 y 65°C), siendo la velocidad máxima específica de crecimiento mayor, conforme aumenta el rango de temperatura (Varnero 2011; Soria *et al.*, 2001). Dentro de cada rango de temperatura, existe un intervalo para el cual dicho parámetro se hace máximo, estableciendo así la temperatura de trabajo óptima en cada uno de los rangos posibles de operación.

La temperatura del proceso actúa también sobre aspectos físico-químicos del mismo. La solubilidad de los gases generados desciende al aumentar la temperatura, favoreciéndose la transferencia líquido-gas. Esto supone un efecto positivo para gases tales como amoníaco, hidrógeno y ácido sulfhídrico, dada su toxicidad sobre el crecimiento de los microorganismos anaeróbicos. Una posible desventaja de este fenómeno es que el descenso de la solubilidad del CO<sub>2</sub> provocaría un aumento del pH, lo que generaría, en lodos de elevada concentración de amonio, posibles situaciones de inhibición por NH<sub>3</sub>.

Por otra parte, la solubilidad de la mayoría de las sales aumenta con la temperatura de manera que la materia orgánica es más accesible para los microorganismos aumentando así la velocidad del proceso. Sin embargo, si se trata de compuestos tóxicos, al aumentar su solubilidad con la temperatura serán potencialmente más tóxicos, lo que puede explicar parcialmente la mayor inhibición de determinados compuestos orgánicos en el rango termofílico, como los ácidos grasos de cadena larga.

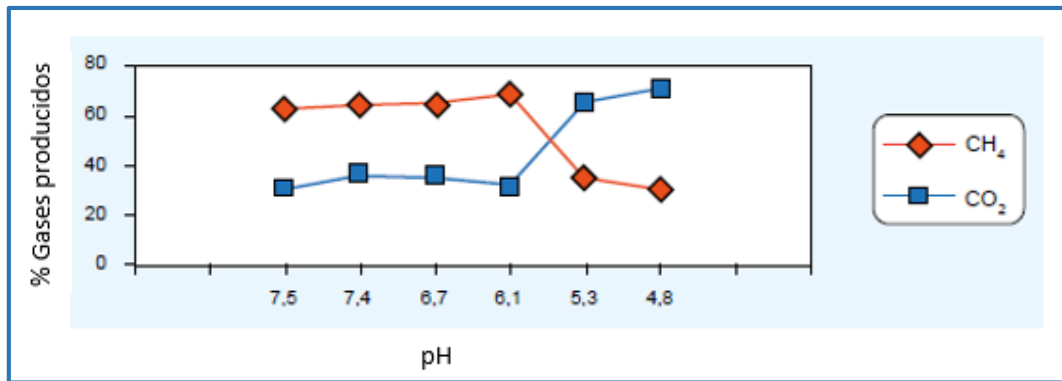
Además, la temperatura influye directamente en determinados equilibrios químicos, con gran influencia sobre el proceso anaerobio, como los del amonio-amoniaco libre o ácidos grasos volátiles ionizados-no ionizados. En general, con la temperatura se favorecen las formas no ionizadas, que resultan más tóxicas para los microorganismos ( $\text{NH}_3$  y ácidos grasos volátiles- no ionizados). Por último, la viscosidad de sólidos y semisólidos disminuye al aumentar la temperatura lo que implica menores necesidades de agitación.

#### e) Rango de pH alcalinidad

El proceso anaeróbico es altamente sensible a los pequeños cambios en los niveles de pH que se encuentran fuera del rango óptimo. Los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH que los otros microorganismos de la comunidad microbiana anaeróbica. Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaeróbica presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad. El óptimo es entre 5,5 y 6,5 para acidogénicos y entre 7,8 y 8,2 para metanogénicos. El pH óptimo para cultivos mixtos se encuentra en el rango entre 6,8 y 7,4, siendo el pH neutro el ideal. Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6,0 ni subir de 8,0 (Varnero, 2011; Cioabla et al., 2012).

El valor del pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición. Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas. En la Figura 2.2 se muestra la evolución de la producción de metano y dióxido de carbono con respecto a las variaciones del pH.

Los valores de pH bajos reducen la actividad de los microorganismos metanogénicos, provocando la acumulación de ácido acético y  $\text{H}_2$ . Al aumentar la presión parcial del  $\text{H}_2$ , las bacterias que degradan el ácido propanoico serán severamente inhibidas, causando una excesiva acumulación de ácidos grasos volátiles de alto peso molecular, particularmente ácidos propiónico y butírico, los cual disminuirán la producción de ácido acético, generando una disminución del pH. Si la situación no se corrige, el proceso dejará de producir (Varnero, 2011; Soria et al., 2001).



**Figura 2.2. Evolución de la producción de gases respecto a las variaciones del pH.**  
**Fuente: (Varnero y Arellano, 1991)**

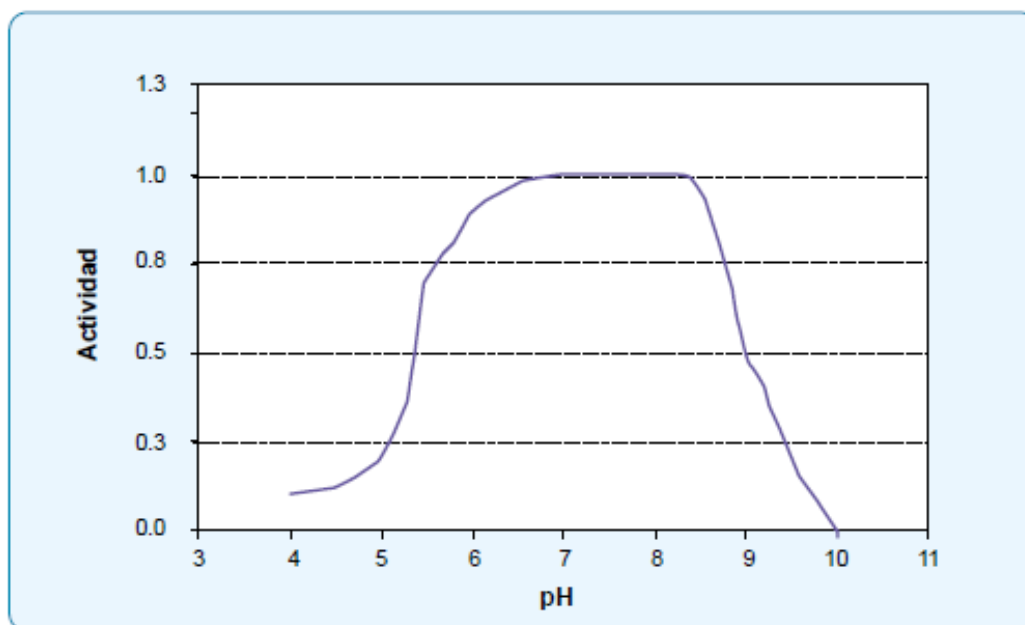
Por otra parte, el pH afecta a los diferentes equilibrios químicos existentes en el medio, pudiendo desplazarlos hacia la formación de un determinado componente que tenga influencia en el proceso. Este es el caso de los equilibrios ácido-base del amoníaco y del ácido acético: Al aumentar el pH se favorece la formación de amoníaco que, en elevadas concentraciones, es inhibidor del crecimiento microbiano y a valores de pH bajos se genera mayoritariamente la forma no ionizada del ácido acético, que inhibe el mecanismo de degradación del propionato.

En los procesos anaeróbicos, la caída del pH es causada frecuentemente por la acumulación de ácidos grasos volátiles y/o por la excesiva acumulación de dióxido de carbono. Una de las primeras opciones para resolver el problema es reducir la tasa de carga orgánica volumétrica, hasta el punto en el cual los ácidos grasos volátiles se consuman más rápido de lo que se generan. Una vez que el exceso de ácidos grasos volátiles se ha agotado, el pH del sistema retorna a los rangos de operación normales y la metanogénesis comienza a repuntar.

La carga orgánica volumétrica puede incrementarse gradualmente a medida que el proceso se recupera, hasta completar la capacidad de carga. En circunstancias extremas, además de la disminución de la carga orgánica volumétrica se puede suplementar algún producto químico para ajustar el pH. Otra opción recientemente explorada consiste en la dosificación periódica de oxígeno en el sistema anaeróbico. La oxigenación limitada contribuye a eliminar drásticamente el exceso de ácidos grasos volátiles a través de los

microorganismos facultativos. Estos microorganismos son menos susceptibles a cambios en el pH. Debido a que los metanogénicos son vulnerables a cambios bruscos en el pH fuera del rango óptimo, el sistema anaeróbico requiere una capacidad buffer suficiente (alcalinidad) para mitigar los cambios en el pH. El pH de un sistema anaeróbico, operando dentro de los rangos aceptables, es controlado principalmente por la alcalinidad natural del sistema. La destrucción de la materia orgánica, principalmente las proteínas, liberan amoníaco.

En la Figura 2.3 se muestra el efecto del pH sobre la actividad metanogénica, que es otro aspecto de gran relevancia.



*Figura 2.3. Influencia del pH sobre la actividad de las bacterias metanogénicas.  
Fuente: (Speece, 1996)*

#### f) Nutrientes

Al igual que en todas las operaciones bioquímicas, se requieren macronutrientes (nitrógeno y fósforo) y micronutrientes (minerales traza) en el proceso anaeróbico para la síntesis de nueva biomasa. Sin embargo, una de las ventajas de los procesos de digestión anaeróbica, frente a los procesos aeróbicos, es su baja necesidad de nutrientes derivada de los bajos índices de producción de biomasa que presentan los microorganismos anaeróbicos. La cantidad de nitrógeno y fósforo requerido para la síntesis de biomasa puede calcularse asumiendo la fórmula empírica de una célula bacteriana anaeróbica como

$C_5H_7O_2N$ . Se ha comprobado que se requieren unos 12 gramos de nitrógeno por cada 100 g de biomasa anaeróbica producida.

La demanda de fósforo corresponde a  $1/7 - 1/5$  de la demanda de nitrógeno. Como regla general, se asume que un 10 % de la materia orgánica disponible durante el proceso anaeróbico se utiliza para la síntesis de biomasa. Esto puede utilizarse para calcular los requerimientos de nitrógeno y fósforo.

Además del nitrógeno y el fósforo, se han identificado otros nutrientes como esenciales para los microorganismos anaeróbicos. Los metales tales como hierro, cobalto, molibdeno, selenio, calcio, magnesio, zinc, cobre, manganeso, tungsteno y boro a niveles de  $mgL^{-1}$  y vitamina  $B_{12}$  en niveles de  $\mu gL^{-1}$ , se ha encontrado que mejoran la producción de metano. Algunos de los metales y sus funciones en el proceso anaeróbico se comentan a continuación:

- Níquel: es particularmente importante para los metanogénicos debido a que es un constituyente estructural de las bacterias metanogénicas.
- Cobalto: es fundamental debido a que también es un constituyente estructural de la vitamina  $B_{12}$ , la cual cataliza la metanogénesis.

Además, el níquel junto con el cobalto y otros minerales son esenciales para la degradación del metanol en un reactor bajo condiciones mesofílicas.

#### g) Tóxicos e inhibidores del proceso de metanogénesis

El proceso de digestión anaeróbica es inhibido por la presencia de sustancias tóxicas en el sistema. Estas sustancias pueden formar parte de las materias primas que entran al digestor o pueden ser subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos anaeróbicos. Sustancias tales como amoníaco, metales pesados, compuestos halogenados, cianuro y fenoles, forman parte del primer grupo, mientras que, sulfuro, amoníaco y ácidos grasos de cadena larga, forman parte del último grupo mencionado.

En determinados casos, la magnitud del efecto tóxico de una sustancia puede reducirse significativamente mediante la aclimatación de la población de

microorganismos al tóxico ya que, por otra parte, muchas de estas sustancias a bajas concentraciones pueden ser estimuladoras del proceso.

#### h) Agitación

Los objetivos de esta operación son los siguientes: eliminar los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas, mezclar el sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra en el interior del digestor, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica que reducirían el volumen efectivo del reactor, así como prevenir la formación de espumas y la sedimentación en el reactor.

En la selección del sistema, la frecuencia e intensidad de la agitación se debe considerar una variable de gran importancia ya que como se ha comentado, el proceso anaeróbico involucra un equilibrio simbiótico entre varios tipos de bacterias. La ruptura de ese equilibrio podría implicar una merma en la actividad biológica y por ende una reducción en la producción de biogás.

La agitación aumenta la producción de gas y disminuye el tiempo hidráulico de residencia, lo cual se debe básicamente a cuatro razones:

- Por una distribución uniforme de la temperatura y sustrato en el interior del biodigestor.
- Por una distribución uniforme de los productos, tanto intermedios como finales.
- A un mayor contacto entre el sustrato y las bacterias, evitando la formación de cúmulos alrededor de las bacterias.
- A que evita la acumulación de lodo (espuma) en la parte superior del digestor que dificulta la salida del biogás.

Se distinguen principalmente tres tipos de agitación:

- Mecánica: a través de agitadores manuales o con motores eléctricos.

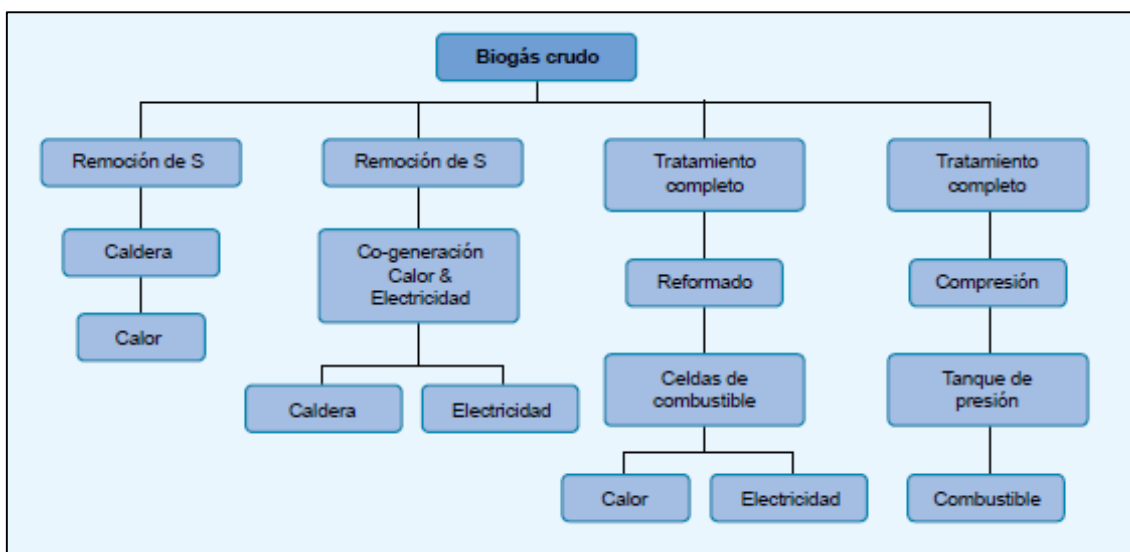


- Hidráulica: a través de bombas de flujo lento se hace recircular la biomasa.
- Burbujeo de biogás: se recircula el biogás producido al fondo del biodigestor para producir burbujeo y de esta manera remover la biomasa.

### 2.2.3.3-Post-tratamiento del biogás

El biogás, mezcla principal de metano y dióxido de carbono, obtenido de la fermentación anaerobia podría no ser absolutamente puro, puesto que puede contener partículas y trazas de otros gases. Todas estas impurezas que lo acompañan deben ser eliminadas dependiendo del tipo de utilización que se le vaya a dar al biogás.

En *la Figura 2.4* se resumen los posibles tratamientos del biogás en función de la finalidad del mismo.



*Figura 2.4. Tratamientos posibles del biogás en función del uso final del mismo.*

La purificación del biogás es importante por dos razones principales:

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

### Eliminación del dióxido de carbono

Un biogás enriquecido de metano es aquel que presenta una concentración de metano superior a 95%. Para elegir adecuadamente el procedimiento de eliminación del CO<sub>2</sub> y alcanzar la concentración deseada deben considerarse los siguientes parámetros:

- Concentración mínima requerida.
- Bajo consumo de material absorbente o adsorbente (fácil regeneración, estabilidad química y térmica).
- Que no genere impactos ambientales significativos.
- Que sea fácilmente disponible y de bajo coste.

Para la mayoría de las aplicaciones más simples de biogás tales como calentadores, motores de combustión interna o sistemas generadores, la eliminación del CO<sub>2</sub> del biogás no es necesaria y el CO<sub>2</sub> simplemente pasa a través del quemador o motor. Para aplicaciones más complejas de biogás, tales como vehículos, que requieren combustibles de mayor densidad, el CO<sub>2</sub> debe ser eliminado. Esta eliminación del CO<sub>2</sub> incrementa el poder calorífico del biogás proporcionando así un gas similar al gas natural. El CO<sub>2</sub> puede eliminarse del biogás mediante procesos de absorción o adsorción. Otros procesos disponibles son las separaciones por membrana y criogénicas.

Para eliminar el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S del biogás se puede utilizar un lavado a presión en contracorriente con agua. Para el caso del CO<sub>2</sub> en particular, los factores críticos son el pH, la presión y la temperatura. Para aumentar el lavado del CO<sub>2</sub> desde el biogás debe haber condiciones de alta presión, baja temperatura y pH alcalino. El uso de disoluciones de Ca(OH)<sub>2</sub> también puede eliminar completamente el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S. Estos gases son más solubles en algunos disolventes orgánicos tales como polietilenglicol, que no disuelven el metano. Estos disolventes orgánicos pueden, por lo tanto, ser usados para lavar estos gases. Los sistemas que utilizan este tipo de disolventes orgánicos pueden eliminar el CO<sub>2</sub> del biogás

hasta valores bajo 0,5%. Sin embargo, el uso de disolventes orgánicos es mucho más costoso que los sistemas de lavado con agua.

La adsorción de CO<sub>2</sub> sobre sólidos tales como carbón activado o tamices moleculares es factible, aunque requiere mayor temperatura y presión. Estos procesos pueden no ser económicamente rentables debido a las altas temperaturas y presiones asociadas. La separación criogénica es otro proceso posible, debido a que, a 1 atm, el metano presenta un punto de ebullición de -106°C, mientras que el CO<sub>2</sub> presenta un punto de ebullición de -78°C. Por lo tanto, la condensación y destilación fraccionada a bajas temperaturas puede separar el metano puro en forma líquida, lo cual es conveniente para el transporte. Mediante este proceso se puede obtener un metano de hasta 97% de pureza, pero el proceso requiere altas inversiones iniciales.

Las membranas o tamices moleculares dependen de las diferencias en la permeabilidad de los componentes individuales del gas a través de una membrana fina. Las separaciones por membrana están adquiriendo una creciente popularidad. Existen otras alternativas por conversión química, pero estas tecnologías aún no son viables del punto de vista económico.

### Eliminación del agua

En el momento de salir del digestor, generalmente, el biogás se satura con vapor. El biogás debe tener una humedad relativa inferior a 60% para prevenir la formación de condensado en las tuberías de transporte. Este condensado, particularmente en combinación con otras impurezas puede corroer las paredes de las tuberías. Frecuentemente, el biogás debe ser secado antes de ser purificado.

El biogás puede secarse por compresión y/o enfriamiento del gas, adsorción en carbón activado o absorción, principalmente en soluciones de glicol y sales higroscópicas.

### Eliminación del sulfuro de hidrógeno

El sulfuro de hidrógeno en combinación con el vapor de agua en el biogás, puede formar ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) el cual es muy corrosivo para los motores y sus

componentes. En concentraciones superiores a 100 ppm en volumen, el  $H_2S$  es también muy tóxico. El carbón activado puede utilizarse para eliminar el  $H_2S$  y  $CO_2$ . El carbón activado actúa como catalizador convirtiendo el  $H_2S$  en azufre elemental. Otra forma de lavar el sulfuro de hidrógeno es usando disoluciones de NaOH, agua o sales de hierro.

Un proceso simple y barato consiste en dosificar una corriente de biogás con  $O_2$ , el cual oxida el  $H_2S$  a azufre elemental. La dosificación con oxígeno puede reducir el contenido en el biogás de  $H_2S$  a niveles inferiores a 50 ppm. Esta dosificación con oxígeno, no está exenta de riesgos de explosión, por lo cual debe efectuarse con precaución.

El óxido de hierro también es capaz de desplazar el  $H_2S$  transformándolo en sulfuro de hierro. Sin embargo, este método puede ser sensible en presencia de un alto contenido de vapor de agua en el biogás.

#### Eliminación del oxígeno

Un contenido alto de oxígeno en el biogás podría ocurrir solamente en casos excepcionales. Este oxígeno se puede eliminar con los procedimientos de desulfuración. Los procesos de adsorción, por ejemplo, con carbón activado, tamices moleculares, o la tecnología de diafragma también son aplicables.

#### Eliminación del amonio

Cuando los residuos del procesamiento de la industria alimentaria se utilizan como sustratos, se puede producir amoníaco en cantidades considerables, dependiendo de la estabilidad del proceso de fermentación. El amoníaco se forma a valores de pH altos a partir del amonio. Por lo tanto, la formación de amoníaco se puede evitar mediante la operación adecuada de la planta controlando el valor de pH del sistema.

La eliminación del amoníaco se debe combinar con otros procedimientos de purificación del biogás. Cuando el amoníaco pasa a través de una disolución ligeramente ácida, permanece en este líquido en forma de amonio.

#### 2.2.3.4- Aplicaciones de los residuos fermentados

La construcción de una planta de biogás en una zona rural se traduce en una nueva forma de utilización completa de las materias orgánicas. La recuperación de biomasa orgánica residual agrícola transforma la modalidad de utilización única en un sistema múltiple. Con la digestión anaeróbica se obtienen dos tipos de productos: uno es el biogás, utilizado principalmente como combustible y el otro, el lodo residual orgánico estabilizado, utilizado como acondicionador y/o biofertilizante de suelos.

Por otra parte, es ampliamente conocida la importancia que tiene la materia orgánica por el papel que desempeña en la génesis y evolución de los suelos, siendo una característica distintiva cuando se le compara con el material geológico de formación reciente; constituyendo la única fuente de reserva de nitrógeno en el suelo; además, de su necesaria participación para la estructuración en la mayoría de los suelos, especialmente los de textura fina. La cantidad y calidad de la materia orgánica influye sobre diversos procesos físicos, químicos y biológicos en el sistema edáfico y representa la base de la fertilidad de los suelos (Varnero, 2011).

Esto puede lograrse con la incorporación de diversos residuos orgánicos, de origen animal o vegetal. Sin embargo, la práctica de incorporarlos directamente al suelo constituye un manejo poco recomendable por el tiempo que éstos requieren para transformarse en compuestos asimilables por las plantas, a través de los procesos de mineralización y de humificación. La estabilización de residuos orgánicos previo a su incorporación al suelo, tiene como finalidad acelerar la descomposición o mineralización primaria de subproductos y residuos orgánicos, para obtener un producto orgánico más estable biológicamente, enriquecido en compuestos húmicos y libre de patógenos.

Los bioprocesos utilizados para estabilizar los residuos orgánicos, se basan en una digestión de tipo aeróbica (compostaje, lombricultura) o de tipo anaeróbica (fermentación con producción de biogás). La composición química de los productos obtenidos en cada caso, compost y bioabono, es variable dependiendo de la materia prima usada y del tiempo de estabilización. En

general, se observa la obtención de un producto orgánico estabilizado, con una drástica disminución de coliformes totales, mejorando la calidad sanitaria, presentando una buena actividad biológica y un adecuado desarrollo de fermentos nitrosos y nítricos de la microflora total, hongos y levaduras, lo que permitiría un buen complemento cuando se incorporan estos materiales a terrenos improductivos.

La calidad de cualquier material orgánico que ha sido bioprocesado, ya sea en forma aeróbica o anaeróbica, está relacionada con la estabilidad biológica y la madurez química que se alcanza, durante el desarrollo y evolución de las diferentes etapas del proceso. Esto coincide con los valores constantes obtenidos en algunos parámetros utilizados para definir el Índice de Madurez de los Compost (Varnero et al, 2004). Este índice considera tres características esenciales:

- La relación C/N, para discriminar materiales con mayor probabilidad de inmovilizar nitrógeno.
- La estabilidad biológica, la cual excluye materiales que se encuentran en activa descomposición microbiana, porque contienen un nivel de carbono que sustenta la actividad microbiana.
- La madurez química, donde se evalúa la presencia de compuestos fitotóxicos, productos de una biodegradación que se encuentra aún en fases intermedias. En la práctica, los residuos orgánicos presentan distintas proporciones de carbono resistente a la descomposición microbiana, como la celulosa y la lignina, los que pueden ser utilizados por microorganismos específicos como hongos y actinomicetes, que entran en plena actividad cuando las formas lábiles de carbono se han agotado.

Se han descrito numerosos métodos (CCQC, 1999;) para evaluar tanto la estabilidad biológica como la madurez química, los cuales se pueden agrupar en análisis físicos, químicos, y bioensayos.

El valor agrícola de un residuo orgánico bioprocesado, en un amplio sentido se puede establecer en función de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, las cuales a su vez dependen de las características físicas y químicas de las materias primas que le dieron origen. Entre los principales parámetros que permitirían informar sobre el valor agrícola se mencionan los siguientes: capacidad de intercambio catiónico, contenido de materia orgánica y de nutrientes totales y disponibles, relación carbono-nitrógeno, contenido de sales solubles y pH.

Los productos orgánicos estabilizados obtenidos se pueden clasificar en función de las características bioquímicas que presentan las materias primas disponibles, definiéndose un perfil bioquímico, considerando esencialmente el nivel de materia orgánica que presentan. De acuerdo con esto, se pueden visualizar cuatro grupos de productos orgánicos estabilizados (Robin y Le Quellec, 1997):

- Grupo 1: Fracción soluble superior o igual al 30% de la materia orgánica seca y alto nivel de nitrógeno total.
- Grupo 2: Fracción ligno-celulosa superior o igual al 65% de la materia orgánica seca.
- Grupo 3: Fracción soluble más hemicelulosa superior o igual al 45% de la materia orgánica seca.
- Grupo 4: Nivel de materias minerales superior a 40% de la materia seca y bajo nivel de carbono orgánico total.

Estos cuatro grandes grupos de productos orgánicos estabilizados, pueden ser evaluados en forma más global, considerando si responden al menos uno de los dos criterios que se consideran para su clasificación como: acondicionador o biofertilizante.

#### 2.2.3.5- Aplicaciones del biogás

Existen diversas formas de usar el biogás. Dentro de éstas destacan la producción de calor o vapor, generación de electricidad y combustible de vehículos (Varnero,2011; Marchain,1992).

### Producción de calor o vapor

El uso más simple del biogás es para la obtención de energía térmica (o calor). En aquellos lugares donde los combustibles son escasos, los sistemas pequeños de biogás pueden proporcionar la energía calorífica para actividades básicas como cocinar y calentar agua. Los sistemas de pequeña escala también se pueden utilizar para iluminación.

Los quemadores de gas convencionales se pueden adaptar fácilmente para operar con biogás, simplemente modificando la relación aire-gas. El requerimiento de calidad del biogás para quemadores es bajo. Se necesita alcanzar una presión de gas de 8 a 25 mbar y mantener niveles de H<sub>2</sub>S inferiores a 100 ppm para conseguir un punto de rocío de 150°C (Varnero, 2011, Víquez, 2010).

### Generación de electricidad

Los sistemas combinados de calor y electricidad utilizan la electricidad generada por el combustible y el calor residual que se genera. Algunos sistemas combinados producen principalmente calor y la electricidad es secundaria. Otros sistemas producen principalmente electricidad y el calor residual se utiliza para calentar el agua del proceso. En ambos casos, se aumenta la eficiencia del proceso si se utilizara el biogás sólo para producir electricidad o calor. Las turbinas de gas (microturbinas, desde 25 hasta 100 kW y turbinas grandes, de potencias superiores a 100 kW) se pueden utilizar para la producción de calor y energía, con una eficiencia comparable a los motores de encendido por chispa y con un bajo mantenimiento. Sin embargo, los motores de combustión interna son los usados más comúnmente en este tipo de aplicaciones. El uso de biogás en estos sistemas requiere de la eliminación de H<sub>2</sub>S por debajo de 100 ppm y del vapor de agua.



Las celdas de combustible se consideran las plantas de energía a pequeña escala del futuro para la producción de electricidad y calor, con una eficiencia superior al 60% y bajas emisiones.

### Combustible para vehículos

El uso del biogás en vehículos es posible y en la realidad se ha empleado desde hace bastante tiempo. Para esto, el biogás debe tener una calidad similar a la del gas natural, para usarse en vehículos que se han acondicionado para el funcionamiento con gas natural. La mayoría de vehículos de esta categoría han sido equipados con un tanque de gas y un sistema de suministro de gas, además del sistema de gasolina normal de combustible.

El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto de gasolina como de diésel. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión; por otro lado, una desventaja es su baja velocidad de encendido.

Sin embargo, su difusión está limitada por los siguientes problemas:

- A fin de permitir una autonomía razonable el gas por su volumen debe ser almacenado en contenedores cilíndricos de alta presión (200 a 300 bar); este tipo de almacenamiento implica que el mismo deba ser purificado antes de su compresión.
- La conversión de los motores es costosa (instalación similar a la del gas natural) y el peso de los cilindros disminuye la capacidad de carga de los vehículos.
- Por último, la falta de una adecuada red de abastecimiento y la energía involucrada en la compresión a gran escala de este tipo de uso.

### 2.3-Posibles alternativas en Canarias

El crecimiento demográfico y las nuevas culturas de consumo son factores que contribuyen a una mayor generación de residuos que deben ser gestionados y tratados correctamente. Los principales tipos de residuos son:

- Residuos sólidos urbanos
- Residuos agrícolas
- Residuos industriales
- Residuos peligrosos

En Canarias se generan millones de toneladas de residuos agrícolas que tienen un alto potencial energético. Muchos de estos residuos agrícolas provienen de cultivos de tomates y plantaciones de plátano, que tras una producción superior al consumo demandado se estropean y acaban convirtiéndose en un residuo del que es necesario deshacerse.

Una de las alternativas para estos residuos es la producción de biogás, aprovechando el estado de descomposición en el que se encuentran. Los plátanos y los tomates han demostrado ser una buena fuente de producción de biogás por su composición química. Además, el aprovechamiento de la fruta completa aumenta su viabilidad para la propuesta de un proyecto a escala industrial de producción de biogás.

En la *Tabla 2.1* se muestran los residuos de plátano y tomate generados en Canarias en el periodo entre el año 2000 y 2010.

Los datos fueron proporcionados por la Consejería de Agricultura del Gobierno de Canarias, las oficinas de extensión agraria de los cabildos correspondientes y el Instituto Canario de Estadística (ISTAC). La previsión para estos residuos en el año 2020 se reduce a unas 90.000 ton/año de plátanos, manteniéndose las toneladas de tomate en torno a las 24.000 ton/año del año 2010.

Estos datos justifican claramente la posibilidad del aprovechamiento de estos residuos para su transformación en biocombustibles, a la vez que se elimina del medio ambiente un residuo sobrante.

**Tabla 2.1. Residuos de tomates y plátanos en Canarias**

Año	Producción, t/año	
	Tomate	Plátano
2000	62.068	111.122
2001	61.039	118.110
2002	51.317	114.417
2003	51.586	112.557
2004	53.682	117.031
2005	48.069	96.601
2006	39.380	97.500
2007	38.745	100.187
2008	32.944	103.910
2009	31.405	98.671
2010	24.092	111.022

## **3-OBJETIVOS**

---

Las tecnologías de digestión anaerobia aplicadas a residuos agrarios para su transformación en biogás permiten obtener importantes beneficios energéticos, ambientales y económicos. El grupo de investigación de catálisis heterogénea ha realizado diferentes estudios basados en procesos de digestión anaerobia a partir de mezclas de residuos orgánicos de distinto origen para su transformación en productos de alto valor añadido como es el biogás.

Está demostrado que es el pH una de las principales variables de operación del proceso anaeróbico, dada la sensibilidad de las poblaciones microbianas a variaciones fuera del rango óptimo establecido ( $7,5 < \text{pH} < 8,5$ ). Como consecuencia de estos antecedentes se planteó como objetivo general de este Trabajo Fin de Grado el estudio de la producción y composición del biogás a partir de distintas mezclas de residuos agrarios (plátanos y tomates) combinados con subproductos procedentes de la fabricación de biodiésel como son la pulpa de la jatropha y la glicerina. Se pretende pues analizar la posibilidad de reciclar todos estos residuos transformándolos en productos de alto valor añadido.

La consecución del objetivo final de este TFG implicó los siguientes objetivos específicos:

1. Revisión bibliográfica que aportase información complementaria sobre el trabajo a realizar, así como para contrastar los resultados obtenidos.
2. Caracterización de los residuos empleados antes y después del proceso de digestión, a través de los análisis de contenidos en sólidos totales (ST), fijos (SF), y volátiles (SV). Las mezclas empleadas, sus identificaciones y sus correspondientes contenidos en residuos, se listan a continuación:
  - P-T: plátano y tomate
  - P-J: plátano y pulpa de jatropha
  - P-T-G: plátano, tomate y glicerina
  - P-J-G: plátano, jatropha y glicerina
3. Estudio del efecto de la glicerina sobre la producción y composición del biogás mediante procesos de digestión anaerobia empleando las mezclas de residuos anteriores.
4. Estudio de la influencia del pH sobre la producción y composición del gas en los procesos de fermentación anteriores.

5. Estudio del efecto del control continuo de pH sobre el proceso de anaeróbico a partir de la mezcla óptima de residuos obtenida del estudio anterior.
6. Estudio de la posible utilización del líquido procedente de la fermentación de los procesos anteriores sobre la producción y composición del biogás.

## **4-MATERIALES Y MÉTODOS**

---

En este trabajo se emplearon dos tipos de digestores para estudiar:

1. La producción y composición del biogás a partir de ensayos de fermentación anaeróbica empleando diferentes residuos como materias primas.
2. La influencia del control continuo de pH sobre la producción y composición del biogás.

Las materias primas, los productos químicos y la técnica experimental de los estudios realizados se describe con mayor grado de detalle en los siguientes apartados.

#### **4.1.-Set de biodigestores**

Para la primera parte del trabajo, se realizaron dos experimentos iguales en un set de cuatro biodigestores y sus réplicas, ocho biodigestores en total, de los cuales cuatro se utilizaron para llevar a cabo la medida del volumen de gas producido, y los cuatro restantes para el análisis de su composición.

##### **4.1.1.-Materias primas**

Las materias primas utilizadas fueron residuos plátanos y tomates adquiridas en un supermercado local en estado de madurez avanzado, pulpa de *Jatropha Curcas* y restos de glicerina resultantes del proceso de obtención de biodiesel, realizado por otros compañeros del laboratorio pertenecientes al grupo de investigación de Catálisis Heterogénea.

Además de los residuos, los productos químicos para alcanzar las condiciones óptimas de fermentación fueron:

- Cloruro de amonio,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (s)
- Disolución buffer de  $\text{PO}_4^-$  (pH=7)
- Carbonato cálcico,  $\text{CaCO}_3$  (s)
- Hidróxido sódico en lentejas, NaOH
- Disolución de ácido clorhídrico, 37%, fumante.



- Nitrógeno gas, 99% (Air liquide)
- Agua destilada

#### **4.1.2-Material de laboratorio**

El material de laboratorio utilizado fue:

- Baño termostático
- Envases de vidrio transparente de 500 mL como biodigestores y sus tapones de goma correspondientes (8 unidades).
- Recipientes de vidrio transparente de 1L como medidores de volumen, y sus correspondientes tapones de goma (8 unidades)
- Frascos de vidrio transparente de 6L (2 unidades)
- Conexiones y accesorios como válvulas, codos y T.
- Material de vidrio tal como probetas, matraces, kitsato...
- Crisoles de cerámica para los análisis de sólidos (8 unidades)
- Estufa
- Mufla
- Jeringa para líquidos de 10 mL
- Jeringa para gases de 1 mL
- Bomba de vacío
- Electrodo de pH y unidad de lectura.
- Cromatógrafo de gases, Agilent 7820A

### 4.1.3-Instalación experimental

La instalación experimental donde se llevaron a cabo los experimentos de digestión anaeróbica estaba formada por ocho envases de vidrio de 500 mL o biodigestores sellados herméticamente con sus tapones de goma y sumergidos en el interior del baño termostático a una temperatura de 31,5°C. Cada biodigestor estaba acoplado a un recipiente de vidrio de 1L graduado con una tira de papel milimetrado para poder medir la cantidad de gas producido (por desplazamiento del líquido contenido en su interior). De cada envase de 1L salía un tubo conector hacia el frasco de 6L donde se recogía el agua desplazada por el biogás. Una imagen del set de biodigestores se muestra en el *Figura 4.1*.



*Figura 4.1. Set de biodigestores*

Los ensayos con las diferentes mezclas de residuos se realizaron por duplicado colocando en el baño termostático a la izquierda los digestores dispuestos para la medida de la producción diaria de gas, y a la derecha los homólogos para la extracción de las muestras gaseosas y sus correspondientes análisis, ya que es conocido el hecho de que la toma de muestra en un biodigestor puede alterar los equilibrios químicos del sistema y perturbar y/o falsear la medida de la producción de gas.

#### 4.1.4-Preparación de los biodigestores

Como se comentó anteriormente los residuos de plátanos y tomates fueron adquiridos en un supermercado local de la zona. Tanto los plátanos como los tomates estaban en un estado de maduración avanzado por lo que los convertía en residuos excelentes para su transformación en productos de alto valor añadido: biogás y digestato. La pulpa de *Jatropha Curcas* y la glicerina empleada en las mezclas se obtuvieron como subproductos en los procesos de obtención de biodiésel realizados por otros compañeros del grupo de trabajo.

El contenido de cada uno de los biodigestores, así como su identificación se muestra en la *Tabla 4.1*.

**Tabla 4.1. Mezclas de residuos en cada biodigestor**

Biodigestores	Mezcla	Identificación
1 y 5	60% Plátano - 40% Tomate	P-T
2 y 6	60% Plátano - 20% Tomate - 20% Glicerina	P-T-G
3 y 7	60% Plátano - 40% <i>Jatropha</i>	P-J
4 y 8	60% Plátano - 20% <i>Jatropha</i> - 20% Glicerina	P-J-G

Se decidió utilizar un total de 60 gramos de mezcla en cada biodigestor dadas las dimensiones de los mismos. El contenido de cada residuo en cada mezcla se presenta en la *Tabla 4.2*.

Por otro lado, las cantidades necesarias de los distintos productos químicos se calcularon de acuerdo a las relaciones establecidas en bibliografía y que se recogen en la *Tabla 4.3*.

**Tabla 4.2. Cantidad de materias primas en cada biodigestor**

Residuo	Masa de residuo en cada biodigestor (g)			
	P-T	P-T-G	P-J	P-J-G
Plátano	36	36	36	36
Tomate	24	12	-	-
Jatropha	-	-	24	12
Glicerina	-	12	-	12

**Tabla 4.3. Relaciones cantidad de productos químicos y cantidad de residuo**

Productos químicos/Residuo	Relación
mL H <sub>2</sub> O/g residuo	4,83
g NH <sub>4</sub> Cl/g residuo	0,08
g CaCO <sub>3</sub> /g residuo	0,01
mL buffer/g residuo	0,2

Una vez hechos los cálculos necesarios se empezaron a preparar los biodigestores: se cortaron los plátanos y tomates en trozos pequeños, de aproximadamente uno o dos centímetros, para que no presentasen dificultad al introducirlos en el digestor. A continuación, se pesaron las cantidades de cada residuo según la Tabla 4.2 y se introdujeron en los correspondientes biodigestores. Posteriormente se agregó a cada biodigestor 290 mL de agua destilada; 4,8 g de cloruro de amonio; 0,5 g de carbonato de calcio y los 10 mL de disolución buffer de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. Se agitaron los digestores unos minutos para homogeneizar el contenido.

A continuación, se midió el pH de cada mezcla para comprobar si estaba dentro del rango establecido como óptimo para la actividad metanogénica, entre 7,5 y 8,5 unidades de pH. Dado que en algunos casos los valores de pH no estaban

dentro del rango óptimo se realizó el del mismo añadiendo hidróxido sódico en lentejas o escamas.

Finalmente se cerraron todos los biodigestores y se acoplaron con sus correspondientes conexiones y válvulas. Se procedió a hacer vacío para eliminar el aire de su interior y se le inyectó nitrógeno gaseoso para crear la atmósfera inerte necesaria para realizar el proceso anaeróbico.

Por último, se abrieron las válvulas para expulsar el exceso de nitrógeno alcanzándose la presión atmosférica en los biodigestores. De nuevo se agitaron y se sumergieron en el baño a la temperatura de 31,5 °C.

Finalmente se comprobó que todas las conexiones estaban bien selladas y se procedió a abrir las válvulas para dar comienzo al experimento.

#### **4.1.5-Reactivación de los biodigestores**

Como se comentó en el apartado 2.2.3.2 de esta memoria, existen diferentes razones por las que puede cesar la producción de biogás destacándose:

- Una disminución del pH por debajo del rango óptimo establecido entre 7,5 y 8,5 unidades de pH y debido probablemente a que parte del CO<sub>2</sub> del biogás se disuelva en la mezcla ocasionando incluso la muerte de la población microbiana.
- Una disminución tanto de los nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo, como de micronutrientes tal como cobalto, zinc y vitamina B<sub>12</sub>.

Iniciado el proceso de fermentación anaeróbica con las mezclas comentadas, la producción de biogás crecía de forma exponencial durante los primeros tres o cuatro días, para luego disminuir considerablemente o incluso cesar por completo. En estos casos fue necesaria la reactivación del sistema ajustando el pH hasta los valores adecuados. El procedimiento realizado fue el siguiente:

1. Se cerraron las válvulas de salida del biogás.
2. Se desconectaron los biodigestores del sistema y se abrieron.
3. Se midió el valor de pH de la mezcla.

4. Se añadieron las lentejas de NaOH necesarias hasta alcanzar un valor de pH comprendido en el rango óptimo.
5. Se midió de nuevo el pH.
6. Se cerraron los biodigestores.
7. Se hizo vacío a cada uno de ellos.
8. Se les inyectó de nuevo nitrógeno gas, eliminando a continuación su exceso.
9. Se agitaron e introdujeron en el baño termostático.
10. Se volvieron a conectar al sistema y se abrieron las válvulas.

El experimento en el set de biodigestores se repitió para corroborar resultados, realizándose una reactivación del sistema en cada experimento, dado que la segunda vez que los biodigestores dejaron de producir en cada uno de los sets se dieron por finalizados los ensayos.

La reactivación en el primer experimento tuvo lugar a los trece días tras haberse iniciado y a los seis días en el segundo.

En el segundo experimento el ajuste del pH se realizó antes dado que en el primero se esperó más de una semana para ver si el sistema volvía a producir por sí mismo, sin embargo, se compró que esto sólo ocurrió cuando se reajustó el pH. Por ello en el segundo experimento al sexto día de cesar la producción se decidió reactivar el sistema.

#### **4.1.6-Medida del volumen de biogás**

Para medir el volumen producido se utilizó como se comentó anteriormente una tira de papel milimetrado colocada en cada frasco de 1 L (frasco volumétrico) acoplado a cada biodigestor. Midiendo la altura de líquido desplazado por el gas (H) y conociendo el diámetro del frasco ( $D = 9,2 \text{ cm}$ ) se calculó la producción diaria de biogás según la ecuación [4.1].

$$V = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times H \quad [4.1]$$

La medida del volumen se realizó todos los días de lunes a viernes aproximadamente a la misma hora, pues los fines de semana no se tenía acceso al laboratorio.

Los frascos volumétricos se mantenían llenos con una disolución de ácido clorhídrico de pH=2 para desplazar el equilibrio  $\text{CO}_2 \leftrightarrow \text{HCO}_3^-$  hacia la izquierda y evitar por tanto la disolución del  $\text{CO}_2$  del biogás en la mezcla.

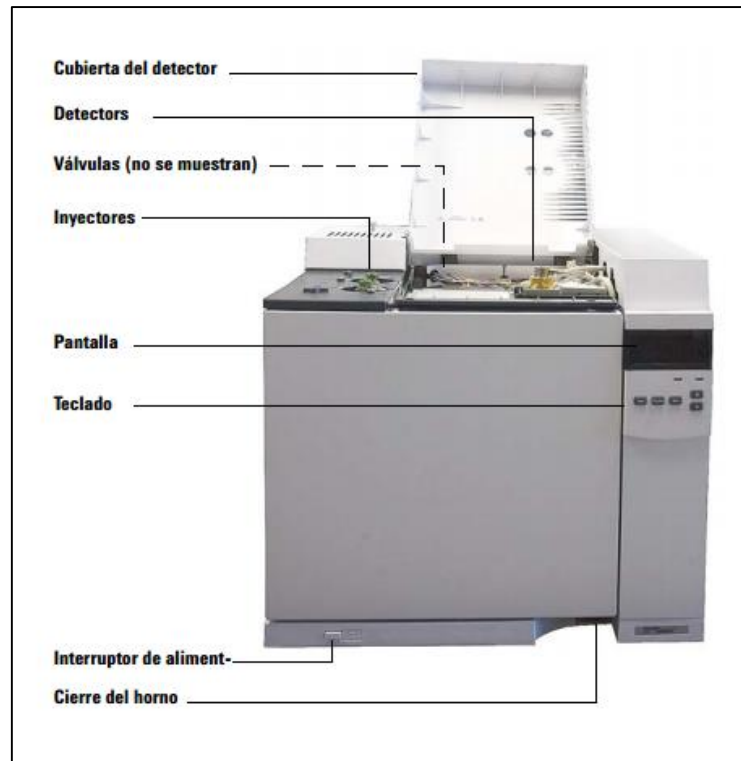
#### **4.1.7-Análisis de la composición del biogás producido**

Como se comentó en el apartado 2.2.3 de esta memoria, la composición del biogás suele ser, aproximadamente, de un 55-65% de metano y un 45-35% de dióxido de carbono.

La composición del biogás obtenido en el set de biodigestores se analizó en un cromatógrafo de gases (Agilent, 7820A) acoplado a un PC, adquiridos ambos en la línea de investigación para analizar el biogás procedente de digestiones anaerobias y procesar los datos correspondientes.

La peculiaridad de este cromatógrafo es poseer dos columnas en serie específicas para la detección de los componentes principales del biogás. Una imagen del cromatógrafo se muestra en la Figura 4.2, en la que además se indican las distintas partes del mismo.

El punto de la toma de muestra del biogás, en cada biodigestor, estaba compuesto por un accesorio T, una punta de pipeta y un septum para evitar el escape del mismo. El volumen de la muestra de biogás se tomaba empleando una jeringa de gases de 1 mL aunque solo la mitad se inyectaba al cromatógrafo.



**Figura 4.2. Vista frontal del cromatógrafo de gases.**

#### **4.1.8- Estudio de los sólidos totales, fijos y volátiles**

Las mezclas de materias primas de los biodigestores fueron sometidas a un análisis de sólidos al inicio y al final de los experimentos para determinar los sólidos totales, fijos y volátiles que contenían, dado que como se comentó en la introducción de esta memoria, estos parámetros pueden informar de la materia orgánica con posibilidades de ser transformada en biogás.

El procedimiento que se siguió para realizar el análisis fue:

1. Se pesaron las cápsulas donde se iban a colocar las muestras (A).
2. Se pesó 1g de muestra (PM), que en nuestro caso al ser una mezcla cuyas proporciones eran conocidas, se pudo calcular la cantidad de cada materia prima necesaria para hacer el análisis.
3. Se colocó el gramo de muestra de cada mezcla en la cápsula correspondiente y correctamente identificada.



4. Se introdujeron las cápsulas en la estufa durante veinticuatro horas a una temperatura de 100°C. Con este paso se consiguió eliminar la humedad de la muestra.
5. Se sacaron las cápsulas de la estufa y se pesaron (B).
6. Una vez pesadas se introdujeron en la mufla durante una hora a 550°C. Con esta operación se consiguió eliminar los sólidos volátiles de la muestra, quedando los sólidos fijos retenidos en la cápsula.
7. Pasada una hora, se retiraron las cápsulas de la mufla y se pesaron (C).

Aplicando las ecuaciones [4.2], [4.3] y [4.4] se calcularon los sólidos totales (ST), fijos (SF) y volátiles (SV). Los sólidos fijos y volátiles son un porcentaje de los sólidos totales, por lo que la suma de ambos debe ser igual al 100%.

$$\% ST = \frac{B - A}{PM} \times 100 \quad [4.2]$$

$$\% SF = \frac{C - A}{B - A} \times 100 \quad [4.3]$$

$$\% SV = \frac{B - C}{B - A} \times 100 \quad [4.4]$$

Donde:

A = peso de la cápsula vacía (g).

B = peso de la cápsula con la muestra después de haberla colocado en una estufa a 105°C durante veinticuatro horas (g).

C = peso de la cápsula con la muestra tras su colocación en una mufla a 550°C durante una hora (g).

PM = peso de la muestra de sólido (g).

## 4.2- Biodigestor con control continuo de pH

La segunda parte de este trabajo que aquí se presenta consistió en estudiar la influencia del control continuo de pH en la producción y composición del biogás. Se utilizó la mezcla de residuos que dio lugar a una mayor producción de biogás en los ensayos de fermentación anaerobia realizados en el set de biodigestores, que fue la correspondiente a plátano-tomate-glicerina. Un esquema del biodigestor donde se llevaron a cabo los experimentos se muestra en la Figura 4.3.

La técnica experimental en este segundo estudio se aborda de forma similar a la realizada anteriormente. Así se explica en primer lugar el digestor o reactor utilizado donde se lleva a cabo el control continuo del pH, y a continuación, las materias primas y productos químicos empleados, para finalizar con el procedimiento experimental llevado a cabo.

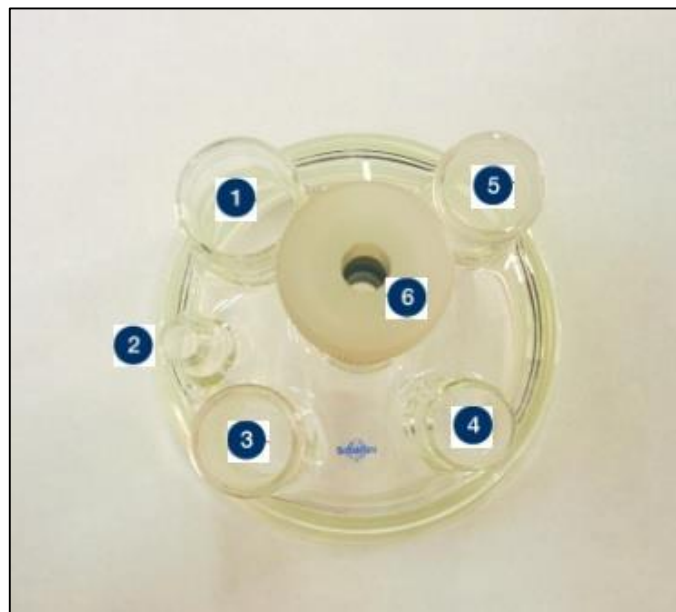


*Figura 4.3. Biodigestor con control continuo de pH*

El reactor o biodigestor consiste en un recipiente de tres litros de volumen, encamisado para permitir la circulación de agua a una temperatura constante, y un cabezal con seis bocas esmeriladas de diferentes diámetros. La camisa del

reactor tiene un orificio por la parte superior por donde entra el agua o fluido calefactor y sale por su parte inferior. Además, el reactor dispone de una purga en su base para poder reducir el volumen del reactor en caso de emergencia o vaciarlo al finalizar el experimento. Como se observa en la Figura 4.3 el biodigestor estaba sujeto a una estructura fija para asegurar la inmovilidad del mismo.

En la Figura 4.4 se muestra una fotografía del cabezal del reactor con los seis orificios numerados, donde se colocaron los distintos accesorios o instrumentos señalados a continuación.



**Figura 4.4. Tapa del reactor**

Siendo:

1. Electrodo de pH.
2. Accesorio T, con toma de muestra y bifurcación para medida de volumen.
3. Conexión regulada por una válvula para hacer vacío e inyectar  $N_2$ .
4. Termómetro.
5. Conexión para añadir la disolución de NaOH.
6. Orificio para la varilla del agitador.

#### **4.2.1- Materias primas**

Para este estudio los plátanos y tomates también se adquirieron en un estado de maduración avanzada en un establecimiento de la zona. Los residuos de glicerina procedían, al igual que en el caso anterior, del proceso de obtención de biodiesel realizado por los compañeros del laboratorio.

Los productos químicos utilizados para proporcionar los nutrientes necesarios al proceso, así como para alcanzar las condiciones óptimas de pH en el reactor, fueron los mismos que los descritos en el apartado 4.1.1 de esta memoria.

#### **4.2.2- Material de laboratorio**

A continuación, se lista el material de laboratorio utilizado:

- Reactor encamisado
- Baño termostático
- Electrodo de pH y medidor de pH
- Termómetro
- Jeringa para líquidos de 10 mL
- Jeringa para gases de 1 mL
- Bomba de impulsión de líquidos
- Medidor de volumen de gases (MilliGascounter)
- Conexiones y acoples correspondientes
- Material de vidrio tal como probetas, matraces kitasato...
- Crisoles de porcelana
- Estufa
- Mufla
- Bomba de vacío
- Cromatógrafo de gases, Agilent 7820A.

### 4.2.3- Preparación del biodigestor

La masa total de residuos que se estimó para este experimento teniendo en cuenta la capacidad del reactor fue de 414 g. A continuación, se calcularon las cantidades de plátano, tomate y glicerina que había que preparar dado que la composición de la mezcla mantenía las mismas proporciones que en los ensayos anteriores (60% Plátano-20% Tomate-20% Glicerina). La masa de cada residuo (*Tabla 4.4*), así como la de los productos químicos se calculó a partir de las relaciones de la *Tabla 4.2*.

**Tabla 4.4. Cantidad de materias primas en el reactor**

Residuo	Masa (g)
Plátano	248,4
Tomate	82,8
Glicerina	82,8

A continuación, se procedió al corte de los plátanos y tomates en trozos pequeños, de aproximadamente uno o dos centímetros, para facilitar su introducción en el digestor.

Se añadieron al reactor las cantidades de residuos calculadas, junto con 2 litros de agua destilada, 38,1 g de  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , 3,7 g de  $\text{CaCO}_3$  y 69 mL de disolución buffer de  $\text{PO}_4^{3-}$ .

Seguidamente se introdujo la varilla del agitador por el orificio correspondiente y se colocó el cabezal, ajustado adecuadamente para evitar fugas del biogás. El resto de instrumentos fueron colocados en su correspondiente orificio, comprobándose que el electrodo de pH estuviese bien sumergido en la mezcla. De la misma forma se comprobó que el termómetro estuviese en contacto con la mezcla para conocer así su temperatura en cada momento. Por el orificio número 2 se instaló la toma de muestra de gas que a su vez estaba conectada al medidor de volumen a través de una bifurcación regulada por una válvula. La disolución de NaOH en caso de una disminución del pH, se inyectaba a través de la conexión situada en la boca número 5 del digestor. La disolución era impulsada mediante una bomba situada junto al recipiente que la contenía. En la boca

número 3 se instaló una conexión acoplada a una válvula, que serviría para inyectar cualquier producto químico, un ácido o una base, en caso de emergencia por una variación importante del pH en el medio, y mantener así las condiciones adecuadas en el reactor. Finalmente se conectó el medidor de volumen de gases al digestor a través de la bifurcación colocada en el orificio número 2.

A continuación, se cerraron todas las válvulas y se procedió a crear las condiciones anaerobias necesarias para la fermentación. Para ello se conectó la bomba de vacío al digestor a través de la conexión situada en el orificio número 3, regulada mediante una válvula. Como se ha comentado, una vez eliminado prácticamente todo el aire, se inyectó nitrógeno como gas inerte. Por último, para llevar el reactor hasta la presión atmosférica, y evitar sobrepresión en el interior del mismo, se abrió una de las válvulas y se dejó escapar rápidamente el exceso de N<sub>2</sub>.

El valor del pH fue monitorizado a través un medidor conectado a un controlador, el cual se programó para adicionar la disolución de NaOH de forma automática cuando el valor de pH fuera inferior a 7,0 unidades. Los valores de pH y de temperatura quedaban registrados cada 10 minutos en el ordenador mediante un software específico.

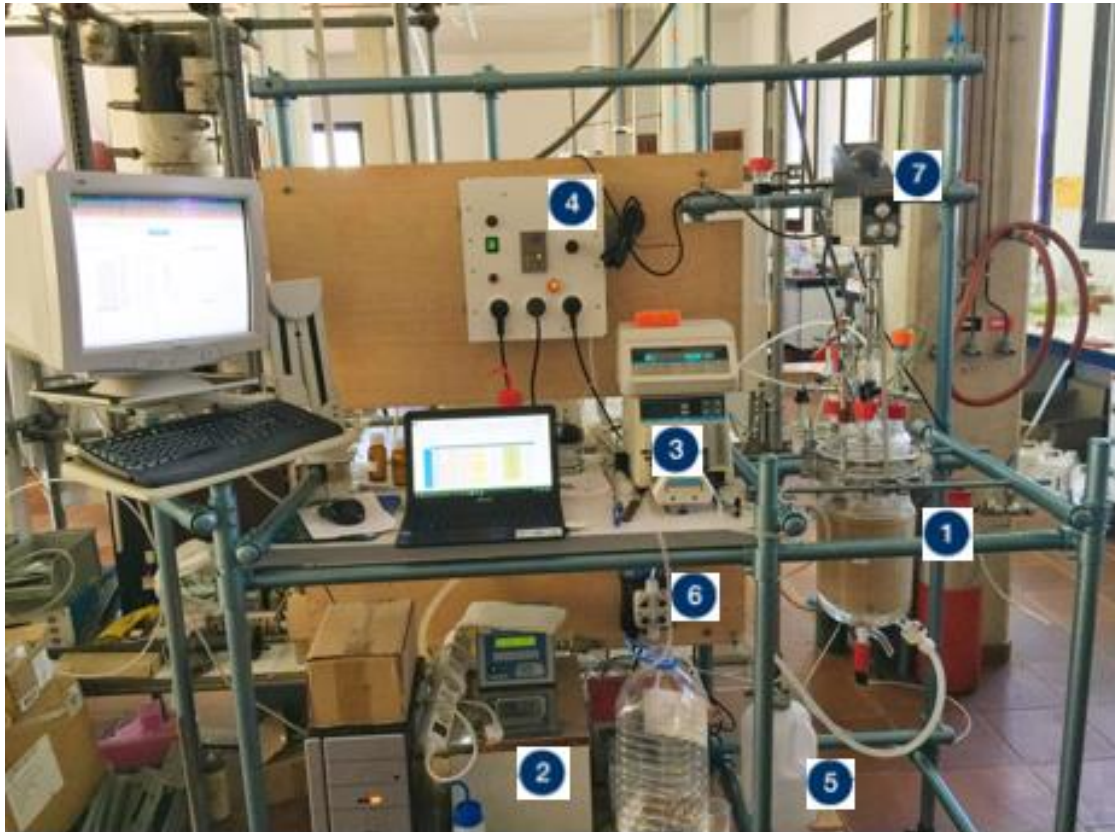
La temperatura del baño termostático se fijó en el valor adecuado para controlar la temperatura interna del digestor en los 31,5°C, correspondiente al rango mesofílico.

Finalmente se abrieron las válvulas y se dio por iniciado el experimento.

En la Figura 4.5 se presenta una imagen completa de la instalación donde se llevaron a cabo los ensayos, siendo:

1. Reactor encamisado.
2. Baño termostático.
3. Monitor de temperatura.
4. Monitor y controlador de pH.

5. Depósito de la disolución de NaOH.
6. Bomba de impulsión.
7. Agitador.



*Figura 4.5. Esquema de la instalación*

#### 4.2.4- Agitación

Como se describe en el apartado 2.2.3.2 de esta memoria, una correcta agitación de la mezcla favorece la producción de biogás, principalmente por las siguientes razones:

- Por una distribución uniforme de la temperatura y de la mezcla de residuos en el interior del biodigestor.
- Por una distribución uniforme de los productos, tanto intermedios como finales.

- Por un contacto óptimo entre la mezcla y las bacterias, evitando la formación de cúmulos alrededor de las bacterias.
- Porque evita la acumulación de lodo o espuma en la parte superior del digestor que dificulta la salida del biogás.

El agitador utilizado fue un agitador tipo ancla como se muestra en la *Figura 4.6*:



*Figura 4.6. Agitador tipo ancla*

Estos agitadores, según la bibliografía consultada, son adecuados para evitar el depósito de sólidos sobre una superficie de transmisión de calor tal como ocurre en los tanques encamisados, pero no son demasiado eficaces en cuanto al grado de mezcla.

#### **4.2.5- Control de volumen**

El control de volumen se llevó a cabo con un medidor de gases de la casa alemana Ritter, MilliGascounter. El MilliGascounter está diseñado para la medición de pequeñas cantidades de gas con velocidades de flujo muy bajas.



Es adecuado para medir gases inertes e incluso algo agresivos, en particular, los que se encuentran en la tecnología de biogás o de detección de fugas.

Un esquema detallado del instrumento se muestra en la Figura 4.7, cuyo funcionamiento se describe a continuación:



*Figura 4.7. Medidor de volumen de gas Ritter*

El gas a medir fluye por la boquilla de entrada de gas, a través del tubo micro capilar situado en la base del medidor hasta la carcasa que se rellena con un líquido preparado de fábrica. El gas se eleva en forma de pequeñas burbujas a través del líquido, que entran en una célula de medición. La célula de medición se compone de dos cámaras, que se llenan alternativamente con las burbujas de gas ascendentes. Cuando se llena una cámara de medición, la célula de medición vuelca abruptamente y queda en una posición tal que la segunda cámara de medida comienza a llenarse vaciándose la primera. La medición del volumen de gas, por lo tanto, se produce en pasos discretos contando las inclinaciones de la célula de medición con una resolución de aproximadamente

3,26 ml. Finalmente, el gas medido escapa a través de la boquilla de salida de gas.

El volumen que marcaba el contador era registrado a la misma hora todos los días laborables para llevar el control diario de producción.

#### **4.2.6- Control de pH**

El control de pH, tal como se indicó anteriormente, se llevó a cabo utilizando el electrodo de pH conectado a un controlador encargado de inyectar la disolución de NaOH de forma automática si el pH del sistema disminuía por debajo del punto de consigna, establecido en el valor de 7 unidades de pH. La adición del producto químico se realizó a través de una conducción colocada en uno de los orificios del cabezal del reactor como se explicó anteriormente.

Se preparó una disolución de hidróxido sódico suficientemente concentrada como para que no fuera necesario añadir mucha cantidad y evitar así aumentar el volumen de líquido en el reactor, lo que podría causar problemas de capacidad a largo plazo. La disolución era impulsada al reactor mediante una bomba colocada junto al recipiente que la contenía.

Se prepararon 2,5 litros de una disolución de hidróxido sódico 6M, para lo que se disolvieron 600 g de NaOH en forma de lentejas en un volumen de 2,5 L de agua destilada.

#### **4.2.7- Control de temperatura**

Otra de las variables controladas del sistema fue la temperatura interna del digestor. Ésta debía mantenerse constante alrededor de 31,5 °C para estar dentro del rango de mesofílico y que las bacterias metanogénicas pudieran descomponer la materia orgánica adecuadamente.

Para ello, el reactor contaba con una camisa por la que circulaba el agua caliente transfiriendo calor a la mezcla del interior del mismo. El agua caliente, impulsada por la bomba del baño termostático entraba por la parte superior de la camisa y salía a menor temperatura por la parte inferior, tal como se muestra en la *Figura 4.8*. El agua regresaba al baño termostático donde gracias a la resistencia

térmica con la que estaba equipado se elevaba de nuevo su temperatura para mantener constante la temperatura del reactor (ciclo cerrado).

La medida de temperatura se seguía permanentemente a través del termómetro colocado en uno de los orificios del cabezal del biodigestor como se ha comentado anteriormente.



*Figura 4.8. Sistema de calefacción con agua en el reactor*

Siendo

- 1- Entrada del fluido calefactor (agua).
- 2- Salida del fluido calefactor (agua).

#### **4.2.8- Análisis del biogás producido**

El análisis del biogás obtenido en este estudio, se determinó empleando un cromatógrafo de gases mostrado en la *Figura 4.2* cuyo funcionamiento se explicó en el apartado 2.2.3 de esta memoria.

De igual manera que se hizo para el primer estudio, el análisis del biogás producido se realizó diariamente tomando muestras con una jeringa de gases con la que se extraía 1 mL de gas. De este mL sólo la mitad era introducido en el cromatógrafo de gases, que tras cinco minutos proporcionaba los datos de composición del biogás inyectado ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$  y  $CO_2$  principalmente).

El biogás se extraía a través de la toma de muestra colocada en el orificio 2 del cabezal del reactor, tal como se comentó anteriormente.

#### **4.2.9- Estudio de los sólidos totales, fijos y volátiles**

El análisis de sólidos totales, fijos y volátiles para esta segunda parte del proyecto se llevó a cabo siguiendo el mismo procedimiento que para los ensayos en los biodigestores tal y como se describió en el apartado 4.1.8 de esta memoria.

## **5- RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

---

En este trabajo se ha estudiado la posibilidad de utilizar residuos de plátano, tomate y procedentes de la obtención de biodiesel, tales como pulpa de *Jatropha Curcas* y restos de glicerina, como materias primas para obtener biogás.

Se ha estudiado la producción y la calidad del biogás a partir de residuos de plátano (P), de tomate (T), de pulpa de *Jatropha Curcas* (J) y glicerina (G) realizando experimentos de fermentación anaeróbica en un set de digestores formado por ocho unidades. Las mezclas utilizadas con estos residuos se han comentado en el apartado 4.1.4 de esta memoria. Además, se ha analizado la influencia del tipo de mezcla utilizada sobre el volumen de biogás producido y su composición.

Con el objetivo de comprobar el posible aumento de la producción de biogás controlando el pH, en ambos experimentos se ajustó el pH inicial con NaOH,  $\text{CaCO}_3$  y una disolución buffer de  $\text{PO}_4^{3-}$  a un valor de 7 unidades de pH. Una vez los sistemas dejaron de producir, se reajustó el pH empleando NaOH. La duración de estos experimentos alcanzó los veintiún días, tal como muestran en los resultados obtenidos.

Los resultados de los experimentos anteriores condujeron al estudio de la influencia del control continuo de pH sobre la producción de biogás en un reactor mezcla perfecta, realizando para ello dos ensayos de fermentación anaeróbica que se diferenciaron en el medio de reacción utilizado, ya que el que se llevó a cabo en segundo lugar empleó el líquido estabilizado resultante del primero, con el objetivo de analizar su efecto sobre la producción y composición del biogás. La mezcla de residuos utilizada para ambos experimentos, dado que fue la que dio lugar a una mayor producción en el set de biodigestores, fue la mezcla de plátano, tomate y glicerina. En ambos ensayos, cuando el pH descendía por debajo de 7 unidades se realizaba una inyección automática de NaOH, manteniendo así en todo el periodo de los ensayos, el valor de pH dentro del rango óptimo establecido.

### **5.1- Estudio de la influencia de las diferentes mezclas de residuos sobre la producción de biogás**

En el apartado 4.1 de esta memoria se describió el set de digestores y el procedimiento experimental donde se llevaron a cabo los dos ensayos de fermentación anaeróbica realizados empleando las distintas mezclas de residuos. En el Anexo I se presentan los resultados de producción del biogás para cada una de las mezclas utilizadas, así como sus valores medios.

Durante la realización del primer experimento se observó que a partir del tercer día desde su inicio la producción se detuvo, decidiéndose esperar unos días para ver si el sistema se reactivaba por sí mismo; sin embargo, como esto no ocurrió, fue necesario reactivarlo de nuevo. Teniendo en cuenta que tras la reactivación en el primer experimento no se observó una producción de gas significativa, en el segundo experimento se tomó la decisión de reactivarlo mucho antes que en el anterior. Por este motivo el reajuste de pH en el primer experimento se realizó a los trece días desde su inicio, mientras que en el segundo se efectuó a los seis días. Sin embargo, desde el punto de vista matemático para analizar los resultados obtenidos se consideró que la reactivación se realizó en ambos casos a los trece días.

A continuación, se exponen por separado los resultados obtenidos hasta el momento en que se ajustó el pH, y posteriormente, los resultados obtenidos una vez reactivado el sistema. Cabe decir que la producción después del ajuste se han contabilizó desde cero, de forma que para conocer el valor de producción de cualquier día posterior a la reactivación hay que sumarle el valor final obtenido antes de reactivar.

Las mezclas empleadas con su composición e identificación se presentan en la *Tabla 5.1*.

**Tabla 5.1. Mezclas de residuos empleadas.**

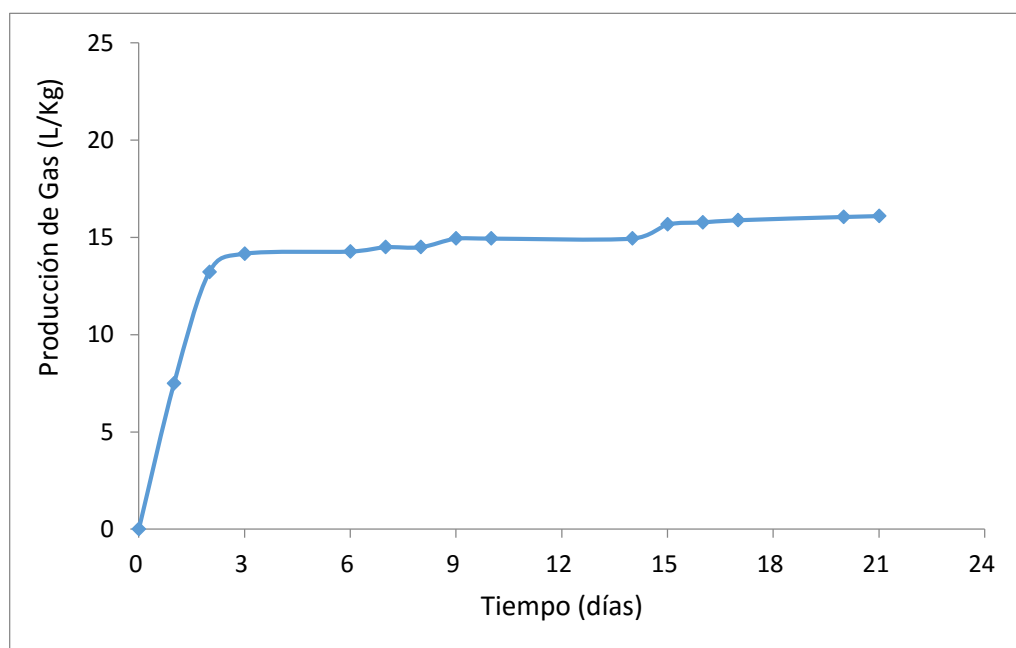
Mezclas de residuos	Identificación
60% Plátano - 40% Tomate	P-T
60% Plátano - 20% Tomate - 20% Glicerina	P-T-G
60% Plátano - 40% Jatropha	P-J
60% Plátano - 20% Jatropha - 20% Glicerina	P-J-G

### 5.1.1- Mezcla de plátano y tomate (P-T)

En este apartado se presentan e interpretan los resultados medios correspondientes a los dos experimentos realizados para la mezcla binaria de residuos plátanos y tomates al 60% y 40% respectivamente (P-T). La producción obtenida se expresó como volumen específico,  $V_e$ , en litros de biogás por kilogramo de mezcla de residuos utilizados, que se contabilizó diariamente los días laborables durante veintiún días (*Tabla A1.1* del Anexo I).

La reactivación de las mezclas se realizó con lentejas de NaOH, según el procedimiento explicado en el apartado 4.1.5 de esta memoria, tras observarse un volumen acumulado de gas constante en los biodigestores.

En la *Figura 5.1* se representa la producción media de gas para la mezcla plátano-tomate frente al tiempo, observándose que es en los tres primeros días cuando se produce la mayor cantidad de biogás para luego reducirse drásticamente.



**Figura 5.1. Producción media de biogás. Mezcla de P-T**

También se puede observar el efecto de la reactivación del sistema (en forma de pequeñas variaciones), que en el primer experimento tuvo lugar tras los trece primeros días desde su inicio y al sexto día en el segundo.



A continuación, se analizan los resultados por separado correspondientes al antes y después del ajuste de pH.

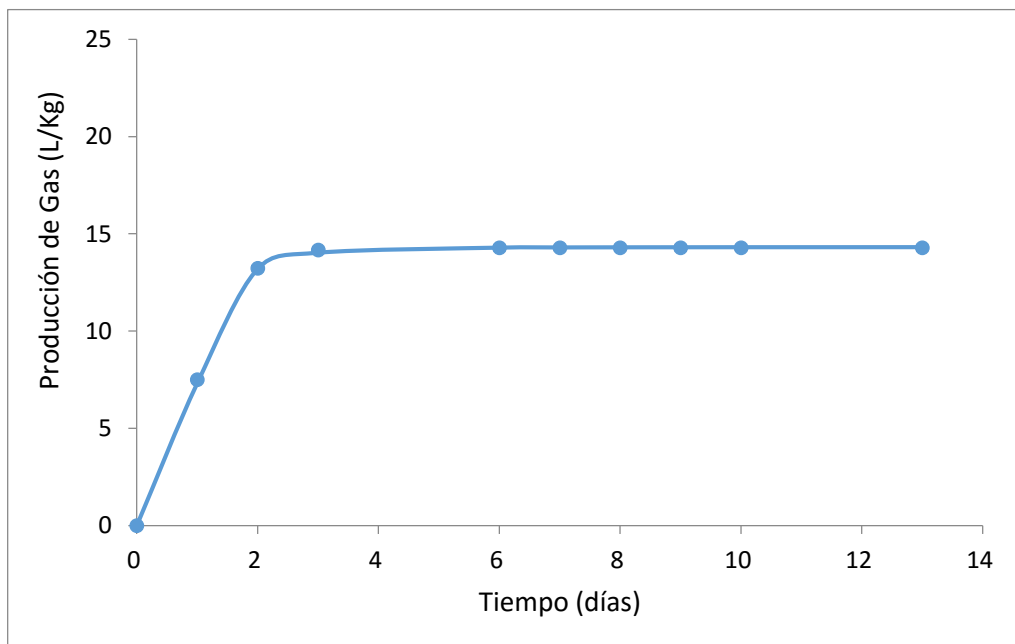
#### a) Antes del ajuste de pH

En la *Tabla 5.2* se presentan los datos de los valores del pH en el momento inicial y justo antes de reactivar los sistemas para cada uno de los experimentos realizados. Por otro lado, los valores medios de producción de biogás durante los primeros trece días se representan en la *Figura 5.2*.

**Tabla 5.2. Valor de pH. Mezcla P-T**

Experimento	pH	
	Inicio	Antes de reactivar
1	7,53	3,49
2	8,50	4,24

Como se explicó en la técnica experimental los valores iniciales de pH se alcanzaron mediante la adición de los productos alcalinos comentados.



**Figura 5.2. Predicción de la producción de biogás según la ecuación 5.1. Comparación con datos experimentales. Mezcla P-T**

Tal como se observa en la *Tabla 5.2* los valores de pH justo antes de reactivar los sistemas descendieron hasta valores en torno a 3,5 unidades de pH por lo

que se justifica claramente el cese de la producción de gas observada en la *Figura 5.2*. Está demostrado que el proceso anaeróbico es altamente sensible a variaciones de pH fuera del rango óptimo establecido ( $7,5 < \text{pH} < 8,5$ ).

La producción de biogás a partir de esta mezcla de residuos, en términos de volumen específico (L/kg) se ha correlacionado con el tiempo (días) mediante una ecuación del siguiente tipo:

$$V_e = \frac{a}{1 + b't^c} \quad [5.1]$$

Los valores de los coeficientes a, b' y c se recogen en la *Tabla 5.3*.

**Tabla 5.3. Coeficientes ecuación [5.1]. Mezcla P-T**

Coeficientes	Valor
a	14,323
b'	0,958
c	-3,495

En la *Figura 5.2* también se muestra en trazo continuo la producción de biogás calculada según la ecuación [5.1] observándose un excelente ajuste con un error inferior del 1%, por lo que las barras de error no se aprecian en el gráfico. En este caso la producción de biogás alcanza un volumen específico medio constante e igual a 14,3 L/kg.

#### b) Después del ajuste de pH

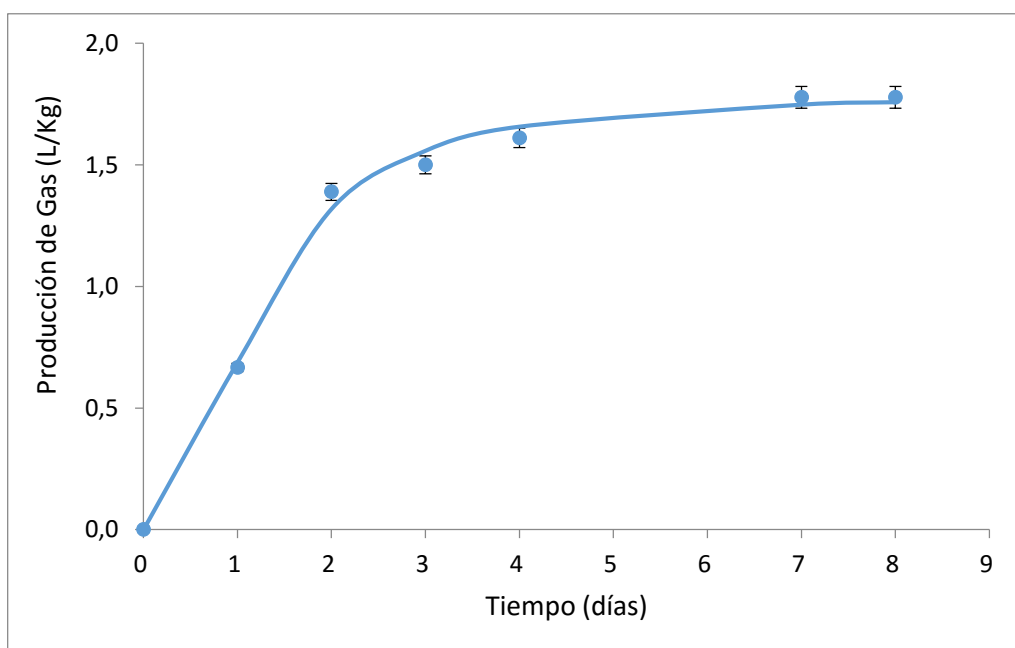
Siguiendo el modelo anterior de presentación de resultados, en la *Tabla 5.4* se muestran los valores del pH tras reactivar los sistemas (para cuyo reajuste fueron necesarias siete lentejas de hidróxido sódico), así como los valores finales para cada uno de los experimentos realizados con la mezcla de residuos de plátanos y tomates.

Se observa que en este caso que los valores finales de pH no descendieron tanto como ocurrió en la primera parte de los experimentos, pues el valor mínimo llegó a 5,9 unidades de pH.

**Tabla 5.4. Valores de pH. Mezcla P-T**

Experimento	pH	
	Tras reactivar	Final
1	8,18	5,87
2	8,15	6,53

Los resultados medios de la producción de biogás a partir del día trece, día en el que se reajustó el pH, hasta el día veintiuno, día en el que se dio por finalizado cada uno de los experimentos, se representan frente al tiempo en la *Figura 5.3*.



**Figura 5.3. Predicción de la producción de biogás según la ecuación 5.2. Comparación con datos experimentales. Mezcla P-T**

Se puede observar que en esta segunda parte del experimento el sistema se comporta según lo esperado pues en los tres primeros días se produce un aumento de producción casi exponencial para luego dejar prácticamente de producir. Se podría haber intentado reactivar una segunda vez el sistema, pero se decidió no hacerlo dado que la producción de biogás en esta segunda parte sólo alcanzó 1,8 litros por kilogramo de mezcla de residuos frente a los 14,3 recogidos en la primera parte del ensayo, es decir, un aumento aproximado en torno al 11%. Se consideró prácticamente inviable desde un punto de vista económico la reactivación del sistema.

Para esta segunda parte del experimento los datos medios de la producción de biogás para la mezcla P-T se han correlacionado con el tiempo mediante una ecuación del tipo [5.1], obteniéndose:

$$V_e = \frac{1,789}{1 + 1,601t^{-2,166}} \quad [5.2]$$

Los resultados de producción calculados según esta ecuación se representan junto con los datos experimentales en trazo continuo en la *Figura 5.3*, presentando un error inferior al 2,5 % tal como muestran las barras de error.

La producción total de biogás como resultado de la suma las producciones finales correspondientes al antes y después de reactivar conducen a un total de 16 litros de biogás por kg de mezcla de residuos utilizados.

### **5.1.2- Mezcla de plátano, tomate y glicerina (P-T-G)**

Con el objeto de evaluar el posible efecto en la producción de biogás del subproducto obtenido en la fabricación de biodiesel, la glicerina, se estudió la fermentación anaeróbica de la mezcla ternaria formada por los residuos de plátano, tomate y glicerina en porcentaje de 60%-20%-20% respectivamente.

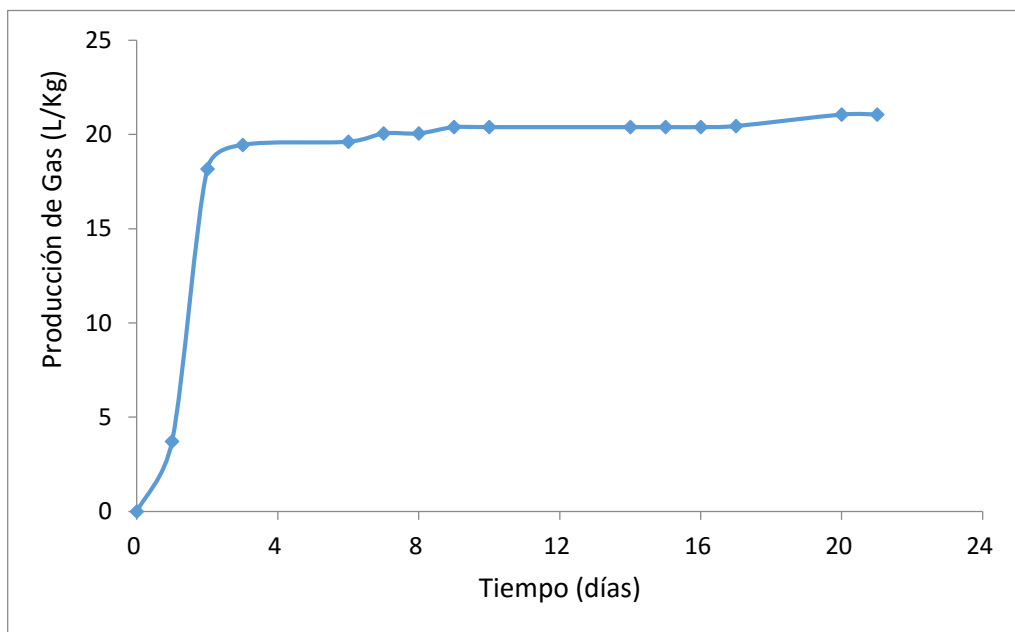
La producción de biogás obtenida, expresada como volumen específico,  $V_e$ , en litros de biogás por kilogramo de mezcla de residuos utilizados, se contabilizó diariamente todos los días laborables durante las tres semanas de duración (*Tabla A1.2* del Anexo I).

La reactivación de las mezclas se realizó con lentejas de NaOH, según el procedimiento explicado en el apartado 4.1.5 de esta memoria tras varios días sin producir biogás. Como se comentó anteriormente tuvo lugar los días decimotercero y sexto para el primer y segundo experimento respectivamente.

En la *Figura 5.4* se representa la variación del volumen específico medio de gas para la mezcla plátano-tomate-glicerina frente al tiempo, observándose que es en los tres primeros días cuando se produce la mayor cantidad de biogás para luego reducirse rápidamente.

Aunque en un apartado más adelante se realizará la comparación de resultados para las distintas mezclas de residuos ensayadas, cabe resaltar aquí la diferencia de producción de biogás que genera esta mezcla respecto a la anterior de plátano y tomate, obteniéndose en este caso una producción final de 21,1 litros de biogás por kilogramo de mezcla de residuos, lo que se traduce en un aumento de producción del 31%.

En esta figura también puede observarse el ligero efecto de la reactivación del sistema (en forma de pequeñas variaciones), que al igual que en el caso de mezcla anterior se realizó tras los trece primeros días desde el inicio en el primer ensayo y al sexto día en el segundo.



**Figura 5.4. Producción media de biogás. Mezcla P-T-G**

A continuación, se presentan y analizan los resultados de producción obtenidos antes y después de reactivar el sistema.

#### a) Antes del ajuste de pH

En la *Tabla 5.5* se presentan los valores del pH en el momento inicial de los ensayos y justo antes de reactivar los sistemas para cada uno de los experimentos realizados.

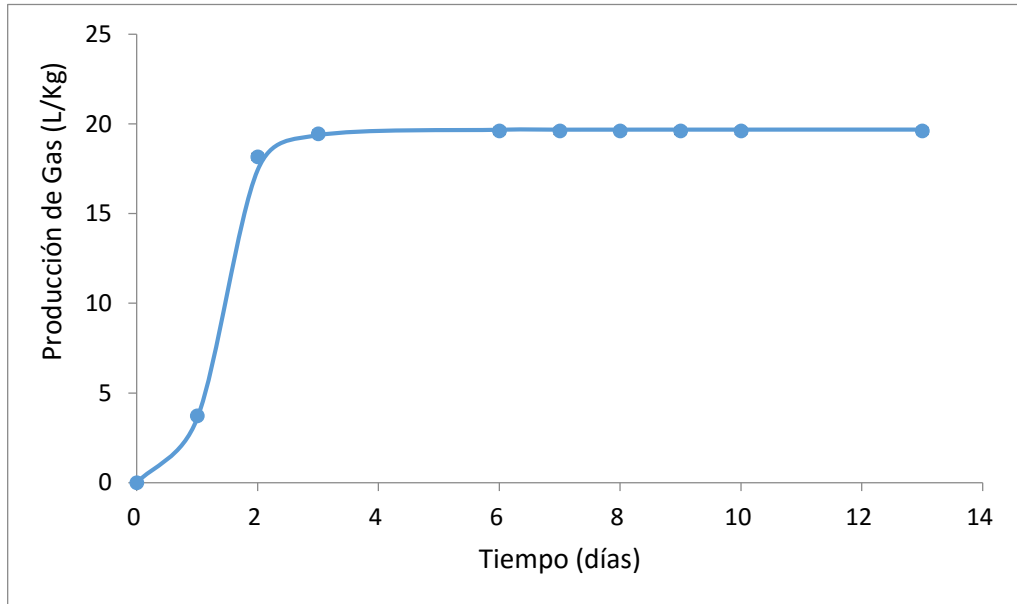
**Tabla 5.5. Valores de pH. Mezcla P-T-G**

Experimento	pH	
	Inicio	Antes de reactivar
1	7,70	3,81
2	7,91	4,42

En esta tabla se observa el descenso brusco de pH justo antes de reactivar los sistemas, por lo cual se justifica el cese de la producción de biogás que se visualiza en la *Figura 5.5*, en la que se han representado los valores medios de la producción del biogás frente al tiempo y que se han correlacionado con una ecuación del tipo [5.1] obteniéndose:

$$V_e = \frac{19,681}{1 + 4,486t^{-5,118}} \quad [5.3]$$

Asimismo, en la *Figura 5.5* se representan los valores calculados según esta ecuación, en trazo continuo, y se comparan con los datos experimentales, observándose un excelente ajuste con un error inferior al 1%.



**Figura 5.5. Predicción de la producción de biogás según la ecuación 5.3. Comparación con datos experimentales. Mezcla P-T-G**

Como se puede observar la producción media final, en esta primera parte de los ensayos, ascendió a 19,6 litros por kilogramo de mezcla de residuos de plátano, tomate y glicerina.

b) Después del ajuste de pH

Los valores del pH tras reactivar los sistemas (para lo cual se usó NaOH en escamas), así como los valores finales para cada uno de los experimentos realizados con la mezcla de plátano, tomate y glicerina, se recogen en la *Tabla 5.6*.

**Tabla 5.6. Valores de pH. Mezcla P-T-G**

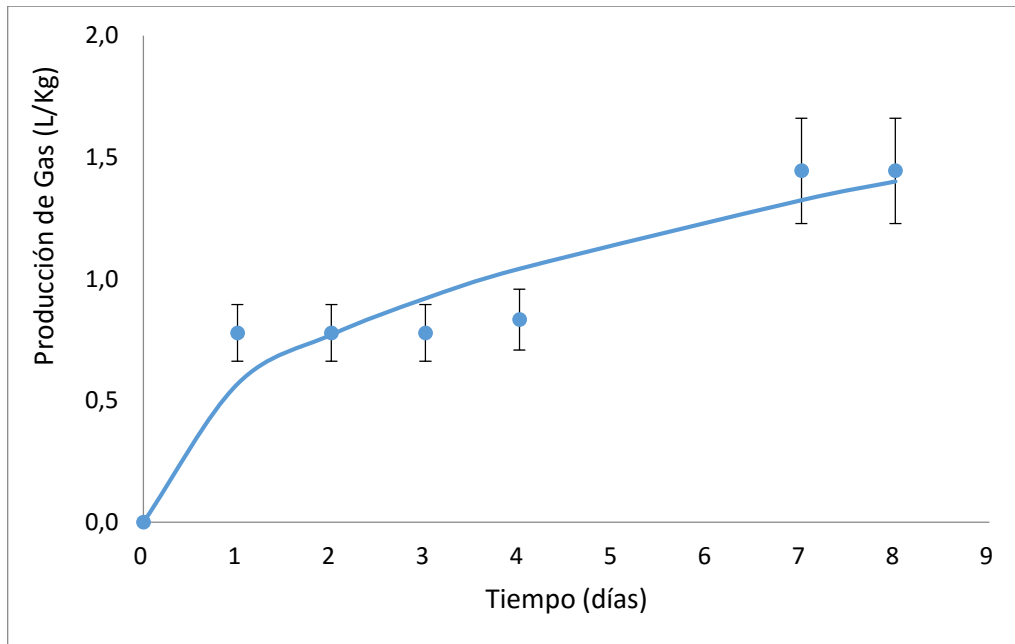
Experimento	pH	
	Tras reactivar	Final
1	8,19	6,75
2	8,32	6,02

Al igual que lo ocurrido en la mezcla binaria, en esta segunda parte de los ensayos el descenso de pH no fue tan brusco, tal como se observa en la tabla anterior.

La variación de la producción de biogás en esta segunda parte del ensayo se representa frente al tiempo en la *Figura 5.6*. Esta producción real de biogás no parece estar acorde con los resultados finales de pH de la *Tabla 5.6*, lo que podría indicar que la población microbiana no se haya desinhibido al completo por el brusco descenso de pH correspondiente a la etapa anterior, o bien por una carencia de macro y micronutrientes.

El volumen específico medio de biogás producido en este caso, se ha correlacionado con el tiempo mediante una ecuación del mismo tipo que las anteriores (ec. [5.1]) obteniéndose:

$$V_e = \frac{19,919}{1 + 34,068t^{-0,455}} \quad [5.4]$$



**Figura 5.6. Predicción de la producción de biogás según la ecuación 5.4. Comparación con datos experimentales. Mezcla P-T-G**

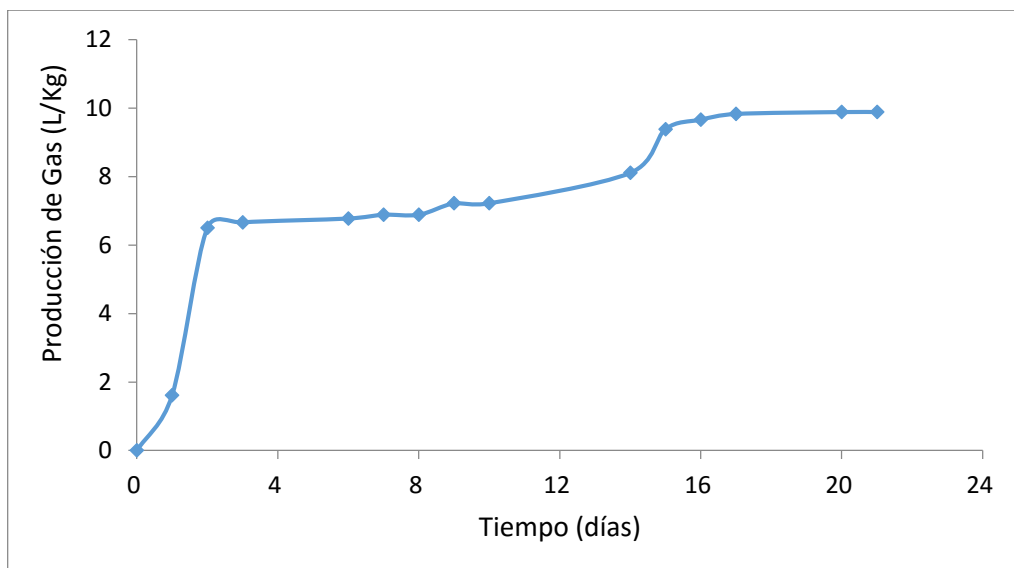
Los valores de producción calculados según esta ecuación se representan frente al tiempo en trazo continuo y se comparan con a los datos experimentales en la Figura 5.6, con un error ligeramente superior al 10%.

Como se puede observar el volumen específico medio de biogás producido aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor constante de 1,4 L/kg, obteniéndose un volumen específico total de 21 L/kg al finalizar el experimento. Esto se traduce en un aumento de producción de aproximadamente el 7% respecto a la producción total.

### 5.1.3- Mezcla de plátano y jatropha (P-J)

Otra de las mezclas de residuos estudiadas fue la compuesta por plátanos y pulpa de *Jatropha Curcas*, subproducto de la obtención de biodiésel realizado por otros compañeros del laboratorio, en porcentaje de 60:40 como se muestra en la *Tabla 5.1*. La producción media obtenida se expresó tal como se ha comentado a través del volumen específico,  $V_e$ , en litros de biogás por kilogramo de mezcla de residuos, medida diariamente durante los veintiún días que duraron los experimentos (*Tabla A1.3* del Anexo I). Estos valores medios se representan frente al tiempo en la *Figura 5.7*.





**Figura 5.7. Producción media de biogás. Mezcla P-J**

En esta figura se observa al igual que en los casos anteriores que durante los tres primeros días se produce la mayor cantidad de biogás para luego reducirse ligeramente. Además, se aprecia el salto correspondiente a la reactivación del sistema, que como se ha comentado en el primer experimento tuvo lugar al decimotercer día desde su inicio, y al sexto día en el segundo.

Los resultados medios obtenidos antes y después del reajuste del pH del sistema se presentan por separado a continuación.

a) Antes del ajuste de pH

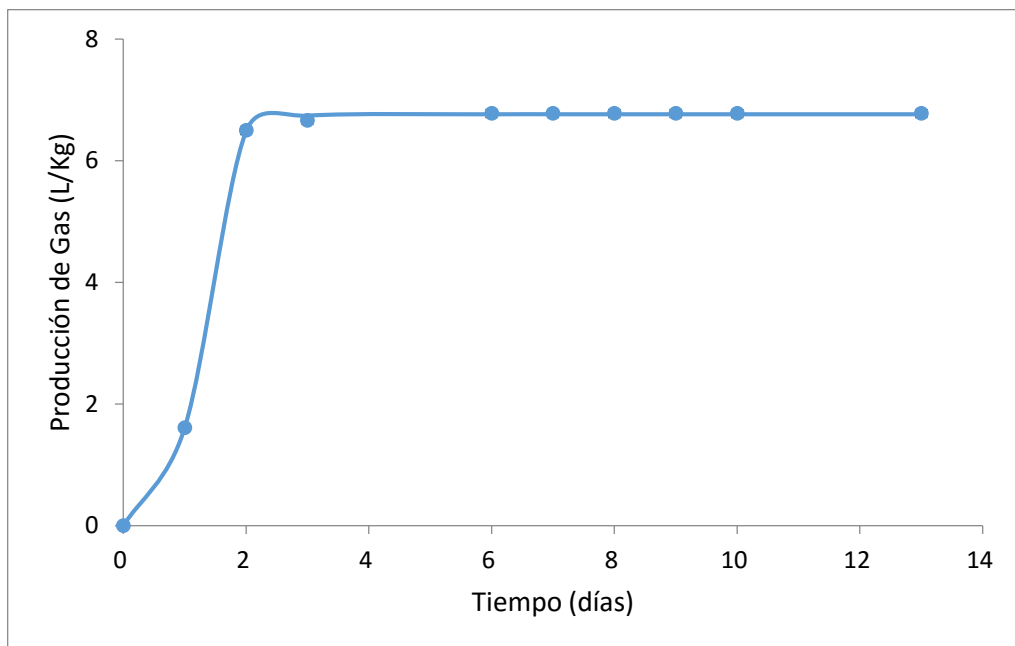
En la *Tabla 5.7* se muestran los valores del pH en el momento inicial y justo antes de reactivar los sistemas para cada uno de los experimentos ensayados.

**Tabla 5.7. Valores de pH. Mezcla P-J**

Experimento	pH	
	Inicio	Antes de reactivar
1	7,73	3,50
2	8,47	3,69

Los valores extremadamente bajos de pH correspondientes al momento de reactivar los sistemas, pueden justificar de alguna manera los resultados de producción de biogás obtenidos. Estos resultados (valores medios de la

producción), se representan frente al tiempo, para todo el periodo de duración de esta primera etapa, en la *Figura 5.8*



**Figura 5.8. Predicción de la producción de biogás según la ecuación 5.5. Comparación con datos experimentales. Mezcla P-J.**

Se podría justificar el cese de producción de biogás durante los últimos diez días antes de ajustar el pH debido a ese brusco descenso del pH comentado.

De forma similar a los casos anteriores, el volumen específico medio de biogás (L/kg) para la mezcla de residuos de plátano y jatropha (P-J) se correlacionó con el tiempo (días) mediante una ecuación del tipo [5.1] resultando:

$$V_e = \frac{6,767}{1 + 3,198t^{-6,226}} \quad [5.5]$$

Los valores calculados según esta ecuación se han representado en trazo continuo en la Figura 5.8 junto con los valores experimentales comprobándose un perfecto ajuste con un error inferior al 1%.

La producción media de biogás en este caso alcanzó el valor de 6,8 litros por kilogramo de mezcla de residuos de plátano y jatropha.

b) Después del ajuste de pH

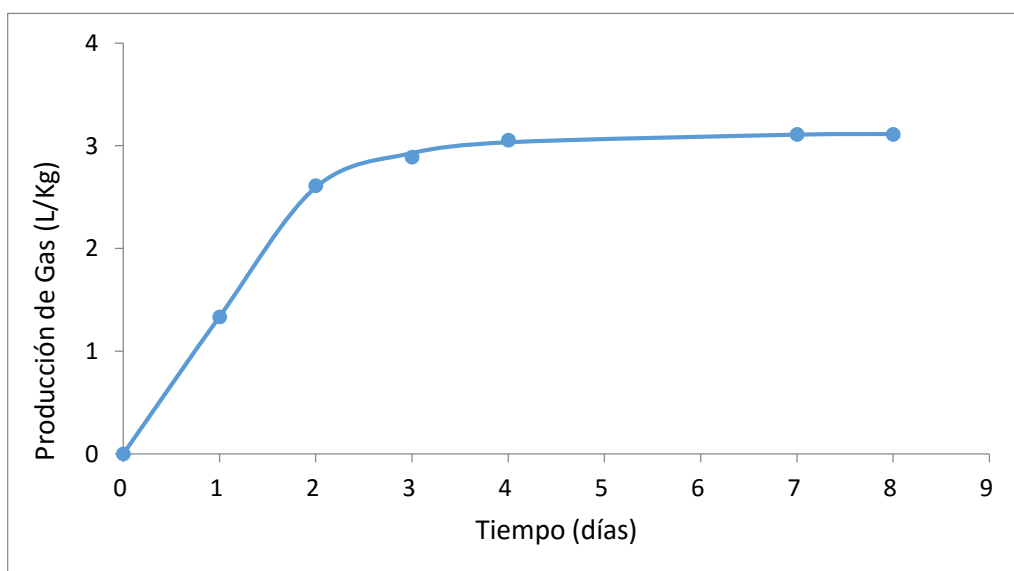
De acuerdo al modelo anterior de presentación y análisis de resultados, en la *Tabla 5.8* se muestran los valores del pH tras reactivar los sistemas, así como los valores finales para cada uno de los experimentos realizados con esta mezcla de residuos de plátano y jatropha.

El reajuste de pH, tal como se comentó en la técnica experimental, se llevó a cabo utilizando sosa comercial en escamas.

**Tabla 5.8. Valores de pH. Mezcla P-J**

Experimento	pH	
	Tras reactivar	Final
1	8,21	6,69
2	8,41	6,27

Tal como ocurrió con las mezclas anteriores, los resultados de pH muestran una variación más suave en esta segunda etapa de los experimentos. Sin embargo, la producción de biogás correspondiente a esta etapa no parece estar acorde con estos resultados. Estos valores medios de producción se representan frente al tiempo en la *Figura 5.9*.



**Figura 5.9. Predicción de la producción de biogás según la ecuación 5.6. Comparación con datos experimentales. Mezcla P-J.**

Como se puede observar en la gráfica la variación de la producción de biogás sigue el comportamiento esperado observándose un aumento exponencial durante los tres primeros días para dejar de producir durante los últimos cinco días de esta segunda y última etapa. El valor final de producción alcanzado fue de 3,1 L/kg.

La producción de biogás, en términos de  $V_e$  (L/kg), se correlacionó con el tiempo (días) mediante la ecuación del tipo [5.1] obteniéndose:

$$V_e = \frac{3,128}{1 + 1,342t^{-2,706}} \quad [5.6]$$

Los valores calculados según esta ecuación se representan en trazo continuo en la *Figura 5.9*, obteniéndose un buen ajuste con un error aproximado del 1%.

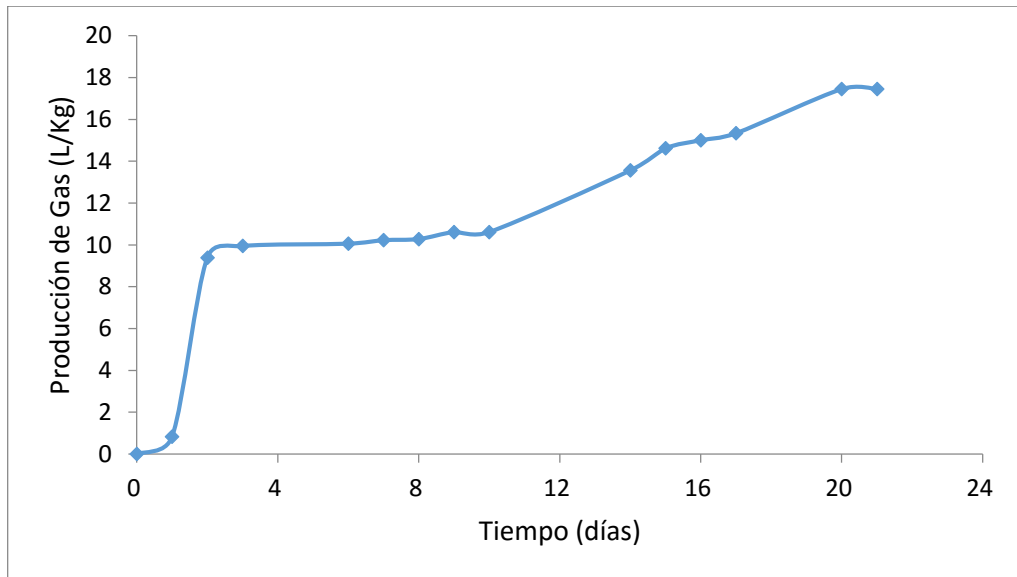
La producción total de biogás para esta mezcla de residuos plátano y jatropha alcanzó el valor de 9,9 L/kg como resultado de las sumas parciales de las producciones correspondientes a las etapas antes y después de reactivar el pH.

#### **5.1.4- Mezcla de plátano, jatropha y glicerina (P-J-G)**

Por último, se estudió la mezcla de plátano con los residuos procedentes de la fabricación del biodiésel, pulpa de jatropha y glicerina, como materia prima para obtener biogás.

De los experimentos de digestión anaerobia se obtuvieron los datos de producción recogidos en la *Tabla A1.4* del Anexo I. Los valores medios en términos de volumen específico  $V_e$  (L/kg) se representan frente al tiempo (días) en la *Figura 5.1*, observándose como en los casos anteriores una mayor producción durante los tres primeros días del ensayo. Sin embargo, a diferencia de los casos anteriores la producción de biogás a partir de este tercer día prácticamente se duplica.

Además, se pueden observar ligeras variaciones en la producción justo tras los procesos de reactivación que como bien se sabe se realizaron los días decimotercero y sexto en el primer y segundo experimento respectivamente.



**Figura 5.10. Producción media de biogás. Mezcla P-J-G**

A continuación, se analizan los resultados de producción obtenidos para la mezcla de plátano, jatropha y glicerina antes y después de ajustar el pH

a) Antes del ajuste de pH

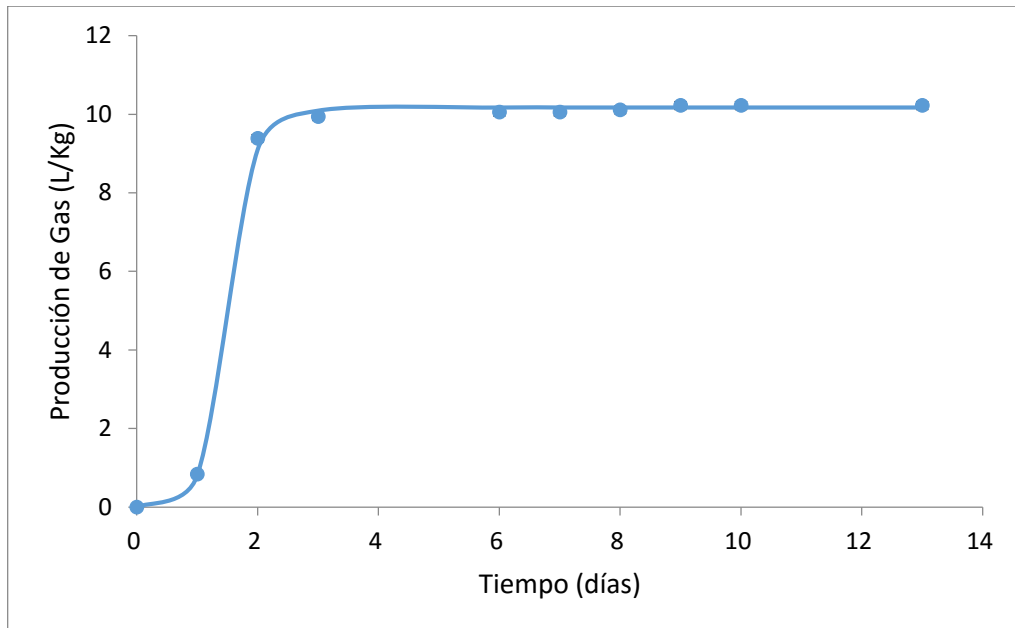
En la *Tabla 5.9* se presentan los valores del pH en el momento inicial y justo antes de reactivar los sistemas para cada uno de los experimentos realizados.

**Tabla 5.9. Valor inicial de pH. Mezcla P-J-G**

Experimento	pH	
	Inicio	Antes de reactivar
1	7,81	4,52
2	8,00	4,51

Estos valores de pH en torno a 4,5 unidades podrían explicar el comportamiento del sistema incluso tras su reactivación como se verá más adelante.

La variación en la producción de biogás correspondiente a esta primera etapa del ensayo se muestra en la *Figura 5.11*, cuyo comportamiento es análogo a los casos ya estudiados con las otras mezclas de residuos.



**Figura 5.11. Predicción de la producción media de biogás según la ecuación 5.7. Comparación con datos experimentales. Mezcla P-J-G.**

Es en los tres primeros del periodo en estudio cuando se alcanza la máxima producción igual a 10,2 L/kg.

Los datos de producción de biogás (L/kg) frente al tiempo (días) se correlacionaron según a una ecuación del tipo [5.1] obteniéndose:

$$V_e = \frac{10,175}{1 + 11,599t^{-6,619}} \quad [5.7]$$

Los resultados calculados según esta ecuación, para el periodo en estudio, y en trazo continuo se presentan junto a los valores experimentales en la Figura 5.11 con un error inferior al 1%

#### b) Después del ajuste de pH

Los valores del pH tras reactivar los sistemas con la mezcla de plátano, jatropha y glicerina (para cuyo reajuste fueron necesarias siete lentejas de hidróxido sódico), así como los valores finales de los dos experimentos realizados se presentan en la *Tabla 5.11*.

**Tabla 5.11. Valores de pH. Mezcla P-J-G**

Experimento	pH	
	Tras reactivar	Final
1	8,17	6,72
2	8,34	6,00

De esta tabla se observa que al igual que sucede con las otras mezclas, el descenso del pH en esta segunda etapa del ensayo no fue tan bajo como el alcanzado en la etapa anterior.

Los resultados medios de producción de biogás (L/kg) frente al tiempo (días) se representan en la *Figura 5.12*, observándose ligeras diferencias en el comportamiento del sistema respecto a los casos anteriores. Se puede observar una producción progresiva en todo el periodo de estudio en esta segunda etapa, alcanzándose una producción final igual a 7,2 L/kg.

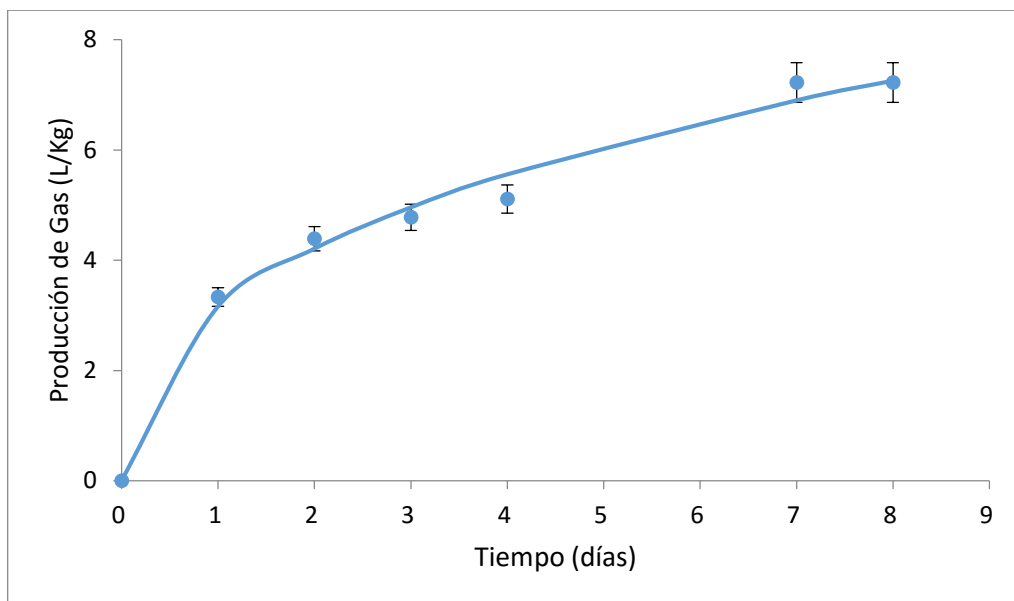
Estos datos experimentales se han correlacionado frente al tiempo mediante una ecuación del tipo [5.1] obteniéndose:

$$V_e = \frac{41,947}{1 + 12,289t^{-0,454}} \quad [5.8]$$

En la *Figura 5.12* se comparan los resultados experimentales y calculados a partir de esta ecuación observándose un buen ajuste (error < 5%).

La producción total de biogás correspondiente a esta mezcla de residuos alcanzó el valor de 17,4 L/kg, correspondiendo aproximadamente el 40% de la misma a la producción generada tras la reactivación del sistema.

Como resumen del apartado “Estudio de la influencia de las diferentes mezclas de residuos sobre la producción de biogás” se presenta el siguiente cuadro (*Tabla 5.12*) en el que se recogen los resultados de producción para cada mezcla de residuos ensayada tras ser sometidos a procesos de digestión anaerobia. Esta tabla presenta por separado los resultados obtenidos antes y después de reactivar los sistemas ajustando el valor del pH.



**Figura 5.12. Predicción de la producción de biogás según la ecuación 5.8. Comparación con datos experimentales. Mezcla P-J-G**

**Tabla 5.12. Resumen de la producción de biogás**

	Producción de biogás (L/kg)		
	Antes de reactivar	Después de reactivar	Total
P-T	14,3	1,8	16,1
P-T-G	19,6	1,4	21,0
P-J	6,8	3,1	9,9
P-J-G	10,2	7,2	17,4

Respecto a la composición del biogás, los análisis cromatográficos revelaron siempre un porcentaje de CO<sub>2</sub> del 100% para todas las mezclas estudiadas anteriormente.

## 5.2- Estudio de la influencia de las diferentes mezclas de residuos sobre la calidad del biogás

Los resultados de los análisis cromatográficos efectuados a todas las muestras de biogás obtenidas a partir de todas las mezclas de residuos estudiadas revelaron como único componente presente el CO<sub>2</sub>. En el apartado de “Material y método” se recoge el procedimiento efectuado para la toma de las muestras y sus análisis correspondientes.



En bibliografía se recoge que una de las consecuencias de la disminución del pH en los digestores es el empobrecimiento en metano del biogás producido. En este caso se podría atribuir los resultados de calidad del biogás a los valores bajos de pH alcanzados en los experimentos que, aunque posteriormente se reactivaron podrían ser responsables de que el proceso de digestión no se realizara al completo, deteniéndose en las etapas generadoras de dióxido de carbono, etapas de acidogénesis y/o acetogénesis.

En base a estos resultados obtenidos de la composición del gas, se resalta como posible vía de aprovechamiento, su transformación en bio-DME. Tal como se comenta en la introducción las actuales investigaciones están encaminadas hacia el desarrollo de nuevos catalizadores más eficaces y estables para los procesos de síntesis a partir de la hidrogenación del CO<sub>2</sub>.

A título de ejemplo en el Anexo IV se muestra uno de los cromatogramas obtenidos, correspondiente a la mezcla de residuos de plátano-jatropha, en el que se observa además del pico del N<sub>2</sub> (tiempo de retención de 0,7 min), el del CO<sub>2</sub> para un tiempo de retención de 4,3 minutos.

### **5.3-Determinación del contenido en sólidos de las mezclas de residuos empleadas**

Según consta en bibliografía el contenido en sólidos totales de las materias primas, junto con el pH, es una de las variables operacionales fundamentales en el proceso de fermentación anaeróbica para la obtención de biogás. En este apartado se recogen los resultados de los análisis de sólidos realizados a las mezclas de los residuos ensayados, cuyos procedimientos se describen en el apartado 4.1.8 de esta memoria.

Inicialmente se planteó este análisis para las muestras ensayadas simplemente con la intención de relacionar el contenido en sólidos volátiles con las producciones reales de biogás correspondientes a las diferentes mezclas de residuos.

En la *Tabla 5.13* se muestran los valores medios del contenido en sólidos totales (ST), fijos (SF) y volátiles (SV), en porcentaje, para todas las mezclas de residuos tanto al inicio como al final de los procesos de digestión.

**Tabla 5.13. Contenido medio en sólidos.  
D.A\*: Digestión Anaerobia.**

Mezcla de residuos	Antes de D.A*			Después de D.A*			Variación de SV
	ST (%)	SF (%)	SV (%)	ST (%)	SF (%)	SV (%)	$\Delta(SV)$ %
P-T	13	31	69	6	17	83	4
P-T-G	17	26	74	6	14	86	8
P-J	15	27	73	7	11	90	5
P-J-G	19	27	73	7	15	85	8

Además, se presentan los resultados de los contenidos en sólidos volátiles, teóricamente susceptibles de ser transformados en biogás, como diferencias entre los valores iniciales y finales correspondientes a los procesos de digestión.

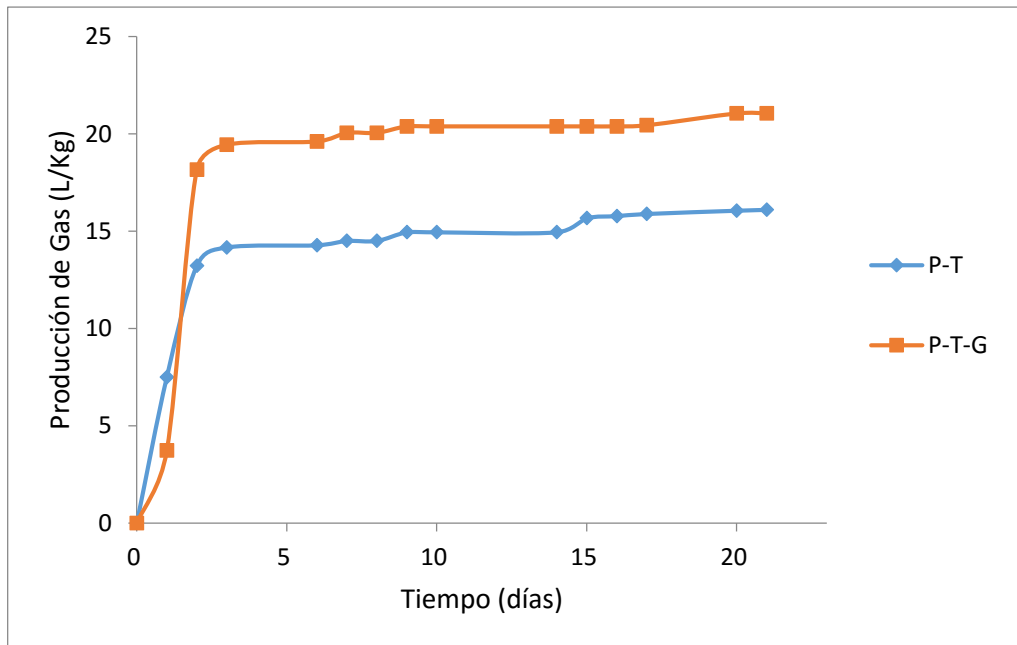
Comparando estos resultados con los recogidos en la *Tabla 5.12* parece existir esa proporcionalidad entre el contenido en sólidos volátiles y la producción de biogás, aunque se proponen estudios más detallados en futuros trabajos que corroboren estos resultados.

#### **5.4-Comparación de las producciones de biogás a partir de las mezclas de residuos con y sin glicerina**

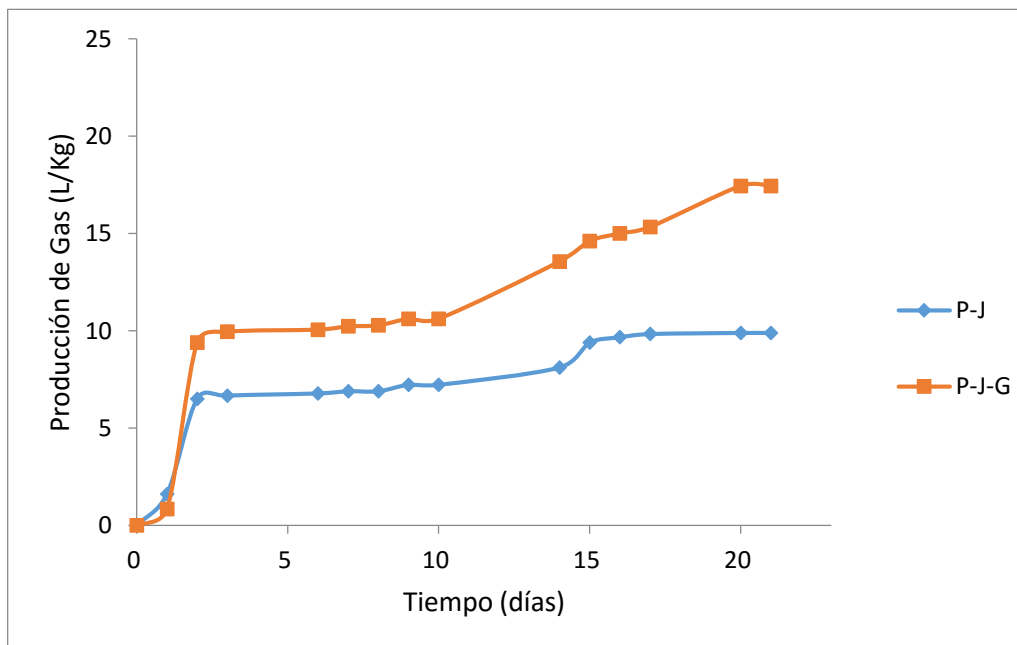
En este apartado se van a comparar los resultados obtenidos de la producción de biogás a partir de las mezclas de residuos que contienen glicerina.

En las *Figuras 5.13* y *5.14* se representan conjuntamente las producciones de biogás para las mezclas de plátano y tomate; y de plátano, tomate y glicerina; así como las correspondientes a las mezclas de plátano y jatrofa; y plátano, jatropha y glicerina respectivamente.

Respecto a la *Figura 5.13* se puede observar un aumento apreciable en la producción del gas atribuido a éste tercer componente, la glicerina, y que posiblemente se deba a su estructura química fácilmente transformable y a su carácter básico.



**Figura 5.13. Influencia de la glicerina en la producción de biogás. Mezclas P-T**



**Figura 5.14. Influencia de la glicerina en la producción de biogás. Mezclas P-J**

Este mismo comportamiento se observa en la *Figura 5.14* en la que se comparan los resultados de la producción de biogás de la mezcla plátano-jatropha con y sin glicerina.

Los porcentajes de aumento se traducen en un 31% y 76% respectivamente para las mezclas con y sin glicerina, tal como se puede comprobar consultando la *Tabla 5.12*. Estos resultados justifican, en principio, el aprovechamiento de este subproducto de la fabricación de biodiésel para la producción de biogás en mezclas de P-T y P-J.

### **5.5-Estudio de la influencia del control continuo de pH sobre la producción de biogás**

Como se comentó al principio del apartado de “Resultados y discusión” se realizó un segundo estudio con el objetivo de evaluar el efecto del control continuo del pH sobre la producción de biogás en los experimentos de fermentación anaerobia. Este estudio se diseñó en base a los resultados obtenidos en el set de biodigestores de manera que se seleccionó la mezcla de residuos con la que se alcanzó una mayor producción de gas en el periodo de estudio.

Para ello se utilizó la mezcla de plátano (60%), tomate (20%) y glicerina (20%) y un reactor mezcla perfecta tal como se describe en el apartado de “Material y método”. El seguimiento y control del pH se realizó durante dieciséis días, según el procedimiento descrito en el apartado 4.2.6 de esta memoria, recogándose los valores en la *Tabla AII.1* del Anexo II.

En la *Figura 5.15* se representa la producción de biogás expresada como volumen específico frente al tiempo, observándose un comportamiento análogo al descrito para esta mezcla de residuos en el apartado anterior, de manera que durante los primeros cuatro días la producción de biogás es de tipo exponencial para luego prácticamente dejar de producir.

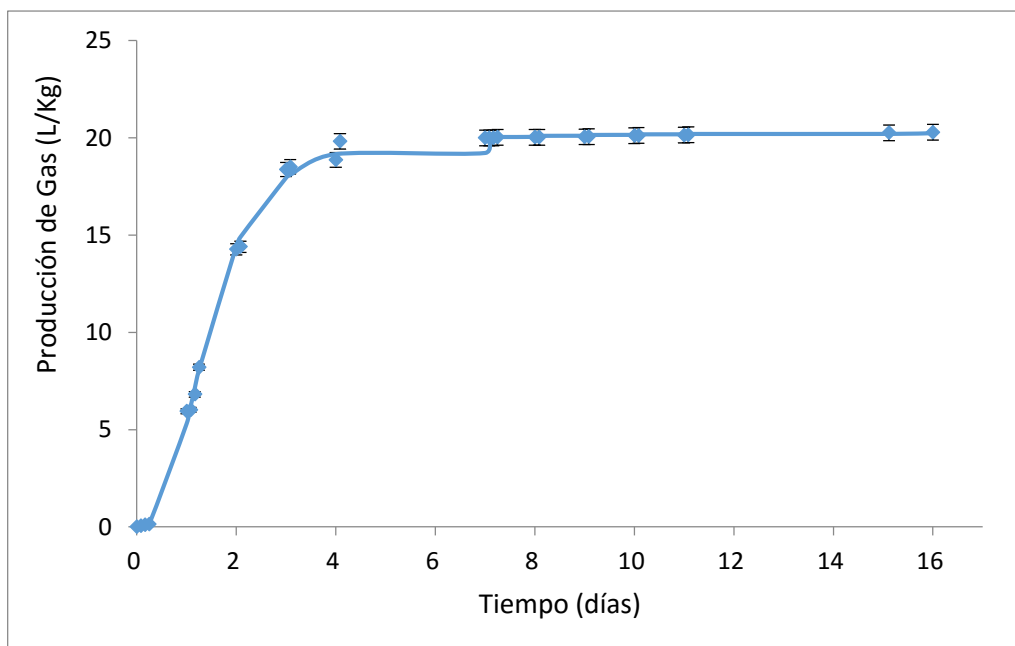
El valor final que se alcanza en este caso es incluso ligeramente inferior al obtenido en el set de biodigestores con la misma mezcla de residuos, por lo que puede deducirse que el pH podría no ser la única variable que debería ser controlada en continuo para garantizar la máxima producción de biogás. Otras

variables que influyen claramente en el proceso de digestión anaerobia tal como la agitación, concentración de macro y micronutrientes en el medio y relación C/N de las materias primas, deberían estudiarse para conocer y entender mejor el comportamiento físico-químico de estos sistemas.

Siguiendo el procedimiento de tratamiento de datos de los ensayos en el set de biodigestores, se procedió a correlacionar la producción obtenida (L/kg) con el tiempo mediante una ecuación del mismo tipo que la ya empleada, ec.[5.1], resultando:

$$V_e = \frac{20,263}{1 + 2,827t^{-2,808}} \quad [5.9]$$

Los valores calculados de producción para el periodo en estudio (en trazo continuo) se representan junto con los datos experimentales en la Figura 5.15 observándose un buen ajuste que no supera el 2% de error.

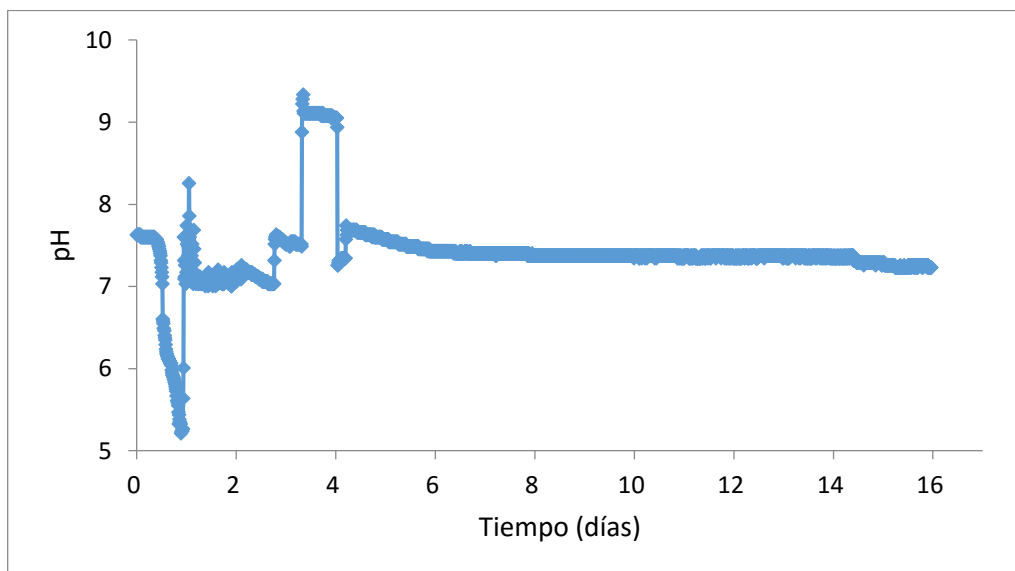


**Figura 5.15. Predicción de la producción de biogás según la ecuación 5.9. Comparación con datos experimentales. Mezcla P-T-G**

La producción total en este caso alcanzó los 20,3 litros de biogás por kilogramo de mezcla de residuos, un 4% inferior al valor obtenido en los experimentos del set de biodigestores en los que no hubo control continuo de pH.

Por otra parte, en la *Figura 5.16* se representa la variación del pH frente al tiempo y cuyos resultados se recogen en la Tabla AIII.1 del Anexo III.

Se puede observar que el valor del pH ha sido prácticamente constante e igual a 7,4 durante todo el periodo del ensayo, aunque se aprecian importantes saltos ocurridos en el primer y tercer día tras el comienzo del experimento, alcanzándose un mínimo y un máximo de 5,21 y 9,34 unidades de pH. Este valor mínimo podría ser el causante, en principio, de la baja producción de biogás en el ensayo, dado que como se ha comentado el proceso es altamente sensible a variaciones de pH fuera del rango establecido como óptimo.



**Figura 5.16. Evolución del pH**

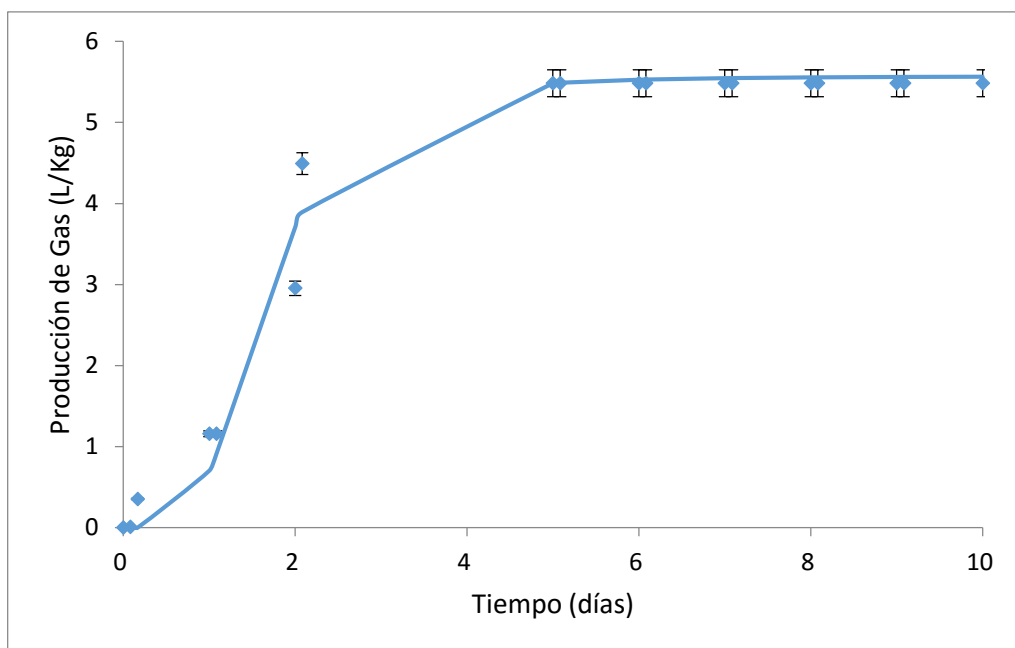
Estas alteraciones en los valores de pH durante el proceso podrían haber sido ocasionadas por varias razones, destacándose entre ellas:

1. Porque el sistema no fue capaz de recuperar el valor óptimo de pH debido a una posible concentración insuficiente de hidróxido sódico en la disolución responsable de ajustar el pH, ocasionando el correspondiente aumento de acidez en la mezcla.
2. Por una agitación inadecuada, que no permitió que el electrodo del pH midiese el valor real de la mezcla, provocando el correspondiente aumento de pH.

Una vez finalizado el ensayo, se vació el reactor y se aprovechó el líquido fermentado para realizar un segundo experimento de diez días de duración, con el objetivo de comprobar si se beneficiaba el proceso de obtención de biogás, ya que el líquido fermentado podría contener nutrientes que favorezcan la actividad de los microorganismos.

En esta ocasión el experimento se preparó exactamente igual que el anterior, pero en lugar de añadir dos litros de agua destilada se añadieron dos litros del líquido fermentado del experimento anterior. Los datos de volumen específico obtenidos se muestran en la Tabla AII.2 del Anexo II.

En la *Figura 5.17* se muestra la evolución de la producción de biogás con respecto al tiempo para este segundo experimento, donde puede observarse el comportamiento típico y esperado del sistema.



**Figura 5.17. Predicción de la producción de biogás según la ecuación 5.10. Comparación con datos experimentales. Mezcla P-T-G.**

Sin embargo, en este segundo experimento el volumen específico medio de biogás producido aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor final constante de 5,5 L/kg, valor menor que el obtenido para el caso de la mezcla acuosa de residuos, en el que se alcanzó una producción final de 20,3 L/kg. Esta inhibición de la producción podría haber sido causada, bien, por un déficit de nutrientes en el medio de reacción (en contra de lo esperado) o bien por una

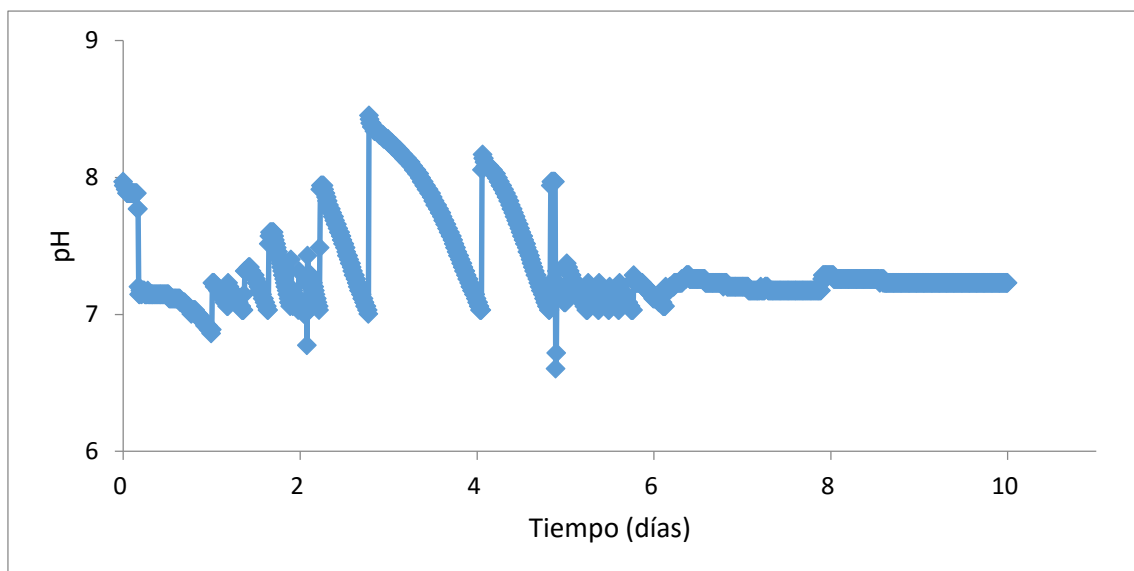
relación inadecuada de carbono/nitrógeno, una baja concentración de nutrientes e incluso por la presencia de tóxicos en el líquido resultante de la digestión anaeróbica del experimento previo.

En este caso la producción de biogás producido se correlacionó con el tiempo mediante a una ecuación del mismo tipo que la utilizada en los casos anteriores (ec.[5.1]), obteniéndose:

$$V_e = \frac{5,572}{1 + 6,921t^{-3,784}} \quad [5.10]$$

Así los valores calculados se representan (en trazo continuo) conjuntamente con los valores experimentales en la *Figura 5.17*, con un error máximo del 3%.

Por último, en la *Figura 5.18* se representan las variaciones del pH frente al tiempo y los resultados obtenidos se recogen en la Tabla AIII.2 del Anexo III. En este caso se pueden observar mayores fluctuaciones del pH alcanzando un mínimo y máximo correspondiente a los valores de 6,61 y 8,45 unidades de pH al quinto y tercer día respectivamente. A partir del séptimo día es cuando se aprecia el valor constante y estable en torno al punto de consigna establecido.



**Figura 5.18. Evolución del pH**

Estas oscilaciones del pH pueden haber sido provocadas por una falta de homogenización de la mezcla a causa de una agitación inadecuada de la misma.



Este problema podría corregirse empleando un agitador apropiado que asegure la mezcla de las distintas fases presentes en el reactor, dado que, según bibliografía consultada, el agitador utilizado tipo ancla podría remover el contenido sin dar lugar a la mezcla de las fases.

La temperatura en ambos ensayos se mantuvo siempre controlada en torno al valor de 31,5°C, valor adecuado para llevar a cabo los procesos de digestión anaerobia.

## **6-CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS**

---

Como resultado de este trabajo realizado y de acuerdo a la bibliografía consultada en relación con la obtención de biogás a partir de residuos agrícolas y de producción de biodiésel, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

1- Respecto al contenido en sólidos de las mezclas ensayadas se ha obtenido una proporcionalidad entre el porcentaje de sólidos volátiles susceptibles de ser transformados en biogás y las correspondientes producciones de biogás obtenidas.

2- Las mezclas de residuos estudiadas y sus composiciones se presentan, en la siguiente tabla, por orden según la producción final de biogás obtenida:

Composición mezcla	V <sub>e</sub> (L/kg)
60% Plátano - 20% Tomate - 20% Glicerina	21,0
60% Plátano - 20% Jatropha - 20% Glicerina	17,4
60% Plátano - 40% Tomate	16,1
60% Plátano - 40% Jatropha	9,9

De lo que se puede concluir lo siguiente:

- Son las mezclas con contenido en glicerina las más adecuadas para la producción de biogás.
- De la comparación entre las mezclas que contienen glicerina, es la compuesta por plátano y tomate la que produce en torno a un 20% más de biogás.
- De la comparación entre las mezclas que no emplean glicerina resulta, al igual que en el caso anterior, que la mezcla de plátano y tomate es la que da lugar a mayor producción de biogás en torno a un 60% más que la de plátano y pulpa de jatropha.
- De la comparación entre las mezclas con y sin glicerina se observan producciones superiores del 30% y 75% para la mezcla de plátano-tomate y plátano-jatropha respectivamente.
- Las producciones de gas obtenidas para todos los ensayos realizados están en buen acuerdo con la ecuación del tipo:

$$V_e = \frac{a}{1 + b't^c}$$

Los coeficientes de la ecuación anterior para cada mezcla en las dos partes del experimento se presentan en la siguiente tabla:

Mezclas de residuos		Antes de reactivar	Después de reactivar
P-T	a	14,323	1,789
	b'	0,958	1,601
	c	-3,495	-2,166
P-T-G	a	19,681	19,919
	b'	4,486	34,068
	c	-5,118	-0,455
P-J	a	6,767	3,128
	b'	3,198	1,342
	c	-6,226	-2,706
P-J-G	a	10,175	41,947
	b'	11,599	12,289
	c	-6,619	-0,454

Como resultado global se puede decir que la adición de glicerina a las mezclas de residuos agrarios tiene un efecto positivo en la producción del gas; sin embargo, es fundamental el control continuo de pH para asegurar que el proceso de digestión se efectúe en el intervalo óptimo establecido.

3- En todas las mezclas ensayadas se observó que la composición del gas se limitó exclusivamente al CO<sub>2</sub>. Para gestionar eficazmente este gas se podría recomendar su transformación en bio-DME.

4- El efecto del reajuste del pH en el proceso anaeróbico dio lugar a producciones de gas superiores con valores en torno al 10% y 35% para las mezclas de contenido en plátano-tomate y plátano-jatropha respectivamente. Estas producciones relativamente bajas, podrían haber sido ocasionadas por los bajos valores de pH alcanzados justo antes de reactivar los sistemas, lo que podría haber mermado la actividad de las poblaciones microbianas.

5- El efecto del control continuo de pH no dio lugar a diferencias apreciables en las producciones de gas respecto a los ensayos realizados en el set de biodigestores, lo que se atribuye a las fluctuaciones puntuales del pH ocasionadas, en principio, por causas desconocidas.

6- El líquido fermentado procedente de los procesos de digestión anaerobia no es un medio adecuado para realizar nuevos ensayos tal como revelan los resultados presentados en este trabajo. La incorrecta relación entre el carbono y el nitrógeno necesarios para la actividad microbiana, la deficiencia de nutrientes en el medio y la toxicidad del sistema pueden haber sido factores determinantes en este resultado.

En base a estas conclusiones se proponen las siguientes sugerencias para estudios futuros similares a los realizados en este trabajo:

1-Aprovechar que la ULL dispone de un Servicio General de Apoyo a la Investigación (SEGAI) para realizar análisis de contenidos en carbono y nitrógeno de las mezclas de residuos para asegurar una relación óptima de 30:1, así como las concentraciones de macronutrientes y micronutrientes que garanticen la actividad adecuada de las poblaciones microbianas.

2-Estudio de la influencia del tipo e intensidad del agitador sobre el pH del sistema y la producción de biogás en el proceso anaeróbico.

3-Realizar el análisis químico del contenido en carbono y nitrógeno de las mezclas de residuos para asegurar una relación C/N igual a 30:1, óptima en los procesos de digestión.

4-Añadir a las mezclas de estudio un residuo en la co-digestión tal como lodos de depuradora, purines o similares, que activen la mezcla, produciendo un biogás rico en metano para ser aprovechado desde el punto de vista energético.

### Conclusions and suggestions

As a result of this work and according to the consulted literature related with obtaining biogas from agricultural waste and biodiesel production, the following conclusions have been reached:

1- Regarding the solid contents of the tested mixtures, a proportionality has been obtained between the percentage of volatile solids which can be converted into biogas and the corresponding production of biogas obtained

2- Waste mixtures and compositions studied are presented in the table below, in order according to the final production of biogas obtained:

Composition of mixtures	$V_e$ (L/kg)
60% Banana - 20% Tomato - 20% Glycerin	21,0
60% Banana - 20% Jatropha - 20% Glycerin	17,4
60% Banana - 40% Tomato	16,1
60% Banana - 40% Jatropha	9,9

From what we can conclude the following:

- The mixtures containing glycerin are the most suitable for processing into biogas.
- When comparing mixtures containing glycerol, the one made of banana and tomato, produces about 20% more biogas.
- When comparing mixtures that do not use glycerin it is, as in the previous case, the mixture of banana and tomato the one that results in higher production of biogas, around 60% more than the banana jatropha pulp.
- From the comparisons between mixtures with and without glycerin, yields above 30% and 75% for the mixture of tomato and banana-banana-jatropha respectively were observed.
- Gas productions obtained for all trials are in good agreement with the equation of the type:

$$V_e = \frac{a}{1 + b't^c}$$

The coefficients of the above equation for each mixture in the two parts of the experiment are presented in the following table:

Waste mixture		Before reactivation	After reactivation
P-T	a	14,323	1,789
	b'	0,958	1,601
	c	-3,495	-2,166
P-T-G	a	19,681	19,919
	b'	4,486	34,068
	c	-5,118	-0,455
P-J	a	6,767	3,128
	b'	3,198	1,342
	c	-6,226	-2,706
P-J-G	a	10,175	41,947
	b'	11,599	12,289
	c	-6,619	-0,454

As an overall result it can be said that the addition of glycerin to mixtures of agricultural waste has a positive effect on gas production; however, it is essential the continuous control of pH to ensure that the digestion process is carried out at the established optimum interval.

3- For all mixtures tested, it was observed that the gas composition was limited exclusively to CO<sub>2</sub>. To effectively manage this gas could recommend its transformation into bio-DME.

4- The effect of pH adjustment in the anaerobic process resulted in higher gas production values around 10% and 35% for mixed content in tomato and banana-banana-jatropha respectively. These relatively low yields, could have been caused by low pH values reached just before reactivating systems, which could have diminished the activity of microbial populations.

5- The effect of continuous pH control did not result in significant differences in gas production compared to the tests performed on the set of biodigesters, which

is attributed to the specific pH fluctuations caused, in principle, for unknown reasons.

6- The fermented liquid from anaerobic digestion processes is not an appropriate means for further tests as revealed by the results presented in this paper. Incorrect relationship between carbon and nitrogen necessary for microbial activity, nutrient deficiency in the middle and system toxicity may have been determining factors in this result.

Based on these findings the following suggestions for future studies similar to those made in this work are proposed:

1-Taking advantage of the fact that the ULL has a general service which supports research, analyze contents of carbon and nitrogen mixtures of wastes to ensure optimal ratio of 30: 1, and also analyze the concentrations of macronutrients and micronutrients to ensure the appropriate activity of microbial populations.

2-Study of the influence of the type and intensity of the agitator in the pH of the system and the production of biogas in the anaerobic process.

3-perform the chemical analysis of carbon and nitrogen content of the mixed waste to ensure a C / N ratio equal to 30: 1, optimal in digestion processes.

4-Add to the mix a residue study in co-digestion such as sewage sludge, slurry or the like, to activate the mixture, producing a methane-rich biogas to be tapped from the energy point of view.



## **7-BIBLIOGRAFÍA**

---

Angelidaki, I., Ahring, B. K. 1994. Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: Effect of temperature. *Water Res.* 28(3):727–731.

Angelent, L. T., Karim, K., Al-Dahhan, M. H., Wrenn, B. A., Spinosa, R. D. 2004. Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. *Trends Biotechnol.* 22(9):477– 485.

Archer, D. B., Harris, J. E. 1986. Methanogenic bacteria and methane production in various habitats. In: *Anaerobic Bacteria in Habitats Other Than Man*, E. M. Barnes & C. Mead (Eds) , pp.185– 223. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK

Brock, T. D., Madigan, M. T., Martinko, J. M., Parker, J. 1994. *Biology of Microorganisms*. Prentice-Hall, New York, USA.

Cai, M., Liu, J., Wei, Y. 2004. Enhanced biological production from sewage sludge with alkaline pretreatment. *Environ. Sci. Technol.* 38:3195–3202.

California Compost Quality Council (CCQC). 1999. CCQC Registered Compost. (Online). Disponible <http://www.crra.com/ccqc/>. California Compost Quality Council, San Francisco, California.

Classen, P. A. M., Van Lier, J. B., Contreras, A. M. L., van Niel E. W. J., Sijtsma, L., Stams, A. J. M., de Vries, S. S., Weusthuis, R. A. 1999. Utilisation of biomass for the supply of energy. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 52:741–745.

CNE, Comisión Nacional de Energía. 2006. *Guía del Mecanismo de Desarrollo Limpio para Proyectos del Sector Energía en Chile*. Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GTZ), Cooperación Intergubernamental Chile-Alemania (Eds). 69 p, Santiago.

Deublein D., Steinhauser A. 2008. *Biogas from waste and renewable resources: An Introduction*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim. 443 p.

Esguerra, M. (1989). Experiencias prácticas con biodigestores de bajo costo para la generación de energía y el tratamiento de aguas residuales en países en desarrollo. Conferencia Internacional de Mecanización Agraria. Seminario FAO-CNRE: Tecnologías de producción de biogás, pág.171-178. España.

FAO. 1986. *Reciclaje de Materias Orgánicas y Biogas. Una experiencia en China*. Curso de capacitación. Chengdu, China, (Septiembre – Octubre, 1984). 400pp.

Farina, R., Boopathy, R., Hartmann, A., Tilche, A. 1988. Ammonia Stress During Thermophilic Digestion of Raw Laying Hen Wastes, pp. 111–117. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Anaerobic Digestion*.

Gallert, C., Winter, J. 1997. Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic waste: Effect of ammonia on glucose degradation and methane production. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 48:405–410.

Gene P. y Owen W. 1986. Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges. *Journal of Environmental Engineering* 112:867-916.

Grundey, K. 1982. El tratamiento de los residuos agrícolas y ganaderos. Ediciones. GEA. 340pp. Hanaki, K., Matsuo, T., Nagase, M. 1981. Mechanisms of inhibition caused by long-chain fatty acids in anaerobic digestion process. *Biotechnol. Bioeng.* XXIII:1591–1610.

Hansen M.N., Birkmose T., Mortensen B. y Skaaning K. 2004. Environmental effects of anaerobic digestion and separation of slurry - odour, ammonia emission and nitrogen utilisation. Correll, A. (Ed.) Grøn Viden, Markbrug, no. 296. Danish Institute of Agricultural Sciences, Dep. of Agricultural Engineering.

Hayes, T. D., Theis, T. L. 1978. The distribution of heavy metals in anaerobic digestion. *J. Water Pollut. Control Fed.* 50:61–72.

Hilbert, J., Eppel, J. 2007. Desafíos y Estrategias para Implementar la Digestión Anaeróbica en los Agrosistemas. Argentina.

Insam H., Franke-Wittle I. y Goberna M. 2009. Microbes in aerobic and anaerobic waste treatment. En: *Microbes at work. From wastes to resources.* Insam H., Franke-Wittle I. y Goberna M. (Eds). Pp. 1-34. Springer. Heidelberg, Dordrecht, London, New York.

Khanal S.K. 2008. Environmental Factors. En: *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications.* S.K Khanal (Ed.). John Wiley & Sons, Inc. USA. Pp 43-63.

Lagrange, B. 1979. Biomethane. Principes, Techniques, Utilisation. Vol.2. *Edisual / Energies Alternatives* 249pp.

Kumar S. 2008 Anaerobic reactor configurations for bioenergy production. En: *Anaerobic biotechnology for bioenergy production. Principles and Applications.* Kumar S. (Ed.). Pp 93-114. Blackwell Publishing. Hawaii.

Lay, J.J., Li, Y.Y., Noike, T. 1997. Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion. *Water Research*, vol. 31 (10).

Mandujano, M. I.; Félix, A. y Martínez, A.M. 1981. Biogas, Energía y Fertilizante a partir de desechos orgánicos. OLADE, Serie de publicaciones especiales N 6, México. 41pp.

McCarty, P. L. 1964. Anaerobic waste treatment fundamentals. Part III: Toxic materials and their control. *Public Works* 91–94.

Metcalf, Eddy. 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, 4th edn. McGraw-Hill Companies, Inc., New York, USA.

Parkin, G. F., Miller, S.W. 1982. Response of Methane Fermentation to Continuous Addition of Selected Industrial Toxicants. *Proceedings of 37th Purdue Industrial Waste Conference*, West Lafayette, Indiana.

Parkin, G. F., Speece, R. E. 1983. Attached versus suspended growth anaerobic reactors: Response to toxic substances. *Water Sci. Technol.* 15:261–289.

Robin, D.; Le Quellec, S. 1997. Evaluation et classification des fertilisants organiques: Intérêt de la caractérisation biochimique de la matière organique. Extrait de *Phytoma – La Défense des Végétaux*, N° 495, 4p.

Seagren, E. A., Levine, A. D., Dague, R. R. 1991. High pH effects. In *Anaerobic Treatment of Liquid Industrial Byproducts*, pp. 377–386. 45th Purdue Industrial Waste Conference Proceedings. Lewis Publishers, Inc., Chelsea, MI, USA.

Speece, R. E. 1996. *Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatments*. Archae Press, Nashville, TN, USA.

Steffen, R., Szolar, O., Braun, R. 1998. Feedstocks for Anaerobic Digestion. Technical paper 1998- 09-30, Institute for Agro biotechnology, Tulln University of Agricultural Sciences, Vienna, Austria.

Switzenbaum, M. S., Jewell, W. J. 1980. Anaerobic attached-film expanded-bed reactor treatment. *J. Water Pollut. Control Fed.* 52:1953–1965.

The Biogas Technology in China. 1989. Chengdu Biogas Research Institute.

Van Haandel, A. C., Lettinga, G. 1994. *Anaerobic Sewage Treatment: A Practical Guide for Regions with a Hot Climate*. John Wiley & Sons, Chichester, England.

Van Lier, J. B., Rebac, S., Lens, P., Lettinga, G. 1997. Anaerobic treatment of partly acidified wastewater in a two-stage expanded granular sludge bed (EGSB) system at 8°C. *Water Sci. Technol.* 36(6):317–324.

Varnero, M.T. y Arellano, J. 1990. Aprovechamiento racional de desechos orgánicos. Ministerio de Agricultura (FIA). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Informe Técnico. Santiago, Chile, 98p.

Varnero, M.T.; Faúndez, P.; Santibáñez, C. 2004. Evaluación de lodo fresco y compostado como materia prima para la elaboración de sustrato, Actas del Simposio de las Ciencias del Suelo “Residuos Orgánicos y su Uso en Sistemas Agroforestales”, 361- 365, Temuco – Chile, 5 a 6 de Agosto 2004.

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.

Varnero, M.T. 2001. Desarrollo de sustratos: Compost y Bioabonos. In: *Experiencias Internacionales en la Rehabilitación de Espacios Degradados*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Publicaciones Misceláneas Forestales N° 3, 123p. 21 –30.

Weijma, J., Stams, A. J. M. 2001. Methanol conversion in high-rate anaerobic reactors. *Water Sci. Technol.* 44(8):7–14.

Zinder, S. H. 1988. Conversion of acetic acid to methane by thermophiles. In *Anaerobic Digestion*, E. R. Hall, P. N. Hobson (Eds), pp. 1–12. Proceedings of the 5th International Symposium on Anaerobic Digestion, Bologna, Italy.

Zinder, S. H., Mah, R. A. 1979. Isolation and characterization of a thermophilic strain of *Methanosarcina* unable to use H<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> for methanogenesis. *Appl. Environ. Microbiol.* 38:996–1008.

## **ANEXOS**

---

## ANEXO I

### Producción y composición del biogás para las mezclas de residuos del set de biodigestores.

**Tabla AI.1. Producción y composición del biogás.  
Mezcla: Plátano (60%) – Tomate 40%)**

Días	Volumen específico de biogás (L/kg)			Composición
	Exp 1	Exp 2	Media	% CO <sub>2</sub>
0	0,0	0,0	0,0	100,0
1	9,0	6,0	7,5	100,0
2	10,1	16,3	13,2	100,0
3	11,6	16,8	14,2	100,0
4	-	-	-	-
5	-	-	-	-
6	11,8	16,8	14,3	100,0
7	11,8	17,2	14,5	100,0
8	11,8	17,2	14,5	100,0
9	11,8	18,1	14,9	100,0
10	11,8	18,1	14,9	100,0
11	-	-	-	100,0
12	-	-	-	100,0
13	11,8	-	-	100,0
14	11,8	18,1	14,9	100,0
15	13,2	18,1	15,7	100,0
16	13,3	18,2	15,8	100,0
17	13,6	18,2	15,9	100,0
18	-	-	-	-
19	-	-	-	-
20	13,7	18,4	16,1	100,0
21	13,7	18,4	16,1	100,0

**Tabla A1.2. Producción y composición del biogás.  
Mezcla: Plátano (60%) – Tomate (20%) – Glicerina (20%)**

Días	Volumen específico de biogás (L/kg)			Composición
	Exp 1	Exp 2	Media	% CO <sub>2</sub>
0	0,0	0,0	0,0	100,0
1	1,9	5,6	3,7	100,0
2	14,7	21,7	18,2	100,0
3	16,7	22,2	19,4	100,0
4	-	-	-	-
5	-	-	-	-
6	17,0	22,2	19,6	100,0
7	17,0	23,1	20,1	100,0
8	17,0	23,1	20,1	100,0
9	17,0	23,8	20,4	100,0
10	17,0	23,8	20,4	100,0
11	-	-	-	100,0
12	-	-	-	100,0
13	17,0	-	-	100,0
14	17,0	23,8	20,4	100,0
15	17,0	23,8	20,4	100,0
16	17,0	23,8	20,4	100,0
17	17,0	23,9	20,4	100,0
18	-	-	-	-
19	-	-	-	-
20	17,0	25,1	21,1	100,0
21	17,0	25,1	21,1	100,0



**Tabla A1.3. Producción y composición del biogás.  
Mezcla: Plátano (60%) – Jatropha (40%)**

Días	Volumen específico de biogás (L/kg)			Composición
	Exp 1	Exp 2	Media	% CO <sub>2</sub>
0	0,0	0,0	0,0	100,0
1	2,3	0,9	1,6	100,0
2	5,2	7,8	6,5	100,0
3	5,2	8,1	6,7	100,0
4	-	-	-	-
5	-	-	-	-
6	5,4	8,1	6,8	100,0
7	5,4	8,3	6,9	100,0
8	5,4	8,3	6,9	100,0
9	5,4	9,0	7,2	100,0
10	5,4	9,0	7,2	100,0
11	-	-	-	100,0
12	-	-	-	100,0
13	5,4	-	-	100,0
14	5,4	10,8	8,1	100,0
15	7,4	11,3	9,4	100,0
16	7,9	11,4	9,7	100,0
17	8,2	11,4	9,8	100,0
18	-	-	-	-
19	-	-	-	-
20	8,2	11,6	9,9	100,0
21	8,2	11,6	9,9	100,0

**Tabla A1.4. Producción y composición del biogás.  
Mezcla: Plátano (60%) – Jatropha (20%) – Glicerina (20%)**

Días	Volumen específico de biogás (L/kg)			Composición
	Exp 1	Exp 2	Media	% CO <sub>2</sub>
0	0,0	0,0	0,0	100,0
1	1,4	0,2	0,8	100,0
2	12,1	6,7	9,4	100,0
3	12,4	7,4	9,9	100,0
4	-	-	-	-
5	-	-	-	-
6	12,7	7,4	10,1	100,0
7	12,7	7,8	10,2	100,0
8	12,8	7,8	10,3	100,0
9	13,0	8,2	10,6	100,0
10	13,0	8,2	10,6	100,0
11	-	-	-	100,0
12	-	-	-	100,0
13	13,0	-	-	100,0
14	13,0	14,1	13,6	100,0
15	13,0	16,2	14,6	100,0
16	13,0	17,0	15,0	100,0
17	13,6	17,1	15,3	100,0
18	-	-	-	-
19	-	-	-	-
20	17,8	17,1	17,4	100,0
21	17,8	17,1	17,4	100,0

## ANEXO II

### Producción y composición del biogás para los ensayos en el reactor mezcla perfecta.

**Tabla All.1. Producción y composición del biogás. Reactor MP. Exp1.  
Mezcla: Plátano (60%) – Tomate (20%) – Glicerina (20%)**

Días	Volumen específico	Composición
	L/kg	% CO <sub>2</sub>
0,0	0,0	100,0
0,1	0,1	100,0
0,2	0,1	100,0
0,3	0,1	100,0
1,0	5,9	100,0
1,1	6,0	100,0
1,2	6,8	100,0
1,3	8,2	100,0
2,0	14,3	100,0
2,1	14,4	100,0
3,0	18,4	100,0
3,1	18,5	100,0
4,0	18,9	100,0
4,1	19,8	100,0
-	-	-
-	-	-
7,0	20,0	100,0
7,1	20,0	100,0
7,2	20,0	100,0
7,3	20,0	100,0
8,0	20,0	100,0
8,1	20,0	100,0
9,0	20,1	100,0
9,1	20,1	100,0
10,0	20,1	100,0
10,1	20,1	100,0
11,0	20,1	100,0
11,1	20,2	100,0
-	-	-
-	-	-
-	-	-
15,1	20,3	100,0
16,0	20,3	100,0

**Tabla AII.2. Producción y composición del biogás. Reactor MP. Exp 2.  
Mezcla: Plátano (60%) – Tomate (20%) – Glicerina (20%)**

Días	Volumen específico	Composición
	L/kg	% CO <sub>2</sub>
0,0	0,0	100,0
0,1	0,0	100,0
0,2	0,4	100,0
1,0	1,2	100,0
1,1	1,2	100,0
2,0	3,0	100,0
2,1	4,5	100,0
-	-	-
-	-	-
5,0	5,5	100,0
5,1	5,5	100,0
6,0	5,5	100,0
6,1	5,5	100,0
7,0	5,5	100,0
7,1	5,5	100,0
8,0	5,5	100,0
8,1	5,5	100,0
9,0	5,5	100,0
9,1	5,5	100,0
10,0	5,5	100,0

## ANEXO III

### Valores de pH en el Reactor Mezcla Perfecta.

**Tabla AIII.1. Exp1.**  
**Mezcla: Plátano (60%) – Tomate (20%) – Glicerina (20%)**

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
0,00	7,63	0,26	7,60	0,51	7,03
0,01	7,63	0,26	7,60	0,52	6,61
0,01	7,63	0,27	7,60	0,53	6,58
0,02	7,63	0,28	7,60	0,53	6,55
0,03	7,63	0,28	7,60	0,54	6,49
0,03	7,63	0,29	7,60	0,55	6,46
0,04	7,63	0,30	7,60	0,56	6,41
0,05	7,63	0,31	7,60	0,56	6,38
0,06	7,63	0,31	7,60	0,57	6,35
0,06	7,63	0,32	7,60	0,58	6,29
0,07	7,63	0,33	7,60	0,58	6,24
0,08	7,60	0,33	7,60	0,59	6,21
0,08	7,60	0,34	7,60	0,60	6,18
0,09	7,60	0,35	7,60	0,60	6,18
0,10	7,60	0,35	7,60	0,61	6,15
0,10	7,60	0,36	7,57	0,62	6,15
0,11	7,60	0,37	7,57	0,63	6,12
0,12	7,60	0,38	7,57	0,63	6,12
0,13	7,60	0,38	7,57	0,64	6,12
0,13	7,60	0,39	7,57	0,65	6,09
0,14	7,60	0,40	7,57	0,65	6,09
0,15	7,60	0,40	7,54	0,66	6,09
0,15	7,60	0,41	7,54	0,67	6,06
0,16	7,60	0,42	7,54	0,67	6,06
0,17	7,60	0,42	7,52	0,68	6,06
0,17	7,60	0,43	7,52	0,69	6,06
0,18	7,60	0,44	7,49	0,69	6,04
0,19	7,60	0,44	7,49	0,70	5,98
0,19	7,60	0,45	7,46	0,71	5,95
0,20	7,60	0,46	7,43	0,72	5,92
0,21	7,60	0,47	7,40	0,72	5,92
0,22	7,60	0,47	7,37	0,73	5,89
0,22	7,60	0,48	7,32	0,74	5,89
0,23	7,60	0,49	7,29	0,74	5,87
0,24	7,60	0,49	7,23	0,75	5,87
0,24	7,60	0,50	7,17	0,76	5,84

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
0,77	5,81	1,03	7,37	1,28	7,09
0,78	5,78	1,03	7,49	1,29	7,03
0,78	5,75	1,04	7,54	1,30	7,09
0,79	5,72	1,05	8,25	1,31	7,03
0,80	5,67	1,06	7,86	1,31	7,09
0,81	5,61	1,06	7,60	1,32	7,03
0,81	5,61	1,07	7,46	1,33	7,09
0,82	5,58	1,08	7,29	1,33	7,03
0,83	5,55	1,08	7,15	1,34	7,06
0,83	5,47	1,09	7,06	1,35	7,03
0,84	5,33	1,10	7,37	1,35	7,03
0,85	5,44	1,10	7,20	1,36	7,03
0,85	5,38	1,11	7,52	1,37	7,03
0,86	5,35	1,12	7,32	1,38	7,00
0,87	5,35	1,13	7,15	1,38	7,09
0,88	5,33	1,13	7,03	1,39	7,06
0,88	5,33	1,14	7,12	1,40	7,06
0,89	5,21	1,15	7,69	1,40	7,03
0,90	5,24	1,15	7,46	1,41	7,03
0,90	5,24	1,16	7,29	1,42	7,03
0,91	5,24	1,17	7,15	1,42	7,03
0,92	5,27	1,17	7,06	1,43	7,00
0,92	5,27	1,18	7,15	1,44	7,17
0,93	5,64	1,19	7,03	1,44	7,12
0,94	6,01	1,19	7,09	1,45	7,09
0,94	7,60	1,20	7,15	1,46	7,09
0,95	7,32	1,21	7,03	1,47	7,06
0,96	7,09	1,22	7,12	1,47	7,06
0,97	7,12	1,22	7,03	1,48	7,06
0,97	7,26	1,23	7,12	1,49	7,03
0,98	7,03	1,24	7,03	1,49	7,03
0,99	7,12	1,24	7,09	1,50	7,03
0,99	7,17	1,25	7,03	1,51	7,03
1,00	7,74	1,26	7,12	1,51	7,03
1,01	7,52	1,26	7,03	1,52	7,00
1,01	7,29	1,27	7,12	1,53	7,09
1,02	7,63	1,28	7,03	1,53	7,06

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
1,54	7,06	1,80	7,09	2,06	7,12
1,55	7,06	1,81	7,06	2,06	7,12
1,56	7,03	1,81	7,06	2,07	7,12
1,56	7,03	1,82	7,06	2,08	7,12
1,57	7,03	1,83	7,06	2,08	7,12
1,58	7,03	1,83	7,06	2,09	7,09
1,58	7,00	1,84	7,06	2,10	7,09
1,59	7,09	1,85	7,03	2,10	7,26
1,60	7,06	1,85	7,03	2,11	7,23
1,60	7,03	1,86	7,03	2,12	7,23
1,61	7,03	1,87	7,03	2,13	7,23
1,62	7,03	1,88	7,03	2,13	7,20
1,63	7,03	1,88	7,03	2,14	7,20
1,63	7,20	1,89	7,03	2,15	7,20
1,64	7,15	1,90	7,00	2,15	7,20
1,65	7,12	1,90	7,00	2,16	7,20
1,65	7,12	1,91	7,17	2,17	7,20
1,66	7,09	1,92	7,15	2,17	7,20
1,67	7,09	1,92	7,15	2,18	7,20
1,67	7,09	1,93	7,12	2,19	7,20
1,68	7,06	1,94	7,15	2,19	7,20
1,69	7,06	1,94	7,15	2,20	7,20
1,69	7,06	1,95	7,12	2,21	7,20
1,70	7,06	1,96	7,12	2,22	7,17
1,71	7,03	1,97	7,12	2,22	7,17
1,72	7,03	1,97	7,09	2,23	7,17
1,72	7,03	1,98	7,09	2,24	7,17
1,73	7,03	1,99	7,09	2,24	7,17
1,74	7,03	1,99	7,09	2,25	7,17
1,74	7,03	2,00	7,06	2,26	7,17
1,75	7,03	2,01	7,20	2,26	7,17
1,76	7,17	2,01	7,20	2,27	7,17
1,76	7,15	2,02	7,20	2,28	7,17
1,77	7,12	2,03	7,17	2,28	7,17
1,78	7,12	2,03	7,17	2,29	7,17
1,78	7,09	2,04	7,15	2,30	7,15
1,79	7,09	2,05	7,15	2,31	7,15

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
2,31	7,17	2,57	7,06	2,83	7,60
2,32	7,15	2,58	7,06	2,83	7,60
2,33	7,15	2,58	7,06	2,84	7,60
2,33	7,15	2,59	7,06	2,85	7,60
2,34	7,15	2,60	7,06	2,85	7,60
2,35	7,15	2,60	7,06	2,86	7,60
2,35	7,15	2,61	7,06	2,87	7,60
2,36	7,15	2,62	7,06	2,88	7,57
2,37	7,15	2,63	7,06	2,88	7,57
2,38	7,15	2,63	7,06	2,89	7,57
2,38	7,12	2,64	7,03	2,90	7,57
2,39	7,12	2,65	7,03	2,90	7,57
2,40	7,12	2,65	7,03	2,91	7,57
2,40	7,12	2,66	7,03	2,92	7,57
2,41	7,12	2,67	7,03	2,92	7,57
2,42	7,12	2,67	7,03	2,93	7,54
2,42	7,12	2,68	7,03	2,94	7,54
2,43	7,12	2,69	7,03	2,94	7,54
2,44	7,12	2,69	7,03	2,95	7,54
2,44	7,12	2,70	7,03	2,96	7,54
2,45	7,09	2,71	7,03	2,97	7,54
2,46	7,09	2,72	7,03	2,97	7,54
2,47	7,09	2,72	7,03	2,98	7,54
2,47	7,09	2,73	7,03	2,99	7,52
2,48	7,09	2,74	7,03	2,99	7,52
2,49	7,09	2,74	7,03	3,00	7,52
2,49	7,09	2,75	7,03	3,01	7,52
2,50	7,09	2,76	7,03	3,01	7,52
2,51	7,09	2,76	7,32	3,02	7,52
2,51	7,09	2,77	7,52	3,03	7,52
2,52	7,06	2,78	7,57	3,03	7,52
2,53	7,09	2,78	7,60	3,04	7,52
2,53	7,06	2,79	7,60	3,05	7,52
2,54	7,06	2,80	7,63	3,06	7,52
2,55	7,06	2,81	7,63	3,06	7,52
2,56	7,06	2,81	7,60	3,07	7,49
2,56	7,06	2,82	7,60	3,08	7,49



t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
3,08	7,52	3,34	9,34	3,60	9,11
3,09	7,54	3,35	9,14	3,60	9,11
3,10	7,54	3,35	9,11	3,61	9,11
3,10	7,54	3,36	9,11	3,62	9,11
3,11	7,54	3,37	9,11	3,63	9,11
3,12	7,54	3,38	9,14	3,63	9,11
3,13	7,54	3,38	9,11	3,64	9,11
3,13	7,54	3,39	9,11	3,65	9,11
3,14	7,54	3,40	9,11	3,65	9,11
3,15	7,54	3,40	9,11	3,66	9,11
3,15	7,54	3,41	9,11	3,67	9,11
3,16	7,54	3,42	9,11	3,67	9,11
3,17	7,54	3,42	9,11	3,68	9,11
3,17	7,54	3,43	9,11	3,69	9,11
3,18	7,54	3,44	9,11	3,69	9,11
3,19	7,52	3,44	9,11	3,70	9,08
3,19	7,52	3,45	9,11	3,71	9,11
3,20	7,52	3,46	9,11	3,72	9,11
3,21	7,52	3,47	9,11	3,72	9,11
3,22	7,52	3,47	9,11	3,73	9,08
3,22	7,52	3,48	9,11	3,74	9,08
3,23	7,52	3,49	9,11	3,74	9,11
3,24	7,52	3,49	9,11	3,75	9,08
3,24	7,52	3,50	9,11	3,76	9,08
3,25	7,52	3,51	9,11	3,76	9,08
3,26	7,52	3,51	9,11	3,77	9,08
3,26	7,52	3,52	9,11	3,78	9,08
3,27	7,52	3,53	9,11	3,78	9,08
3,28	7,52	3,53	9,11	3,79	9,08
3,28	7,52	3,54	9,11	3,80	9,08
3,29	7,52	3,55	9,11	3,81	9,08
3,30	7,52	3,56	9,11	3,81	9,08
3,31	7,52	3,56	9,11	3,82	9,08
3,31	7,49	3,57	9,11	3,83	9,08
3,32	8,88	3,58	9,11	3,83	9,08
3,33	9,22	3,58	9,11	3,84	9,08
3,33	9,28	3,59	9,11	3,85	9,08

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
3,85	9,08	4,11	7,34	4,37	7,69
3,86	9,08	4,12	7,34	4,38	7,69
3,87	9,08	4,13	7,34	4,38	7,69
3,88	9,08	4,13	7,34	4,39	7,69
3,88	9,08	4,14	7,34	4,40	7,69
3,89	9,08	4,15	7,34	4,40	7,69
3,90	9,08	4,15	7,34	4,41	7,69
3,90	9,08	4,16	7,34	4,42	7,69
3,91	9,05	4,17	7,34	4,42	7,66
3,92	9,08	4,17	7,34	4,43	7,66
3,92	9,05	4,18	7,34	4,44	7,66
3,93	9,08	4,19	7,34	4,44	7,66
3,94	9,05	4,19	7,34	4,45	7,66
3,94	9,05	4,20	7,57	4,46	7,66
3,95	9,05	4,21	7,74	4,47	7,66
3,96	9,05	4,22	7,63	4,47	7,66
3,97	9,05	4,22	7,69	4,48	7,66
3,97	9,05	4,23	7,69	4,49	7,66
3,98	9,05	4,24	7,69	4,49	7,66
3,99	9,05	4,24	7,69	4,50	7,66
3,99	9,05	4,25	7,69	4,51	7,66
4,00	9,05	4,26	7,69	4,51	7,66
4,01	9,05	4,26	7,69	4,52	7,66
4,01	9,05	4,27	7,69	4,53	7,66
4,02	9,05	4,28	7,69	4,53	7,66
4,03	8,94	4,28	7,69	4,54	7,66
4,03	7,26	4,29	7,69	4,55	7,66
4,04	7,26	4,30	7,69	4,56	7,66
4,05	7,29	4,31	7,69	4,56	7,66
4,06	7,32	4,31	7,69	4,57	7,66
4,06	7,32	4,32	7,69	4,58	7,66
4,07	7,32	4,33	7,69	4,58	7,66
4,08	7,32	4,33	7,69	4,59	7,63
4,08	7,32	4,34	7,69	4,60	7,63
4,09	7,32	4,35	7,69	4,60	7,63
4,10	7,32	4,35	7,69	4,61	7,63
4,10	7,32	4,36	7,69	4,62	7,63

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
4,63	7,63	4,88	7,60	5,14	7,54
4,63	7,63	4,89	7,60	5,15	7,54
4,64	7,63	4,90	7,60	5,15	7,54
4,65	7,63	4,90	7,60	5,16	7,54
4,65	7,63	4,91	7,60	5,17	7,54
4,66	7,63	4,92	7,60	5,17	7,54
4,67	7,63	4,92	7,57	5,18	7,54
4,67	7,63	4,93	7,57	5,19	7,54
4,68	7,63	4,94	7,57	5,19	7,54
4,69	7,63	4,94	7,57	5,20	7,54
4,69	7,63	4,95	7,57	5,21	7,54
4,70	7,63	4,96	7,57	5,22	7,54
4,71	7,63	4,97	7,57	5,22	7,54
4,72	7,63	4,97	7,57	5,23	7,54
4,72	7,63	4,98	7,57	5,24	7,54
4,73	7,60	4,99	7,57	5,24	7,54
4,74	7,63	4,99	7,57	5,25	7,54
4,74	7,63	5,00	7,57	5,26	7,52
4,75	7,63	5,01	7,57	5,26	7,52
4,76	7,60	5,01	7,57	5,27	7,52
4,76	7,63	5,02	7,57	5,28	7,52
4,77	7,63	5,03	7,57	5,28	7,52
4,78	7,60	5,03	7,57	5,29	7,52
4,78	7,60	5,04	7,57	5,30	7,52
4,79	7,60	5,05	7,57	5,31	7,52
4,80	7,60	5,06	7,57	5,31	7,52
4,81	7,60	5,06	7,54	5,32	7,52
4,81	7,60	5,07	7,54	5,33	7,52
4,82	7,60	5,08	7,54	5,33	7,52
4,83	7,60	5,08	7,54	5,34	7,52
4,83	7,60	5,09	7,54	5,35	7,52
4,84	7,60	5,10	7,54	5,35	7,52
4,85	7,60	5,10	7,54	5,36	7,52
4,85	7,60	5,11	7,54	5,37	7,52
4,86	7,60	5,12	7,54	5,38	7,52
4,87	7,60	5,13	7,54	5,38	7,52
4,88	7,60	5,13	7,54	5,39	7,52

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
5,40	7,52	5,65	7,46	5,91	7,43
5,40	7,52	5,66	7,49	5,92	7,43
5,41	7,52	5,67	7,46	5,92	7,43
5,42	7,49	5,67	7,46	5,93	7,43
5,42	7,49	5,68	7,46	5,94	7,43
5,43	7,49	5,69	7,46	5,94	7,43
5,44	7,49	5,69	7,46	5,95	7,43
5,44	7,49	5,70	7,46	5,96	7,43
5,45	7,49	5,71	7,46	5,97	7,43
5,46	7,49	5,72	7,46	5,97	7,43
5,47	7,49	5,72	7,46	5,98	7,43
5,47	7,49	5,73	7,46	5,99	7,43
5,48	7,49	5,74	7,46	5,99	7,43
5,49	7,49	5,74	7,46	6,00	7,43
5,49	7,49	5,75	7,46	6,01	7,43
5,50	7,49	5,76	7,46	6,01	7,43
5,51	7,49	5,76	7,46	6,02	7,43
5,51	7,49	5,77	7,46	6,03	7,43
5,52	7,49	5,78	7,46	6,03	7,43
5,53	7,49	5,78	7,46	6,04	7,43
5,53	7,49	5,79	7,46	6,05	7,43
5,54	7,49	5,80	7,46	6,06	7,43
5,55	7,49	5,81	7,46	6,06	7,43
5,56	7,49	5,81	7,46	6,07	7,43
5,56	7,49	5,82	7,46	6,08	7,43
5,57	7,49	5,83	7,46	6,08	7,43
5,58	7,49	5,83	7,46	6,09	7,43
5,58	7,49	5,84	7,43	6,10	7,43
5,59	7,49	5,85	7,46	6,10	7,43
5,60	7,49	5,85	7,46	6,11	7,43
5,60	7,49	5,86	7,46	6,12	7,43
5,61	7,49	5,87	7,43	6,13	7,43
5,62	7,49	5,88	7,46	6,13	7,43
5,63	7,49	5,88	7,43	6,14	7,43
5,63	7,49	5,89	7,43	6,15	7,43
5,64	7,49	5,90	7,43	6,15	7,43
5,65	7,49	5,90	7,43	6,16	7,43

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
6,17	7,43	6,42	7,40	6,68	7,40
6,17	7,43	6,43	7,40	6,69	7,40
6,18	7,43	6,44	7,40	6,69	7,43
6,19	7,43	6,44	7,40	6,70	7,40
6,19	7,43	6,45	7,40	6,71	7,40
6,20	7,43	6,46	7,40	6,72	7,40
6,21	7,43	6,47	7,40	6,72	7,40
6,22	7,43	6,47	7,40	6,73	7,40
6,22	7,43	6,48	7,40	6,74	7,40
6,23	7,43	6,49	7,40	6,74	7,40
6,24	7,43	6,49	7,43	6,75	7,40
6,24	7,43	6,50	7,40	6,76	7,40
6,25	7,43	6,51	7,40	6,76	7,40
6,26	7,43	6,51	7,40	6,77	7,40
6,26	7,43	6,52	7,40	6,78	7,40
6,27	7,43	6,53	7,43	6,78	7,40
6,28	7,43	6,53	7,40	6,79	7,40
6,28	7,43	6,54	7,40	6,80	7,40
6,29	7,43	6,55	7,40	6,81	7,40
6,30	7,43	6,56	7,40	6,81	7,40
6,31	7,43	6,56	7,40	6,82	7,40
6,31	7,43	6,57	7,40	6,83	7,40
6,32	7,43	6,58	7,40	6,83	7,40
6,33	7,43	6,58	7,40	6,84	7,40
6,33	7,43	6,59	7,43	6,85	7,40
6,34	7,43	6,60	7,43	6,85	7,40
6,35	7,43	6,60	7,40	6,86	7,40
6,35	7,43	6,61	7,43	6,87	7,40
6,36	7,43	6,62	7,43	6,88	7,40
6,37	7,40	6,63	7,40	6,88	7,40
6,38	7,43	6,63	7,40	6,89	7,40
6,38	7,43	6,64	7,40	6,90	7,40
6,39	7,43	6,65	7,43	6,90	7,40
6,40	7,40	6,65	7,40	6,91	7,40
6,40	7,43	6,66	7,40	6,92	7,40
6,41	7,40	6,67	7,40	6,92	7,40
6,42	7,40	6,67	7,40	6,93	7,40

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
6,94	7,40	7,19	7,40	7,45	7,40
6,94	7,40	7,20	7,40	7,46	7,40
6,95	7,40	7,21	7,37	7,47	7,40
6,96	7,40	7,22	7,37	7,47	7,40
6,97	7,40	7,22	7,37	7,48	7,40
6,97	7,40	7,23	7,40	7,49	7,40
6,98	7,40	7,24	7,40	7,49	7,40
6,99	7,40	7,24	7,40	7,50	7,40
6,99	7,40	7,25	7,40	7,51	7,40
7,00	7,40	7,26	7,40	7,51	7,40
7,01	7,40	7,26	7,40	7,52	7,40
7,01	7,40	7,27	7,40	7,53	7,40
7,02	7,40	7,28	7,40	7,53	7,40
7,03	7,40	7,28	7,40	7,54	7,40
7,03	7,40	7,29	7,40	7,55	7,40
7,04	7,40	7,30	7,40	7,56	7,40
7,05	7,40	7,31	7,40	7,56	7,40
7,06	7,40	7,31	7,40	7,57	7,40
7,06	7,40	7,32	7,40	7,58	7,40
7,07	7,40	7,33	7,40	7,58	7,40
7,08	7,40	7,33	7,40	7,59	7,40
7,08	7,40	7,34	7,40	7,60	7,40
7,09	7,40	7,35	7,40	7,60	7,40
7,10	7,40	7,35	7,40	7,61	7,40
7,10	7,40	7,36	7,40	7,62	7,40
7,11	7,40	7,37	7,40	7,63	7,40
7,12	7,40	7,38	7,40	7,63	7,40
7,13	7,40	7,38	7,40	7,64	7,40
7,13	7,40	7,39	7,40	7,65	7,40
7,14	7,40	7,40	7,40	7,65	7,40
7,15	7,40	7,40	7,40	7,66	7,40
7,15	7,40	7,41	7,40	7,67	7,40
7,16	7,40	7,42	7,40	7,67	7,40
7,17	7,40	7,42	7,40	7,68	7,40
7,17	7,40	7,43	7,40	7,69	7,40
7,18	7,40	7,44	7,40	7,69	7,40
7,19	7,40	7,44	7,40	7,70	7,40

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
7,71	7,40	7,97	7,37	8,22	7,37
7,72	7,40	7,97	7,37	8,23	7,37
7,72	7,40	7,98	7,37	8,24	7,37
7,73	7,40	7,99	7,37	8,24	7,37
7,74	7,40	7,99	7,37	8,25	7,37
7,74	7,40	8,00	7,37	8,26	7,37
7,75	7,40	8,01	7,37	8,26	7,37
7,76	7,40	8,01	7,37	8,27	7,37
7,76	7,40	8,02	7,37	8,28	7,37
7,77	7,40	8,03	7,37	8,28	7,37
7,78	7,40	8,03	7,37	8,29	7,37
7,78	7,40	8,04	7,37	8,30	7,37
7,79	7,40	8,05	7,37	8,31	7,37
7,80	7,40	8,06	7,37	8,31	7,37
7,81	7,40	8,06	7,37	8,32	7,37
7,81	7,40	8,07	7,37	8,33	7,37
7,82	7,40	8,08	7,37	8,33	7,37
7,83	7,40	8,08	7,37	8,34	7,37
7,83	7,40	8,09	7,37	8,35	7,37
7,84	7,40	8,10	7,37	8,35	7,37
7,85	7,37	8,10	7,37	8,36	7,37
7,85	7,40	8,11	7,37	8,37	7,37
7,86	7,40	8,12	7,37	8,38	7,37
7,87	7,37	8,13	7,37	8,38	7,37
7,88	7,40	8,13	7,37	8,39	7,37
7,88	7,40	8,14	7,37	8,40	7,37
7,89	7,37	8,15	7,37	8,40	7,37
7,90	7,37	8,15	7,37	8,41	7,37
7,90	7,37	8,16	7,37	8,42	7,37
7,91	7,37	8,17	7,37	8,42	7,37
7,92	7,37	8,17	7,37	8,43	7,37
7,92	7,37	8,18	7,37	8,44	7,37
7,93	7,37	8,19	7,37	8,44	7,37
7,94	7,37	8,19	7,37	8,45	7,37
7,94	7,40	8,20	7,37	8,46	7,37
7,95	7,37	8,21	7,37	8,47	7,37
7,96	7,37	8,22	7,37	8,47	7,37

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
8,48	7,37	8,74	7,37	8,99	7,37
8,49	7,37	8,74	7,37	9,00	7,37
8,49	7,37	8,75	7,37	9,01	7,37
8,50	7,37	8,76	7,37	9,01	7,37
8,51	7,37	8,76	7,37	9,02	7,37
8,51	7,37	8,77	7,37	9,03	7,37
8,52	7,37	8,78	7,37	9,03	7,37
8,53	7,37	8,78	7,37	9,04	7,37
8,53	7,37	8,79	7,37	9,05	7,37
8,54	7,37	8,80	7,37	9,06	7,37
8,55	7,37	8,81	7,37	9,06	7,37
8,56	7,37	8,81	7,37	9,07	7,37
8,56	7,37	8,82	7,37	9,08	7,37
8,57	7,37	8,83	7,37	9,08	7,37
8,58	7,37	8,83	7,37	9,09	7,37
8,58	7,37	8,84	7,37	9,10	7,37
8,59	7,37	8,85	7,37	9,10	7,37
8,60	7,37	8,85	7,37	9,11	7,37
8,60	7,37	8,86	7,37	9,12	7,37
8,61	7,37	8,87	7,37	9,13	7,37
8,62	7,37	8,88	7,37	9,13	7,37
8,63	7,37	8,88	7,37	9,14	7,37
8,63	7,37	8,89	7,37	9,15	7,37
8,64	7,37	8,90	7,37	9,15	7,37
8,65	7,37	8,90	7,37	9,16	7,37
8,65	7,37	8,91	7,37	9,17	7,37
8,66	7,37	8,92	7,37	9,17	7,37
8,67	7,37	8,92	7,37	9,18	7,37
8,67	7,37	8,93	7,37	9,19	7,37
8,68	7,37	8,94	7,37	9,19	7,37
8,69	7,37	8,94	7,37	9,20	7,37
8,69	7,37	8,95	7,37	9,21	7,37
8,70	7,37	8,96	7,37	9,22	7,37
8,71	7,37	8,97	7,37	9,22	7,37
8,72	7,37	8,97	7,37	9,23	7,37
8,72	7,37	8,98	7,37	9,24	7,37
8,73	7,37	8,99	7,37	9,24	7,37



t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
9,25	7,37	9,51	7,37	9,76	7,37
9,26	7,37	9,51	7,37	9,77	7,37
9,26	7,37	9,52	7,37	9,78	7,37
9,27	7,37	9,53	7,37	9,78	7,37
9,28	7,37	9,53	7,37	9,79	7,37
9,28	7,37	9,54	7,37	9,80	7,37
9,29	7,37	9,55	7,37	9,81	7,37
9,30	7,37	9,56	7,37	9,81	7,37
9,31	7,37	9,56	7,37	9,82	7,37
9,31	7,37	9,57	7,37	9,83	7,37
9,32	7,37	9,58	7,37	9,83	7,37
9,33	7,37	9,58	7,37	9,84	7,37
9,33	7,37	9,59	7,37	9,85	7,37
9,34	7,37	9,60	7,37	9,85	7,37
9,35	7,37	9,60	7,37	9,86	7,37
9,35	7,37	9,61	7,37	9,87	7,37
9,36	7,37	9,62	7,37	9,88	7,37
9,37	7,37	9,63	7,37	9,88	7,37
9,38	7,37	9,63	7,37	9,89	7,37
9,38	7,37	9,64	7,37	9,90	7,37
9,39	7,37	9,65	7,37	9,90	7,37
9,40	7,37	9,65	7,37	9,91	7,37
9,40	7,37	9,66	7,37	9,92	7,37
9,41	7,37	9,67	7,37	9,92	7,37
9,42	7,37	9,67	7,37	9,93	7,37
9,42	7,37	9,68	7,37	9,94	7,37
9,43	7,37	9,69	7,37	9,94	7,37
9,44	7,37	9,69	7,37	9,95	7,37
9,44	7,37	9,70	7,37	9,96	7,37
9,45	7,37	9,71	7,37	9,97	7,37
9,46	7,37	9,72	7,37	9,97	7,37
9,47	7,37	9,72	7,37	9,98	7,37
9,47	7,37	9,73	7,37	9,99	7,34
9,48	7,37	9,74	7,37	9,99	7,37
9,49	7,37	9,74	7,37	10,00	7,37
9,49	7,37	9,75	7,37	10,01	7,37
9,50	7,37	9,76	7,37	10,01	7,37

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
10,02	7,37	10,28	7,37	10,53	7,37
10,03	7,37	10,28	7,37	10,54	7,37
10,03	7,37	10,29	7,37	10,55	7,37
10,04	7,37	10,30	7,37	10,56	7,37
10,05	7,37	10,31	7,37	10,56	7,37
10,06	7,37	10,31	7,37	10,57	7,37
10,06	7,37	10,32	7,37	10,58	7,37
10,07	7,37	10,33	7,37	10,58	7,37
10,08	7,37	10,33	7,37	10,59	7,37
10,08	7,37	10,34	7,37	10,60	7,37
10,09	7,34	10,35	7,37	10,60	7,37
10,10	7,34	10,35	7,37	10,61	7,37
10,10	7,37	10,36	7,37	10,62	7,37
10,11	7,37	10,37	7,37	10,63	7,37
10,12	7,37	10,38	7,37	10,63	7,37
10,13	7,37	10,38	7,37	10,64	7,37
10,13	7,37	10,39	7,37	10,65	7,37
10,14	7,37	10,40	7,37	10,65	7,37
10,15	7,34	10,40	7,37	10,66	7,37
10,15	7,37	10,41	7,34	10,67	7,37
10,16	7,37	10,42	7,37	10,67	7,37
10,17	7,37	10,42	7,37	10,68	7,37
10,17	7,37	10,43	7,37	10,69	7,37
10,18	7,37	10,44	7,34	10,69	7,37
10,19	7,37	10,44	7,37	10,70	7,37
10,19	7,37	10,45	7,37	10,71	7,37
10,20	7,37	10,46	7,37	10,72	7,37
10,21	7,34	10,47	7,37	10,72	7,37
10,22	7,37	10,47	7,37	10,73	7,37
10,22	7,37	10,48	7,37	10,74	7,37
10,23	7,37	10,49	7,37	10,74	7,37
10,24	7,37	10,49	7,37	10,75	7,37
10,24	7,34	10,50	7,37	10,76	7,37
10,25	7,37	10,51	7,37	10,76	7,37
10,26	7,37	10,51	7,37	10,77	7,37
10,26	7,37	10,52	7,37	10,78	7,37
10,27	7,37	10,53	7,37	10,78	7,37

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
10,79	7,37	11,05	7,37	11,31	7,34
10,80	7,37	11,06	7,37	11,31	7,34
10,81	7,37	11,06	7,37	11,32	7,34
10,81	7,37	11,07	7,37	11,33	7,34
10,82	7,37	11,08	7,37	11,33	7,34
10,83	7,37	11,08	7,37	11,34	7,37
10,83	7,37	11,09	7,37	11,35	7,37
10,84	7,37	11,10	7,34	11,35	7,37
10,85	7,37	11,10	7,34	11,36	7,37
10,85	7,37	11,11	7,34	11,37	7,34
10,86	7,34	11,12	7,37	11,38	7,34
10,87	7,37	11,13	7,34	11,38	7,37
10,88	7,34	11,13	7,34	11,39	7,37
10,88	7,37	11,14	7,37	11,40	7,37
10,89	7,37	11,15	7,37	11,40	7,37
10,90	7,37	11,15	7,34	11,41	7,34
10,90	7,34	11,16	7,37	11,42	7,34
10,91	7,37	11,17	7,34	11,42	7,37
10,92	7,34	11,17	7,34	11,43	7,34
10,92	7,37	11,18	7,37	11,44	7,34
10,93	7,37	11,19	7,37	11,44	7,37
10,94	7,37	11,19	7,37	11,45	7,37
10,94	7,34	11,20	7,37	11,46	7,37
10,95	7,34	11,21	7,37	11,47	7,37
10,96	7,34	11,22	7,37	11,47	7,34
10,97	7,34	11,22	7,34	11,48	7,37
10,97	7,37	11,23	7,34	11,49	7,37
10,98	7,37	11,24	7,37	11,49	7,37
10,99	7,34	11,24	7,34	11,50	7,37
10,99	7,34	11,25	7,34	11,51	7,37
11,00	7,34	11,26	7,34	11,51	7,37
11,01	7,37	11,26	7,34	11,52	7,34
11,01	7,37	11,27	7,34	11,53	7,34
11,02	7,37	11,28	7,34	11,53	7,34
11,03	7,37	11,28	7,34	11,54	7,37
11,03	7,37	11,29	7,34	11,55	7,37
11,04	7,37	11,30	7,34	11,56	7,37

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
11,56	7,37	11,82	7,37	12,08	7,37
11,57	7,37	11,83	7,37	12,08	7,34
11,58	7,37	11,83	7,34	12,09	7,37
11,58	7,37	11,84	7,37	12,10	7,37
11,59	7,37	11,85	7,34	12,10	7,37
11,60	7,37	11,85	7,37	12,11	7,34
11,60	7,37	11,86	7,37	12,12	7,34
11,61	7,37	11,87	7,37	12,13	7,34
11,62	7,37	11,88	7,37	12,13	7,34
11,63	7,37	11,88	7,34	12,14	7,37
11,63	7,37	11,89	7,37	12,15	7,34
11,64	7,34	11,90	7,37	12,15	7,34
11,65	7,37	11,90	7,34	12,16	7,37
11,65	7,37	11,91	7,37	12,17	7,37
11,66	7,37	11,92	7,34	12,17	7,37
11,67	7,37	11,92	7,37	12,18	7,37
11,67	7,37	11,93	7,37	12,19	7,37
11,68	7,37	11,94	7,34	12,19	7,37
11,69	7,37	11,94	7,37	12,20	7,37
11,69	7,37	11,95	7,37	12,21	7,34
11,70	7,37	11,96	7,37	12,22	7,37
11,71	7,37	11,97	7,34	12,22	7,34
11,72	7,37	11,97	7,37	12,23	7,37
11,72	7,37	11,98	7,37	12,24	7,37
11,73	7,37	11,99	7,37	12,24	7,37
11,74	7,34	11,99	7,34	12,25	7,37
11,74	7,37	12,00	7,34	12,26	7,37
11,75	7,37	12,01	7,34	12,26	7,37
11,76	7,37	12,01	7,34	12,27	7,34
11,76	7,37	12,02	7,34	12,28	7,37
11,77	7,37	12,03	7,37	12,28	7,34
11,78	7,37	12,03	7,37	12,29	7,34
11,78	7,37	12,04	7,34	12,30	7,34
11,79	7,37	12,05	7,34	12,31	7,37
11,80	7,37	12,06	7,37	12,31	7,37
11,81	7,37	12,06	7,34	12,32	7,37
11,81	7,34	12,07	7,34	12,33	7,34

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
12,33	7,37	12,59	7,37	12,85	7,37
12,34	7,37	12,60	7,37	12,85	7,37
12,35	7,37	12,60	7,34	12,86	7,37
12,35	7,34	12,61	7,37	12,87	7,37
12,36	7,37	12,62	7,37	12,88	7,37
12,37	7,37	12,63	7,37	12,88	7,37
12,38	7,37	12,63	7,37	12,89	7,37
12,38	7,37	12,64	7,37	12,90	7,37
12,39	7,37	12,65	7,37	12,90	7,37
12,40	7,37	12,65	7,37	12,91	7,37
12,40	7,37	12,66	7,37	12,92	7,37
12,41	7,37	12,67	7,37	12,92	7,37
12,42	7,37	12,67	7,37	12,93	7,37
12,42	7,37	12,68	7,37	12,94	7,37
12,43	7,37	12,69	7,37	12,94	7,37
12,44	7,34	12,69	7,37	12,95	7,37
12,44	7,34	12,70	7,37	12,96	7,37
12,45	7,37	12,71	7,37	12,97	7,37
12,46	7,34	12,72	7,37	12,97	7,37
12,47	7,34	12,72	7,37	12,98	7,34
12,47	7,34	12,73	7,37	12,99	7,37
12,48	7,37	12,74	7,37	12,99	7,34
12,49	7,37	12,74	7,37	13,00	7,37
12,49	7,37	12,75	7,37	13,01	7,37
12,50	7,37	12,76	7,37	13,01	7,37
12,51	7,37	12,76	7,37	13,02	7,37
12,51	7,37	12,77	7,37	13,03	7,37
12,52	7,37	12,78	7,37	13,03	7,37
12,53	7,37	12,78	7,37	13,04	7,37
12,53	7,37	12,79	7,37	13,05	7,37
12,54	7,37	12,80	7,37	13,06	7,34
12,55	7,37	12,81	7,37	13,06	7,37
12,56	7,37	12,81	7,37	13,07	7,34
12,56	7,37	12,82	7,37	13,08	7,34
12,57	7,37	12,83	7,37	13,08	7,37
12,58	7,37	12,83	7,37	13,09	7,37
12,58	7,37	12,84	7,37	13,10	7,34

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
13,10	7,37	13,36	7,37	13,62	7,37
13,11	7,34	13,37	7,37	13,63	7,37
13,12	7,37	13,38	7,37	13,63	7,37
13,13	7,37	13,38	7,37	13,64	7,34
13,13	7,37	13,39	7,37	13,65	7,37
13,14	7,37	13,40	7,37	13,65	7,37
13,15	7,37	13,40	7,37	13,66	7,34
13,15	7,37	13,41	7,34	13,67	7,37
13,16	7,37	13,42	7,37	13,67	7,37
13,17	7,37	13,42	7,37	13,68	7,37
13,17	7,37	13,43	7,37	13,69	7,37
13,18	7,37	13,44	7,34	13,69	7,37
13,19	7,37	13,44	7,37	13,70	7,37
13,19	7,37	13,45	7,34	13,71	7,37
13,20	7,37	13,46	7,37	13,72	7,37
13,21	7,37	13,47	7,37	13,72	7,37
13,22	7,37	13,47	7,34	13,73	7,34
13,22	7,37	13,48	7,34	13,74	7,37
13,23	7,37	13,49	7,34	13,74	7,37
13,24	7,34	13,49	7,37	13,75	7,37
13,24	7,37	13,50	7,37	13,76	7,37
13,25	7,37	13,51	7,37	13,76	7,34
13,26	7,37	13,51	7,34	13,77	7,37
13,26	7,37	13,52	7,37	13,78	7,34
13,27	7,37	13,53	7,34	13,78	7,37
13,28	7,37	13,53	7,34	13,79	7,37
13,28	7,37	13,54	7,34	13,80	7,37
13,29	7,37	13,55	7,37	13,81	7,34
13,30	7,37	13,56	7,34	13,81	7,37
13,31	7,34	13,56	7,37	13,82	7,37
13,31	7,37	13,57	7,34	13,83	7,34
13,32	7,37	13,58	7,37	13,83	7,37
13,33	7,37	13,58	7,37	13,84	7,37
13,33	7,34	13,59	7,37	13,85	7,34
13,34	7,37	13,60	7,37	13,85	7,37
13,35	7,37	13,60	7,37	13,86	7,37
13,35	7,37	13,61	7,37	13,87	7,34

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
13,88	7,37	14,13	7,37	14,39	7,37
13,88	7,37	14,14	7,37	14,40	7,37
13,89	7,37	14,15	7,34	14,40	7,32
13,90	7,37	14,15	7,37	14,41	7,32
13,90	7,37	14,16	7,34	14,42	7,32
13,91	7,37	14,17	7,34	14,42	7,34
13,92	7,34	14,17	7,34	14,43	7,32
13,92	7,34	14,18	7,37	14,44	7,32
13,93	7,37	14,19	7,34	14,44	7,32
13,94	7,37	14,19	7,34	14,45	7,32
13,94	7,34	14,20	7,37	14,46	7,32
13,95	7,37	14,21	7,34	14,47	7,29
13,96	7,37	14,22	7,34	14,47	7,29
13,97	7,34	14,22	7,37	14,48	7,32
13,97	7,34	14,23	7,34	14,49	7,29
13,98	7,34	14,24	7,34	14,49	7,29
13,99	7,34	14,24	7,37	14,50	7,29
13,99	7,37	14,25	7,37	14,51	7,29
14,00	7,34	14,26	7,34	14,51	7,29
14,01	7,37	14,26	7,37	14,52	7,29
14,01	7,34	14,27	7,34	14,53	7,29
14,02	7,34	14,28	7,34	14,53	7,29
14,03	7,37	14,28	7,37	14,54	7,29
14,03	7,34	14,29	7,34	14,55	7,29
14,04	7,34	14,30	7,37	14,56	7,29
14,05	7,34	14,31	7,37	14,56	7,29
14,06	7,34	14,31	7,37	14,57	7,29
14,06	7,34	14,32	7,34	14,58	7,29
14,07	7,37	14,33	7,34	14,58	7,29
14,08	7,37	14,33	7,37	14,59	7,29
14,08	7,34	14,34	7,37	14,60	7,29
14,09	7,34	14,35	7,37	14,60	7,29
14,10	7,37	14,35	7,37	14,61	7,26
14,10	7,34	14,36	7,37	14,62	7,29
14,11	7,34	14,37	7,37	14,63	7,29
14,12	7,34	14,38	7,37	14,63	7,29
14,13	7,34	14,38	7,37	14,64	7,29

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
14,65	7,29	14,90	7,29	15,16	7,26
14,65	7,29	14,91	7,29	15,17	7,26
14,66	7,29	14,92	7,29	15,17	7,26
14,67	7,29	14,92	7,29	15,18	7,26
14,67	7,29	14,93	7,29	15,19	7,26
14,68	7,29	14,94	7,29	15,19	7,26
14,69	7,29	14,94	7,29	15,20	7,26
14,69	7,29	14,95	7,29	15,21	7,26
14,70	7,29	14,96	7,29	15,22	7,26
14,71	7,29	14,97	7,26	15,22	7,26
14,72	7,29	14,97	7,26	15,23	7,26
14,72	7,29	14,98	7,29	15,24	7,23
14,73	7,29	14,99	7,29	15,24	7,23
14,74	7,29	14,99	7,29	15,25	7,23
14,74	7,29	15,00	7,29	15,26	7,23
14,75	7,29	15,01	7,29	15,26	7,23
14,76	7,29	15,01	7,29	15,27	7,23
14,76	7,29	15,02	7,29	15,28	7,23
14,77	7,29	15,03	7,26	15,28	7,23
14,78	7,29	15,03	7,26	15,29	7,23
14,78	7,29	15,04	7,26	15,30	7,23
14,79	7,29	15,05	7,26	15,31	7,23
14,80	7,29	15,06	7,26	15,31	7,23
14,81	7,29	15,06	7,26	15,32	7,23
14,81	7,29	15,07	7,26	15,33	7,23
14,82	7,29	15,08	7,26	15,33	7,23
14,83	7,29	15,08	7,26	15,34	7,26
14,83	7,29	15,09	7,26	15,35	7,23
14,84	7,29	15,10	7,26	15,35	7,23
14,85	7,26	15,10	7,26	15,36	7,23
14,85	7,29	15,11	7,26	15,37	7,23
14,86	7,29	15,12	7,26	15,38	7,23
14,87	7,29	15,13	7,26	15,38	7,23
14,88	7,29	15,13	7,26	15,39	7,23
14,88	7,29	15,14	7,26	15,40	7,23
14,89	7,29	15,15	7,26	15,40	7,23
14,90	7,29	15,15	7,26	15,41	7,23



t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
15,42	7,26	15,61	7,26	15,81	7,26
15,42	7,23	15,62	7,26	15,81	7,26
15,43	7,23	15,63	7,26	15,82	7,26
15,44	7,23	15,63	7,23	15,83	7,26
15,44	7,23	15,64	7,26	15,83	7,26
15,45	7,23	15,65	7,23	15,84	7,26
15,46	7,23	15,65	7,26	15,85	7,26
15,47	7,23	15,66	7,26	15,85	7,26
15,47	7,23	15,67	7,23	15,86	7,26
15,48	7,23	15,67	7,26	15,87	7,26
15,49	7,23	15,68	7,26	15,88	7,26
15,49	7,23	15,69	7,23	15,88	7,23
15,50	7,26	15,69	7,23	15,89	7,26
15,51	7,26	15,70	7,26	15,90	7,26
15,51	7,26	15,71	7,26	15,90	7,26
15,52	7,23	15,72	7,26	15,91	7,23
15,53	7,23	15,72	7,26	15,92	7,23
15,53	7,23	15,73	7,26	15,92	7,23
15,54	7,23	15,74	7,26	15,93	7,23
15,55	7,23	15,74	7,26	15,94	7,23
15,56	7,26	15,75	7,26	15,94	7,23
15,56	7,26	15,76	7,26	15,95	7,23
15,57	7,23	15,76	7,26	15,96	7,23
15,58	7,26	15,77	7,26	15,97	7,23
15,58	7,26	15,78	7,23	15,98	7,23
15,59	7,26	15,78	7,26	15,99	7,23
15,60	7,26	15,79	7,26	15,99	7,23
15,60	7,23	15,80	7,23	16,00	7,23

**Tabla AIII.2. Exp 2.**  
**Mezcla: Plátano (60%) – Tomate (20%) – Glicerina (20%)**

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
0,00	7,97	0,26	7,15	0,51	7,15
0,01	7,94	0,26	7,15	0,52	7,12
0,01	7,94	0,27	7,15	0,53	7,12
0,02	7,94	0,28	7,17	0,53	7,12
0,03	7,91	0,28	7,15	0,54	7,12
0,03	7,91	0,29	7,15	0,55	7,12
0,04	7,89	0,30	7,15	0,56	7,12
0,05	7,89	0,31	7,15	0,56	7,12
0,06	7,89	0,31	7,15	0,57	7,12
0,06	7,89	0,32	7,15	0,58	7,12
0,07	7,89	0,33	7,15	0,58	7,12
0,08	7,89	0,33	7,15	0,59	7,12
0,08	7,89	0,34	7,15	0,60	7,12
0,09	7,89	0,35	7,15	0,60	7,12
0,10	7,89	0,35	7,15	0,61	7,12
0,10	7,89	0,36	7,15	0,62	7,12
0,11	7,89	0,37	7,15	0,63	7,12
0,12	7,89	0,38	7,15	0,63	7,12
0,13	7,89	0,38	7,15	0,64	7,12
0,13	7,89	0,39	7,15	0,65	7,09
0,14	7,89	0,40	7,15	0,65	7,09
0,15	7,89	0,40	7,15	0,66	7,09
0,15	7,89	0,41	7,15	0,67	7,09
0,16	7,77	0,42	7,15	0,67	7,09
0,17	7,77	0,42	7,15	0,68	7,09
0,17	7,20	0,43	7,15	0,69	7,09
0,18	7,15	0,44	7,15	0,69	7,09
0,19	7,15	0,44	7,15	0,70	7,06
0,19	7,17	0,45	7,15	0,71	7,06
0,20	7,17	0,46	7,15	0,72	7,06
0,21	7,15	0,47	7,15	0,72	7,06
0,22	7,17	0,47	7,15	0,73	7,06
0,22	7,17	0,48	7,15	0,74	7,06
0,23	7,17	0,49	7,15	0,74	7,03
0,24	7,17	0,49	7,15	0,75	7,03
0,24	7,15	0,50	7,15	0,76	7,03
0,25	7,15	0,51	7,15	0,76	7,03

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
0,77	7,00	1,03	7,23	1,28	7,09
0,78	7,03	1,03	7,20	1,29	7,09
0,78	7,03	1,04	7,20	1,30	7,09
0,79	7,03	1,05	7,20	1,31	7,09
0,80	7,03	1,06	7,20	1,31	7,06
0,81	7,03	1,06	7,20	1,32	7,06
0,81	7,03	1,07	7,17	1,33	7,06
0,82	7,00	1,08	7,17	1,33	7,06
0,83	7,00	1,08	7,17	1,34	7,03
0,83	7,00	1,09	7,17	1,35	7,03
0,84	7,00	1,10	7,15	1,35	7,03
0,85	7,00	1,10	7,15	1,36	7,03
0,85	6,98	1,11	7,15	1,37	7,15
0,86	6,98	1,12	7,15	1,38	7,32
0,87	6,98	1,13	7,12	1,38	7,32
0,88	6,98	1,13	7,12	1,39	7,32
0,88	6,98	1,14	7,12	1,40	7,32
0,89	6,98	1,15	7,09	1,40	7,32
0,90	6,95	1,15	7,09	1,41	7,32
0,90	6,95	1,16	7,09	1,42	7,34
0,91	6,95	1,17	7,09	1,42	7,34
0,92	6,95	1,17	7,06	1,43	7,34
0,92	6,92	1,18	7,06	1,44	7,32
0,93	6,92	1,19	7,23	1,44	7,32
0,94	6,92	1,19	7,20	1,45	7,32
0,94	6,92	1,20	7,20	1,46	7,29
0,95	6,92	1,21	7,17	1,47	7,29
0,96	6,92	1,22	7,17	1,47	7,29
0,97	6,89	1,22	7,17	1,48	7,29
0,97	6,89	1,23	7,17	1,49	7,29
0,98	6,89	1,24	7,15	1,49	7,26
0,99	6,89	1,24	7,15	1,50	7,26
0,99	6,86	1,25	7,15	1,51	7,23
1,00	6,89	1,26	7,15	1,51	7,23
1,01	7,23	1,26	7,12	1,52	7,23
1,01	7,23	1,27	7,12	1,53	7,20
1,02	7,23	1,28	7,12	1,53	7,20

t, días	pH
1,54	7,17
1,55	7,17
1,56	7,17
1,56	7,15
1,57	7,15
1,58	7,12
1,58	7,12
1,59	7,12
1,60	7,09
1,60	7,09
1,61	7,06
1,62	7,06
1,63	7,06
1,63	7,03
1,64	7,03
1,65	7,52
1,65	7,57
1,66	7,60
1,67	7,60
1,67	7,60
1,68	7,60
1,69	7,60
1,69	7,60
1,70	7,60
1,71	7,57
1,72	7,54
1,72	7,52
1,73	7,52
1,74	7,49
1,74	7,46
1,75	7,46
1,76	7,43
1,76	7,40
1,77	7,40
1,78	7,37
1,78	7,34

t, días	pH
1,79	7,34
1,80	7,32
1,81	7,29
1,81	7,29
1,82	7,26
1,83	7,23
1,83	7,20
1,84	7,20
1,85	7,17
1,85	7,15
1,86	7,15
1,87	7,12
1,88	7,09
1,88	7,09
1,89	7,06
1,90	7,40
1,90	7,15
1,91	7,09
1,92	7,06
1,92	7,17
1,93	7,15
1,94	7,15
1,94	7,12
1,95	7,12
1,96	7,09
1,97	7,09
1,97	7,06
1,98	7,03
1,99	7,32
1,99	7,09
2,00	7,06
2,01	7,06
2,01	7,06
2,02	7,03
2,03	7,03
2,03	7,03

t, días	pH
2,04	7,00
2,05	7,00
2,06	7,00
2,06	7,00
2,07	7,23
2,08	6,78
2,08	7,43
2,09	7,29
2,10	7,29
2,10	7,29
2,11	7,29
2,12	7,29
2,13	7,26
2,13	7,26
2,14	7,23
2,15	7,23
2,15	7,20
2,16	7,20
2,17	7,17
2,17	7,15
2,18	7,12
2,19	7,12
2,19	7,09
2,20	7,06
2,21	7,06
2,22	7,03
2,22	7,49
2,23	7,91
2,24	7,94
2,24	7,94
2,25	7,94
2,26	7,94
2,26	7,94
2,27	7,91
2,28	7,89
2,28	7,89

t, días	pH
2,29	7,86
2,30	7,86
2,31	7,83
2,31	7,83
2,32	7,80
2,33	7,80
2,33	7,77
2,34	7,77
2,35	7,77
2,35	7,74
2,36	7,74
2,37	7,71
2,38	7,71
2,38	7,71
2,39	7,69
2,40	7,69
2,40	7,66
2,41	7,66
2,42	7,66
2,42	7,63
2,43	7,63
2,44	7,60
2,44	7,60
2,45	7,60
2,46	7,57
2,47	7,57
2,47	7,54
2,48	7,54
2,49	7,52
2,49	7,52
2,50	7,52
2,51	7,49
2,51	7,49
2,52	7,46
2,53	7,43
2,53	7,43
2,54	7,43

t, días	pH
2,55	7,40
2,56	7,40
2,56	7,37
2,57	7,37
2,58	7,37
2,58	7,34
2,59	7,32
2,60	7,32
2,60	7,29
2,61	7,29
2,62	7,29
2,63	7,26
2,63	7,26
2,64	7,23
2,65	7,23
2,65	7,20
2,66	7,20
2,67	7,17
2,67	7,17
2,68	7,17
2,69	7,15
2,69	7,15
2,70	7,12
2,71	7,12
2,72	7,12
2,72	7,09
2,73	7,09
2,74	7,06
2,74	7,06
2,75	7,06
2,76	7,03
2,76	7,03
2,77	7,00
2,78	8,45
2,78	8,43
2,79	8,40
2,80	8,40

t, días	pH
2,81	8,40
2,81	8,37
2,82	8,37
2,83	8,37
2,83	8,37
2,84	8,34
2,85	8,34
2,85	8,34
2,86	8,34
2,87	8,34
2,88	8,34
2,88	8,34
2,89	8,34
2,90	8,31
2,90	8,31
2,91	8,31
2,92	8,31
2,92	8,31
2,93	8,31
2,94	8,31
2,94	8,28
2,95	8,28
2,96	8,28
2,97	8,28
2,97	8,28
2,98	8,28
2,99	8,28
2,99	8,28
3,00	8,25
3,01	8,25
3,01	8,25
3,02	8,25
3,03	8,25
3,03	8,25
3,04	8,23
3,05	8,23
3,06	8,23

t, días	pH
3,06	8,23
3,07	8,23
3,08	8,23
3,08	8,23
3,09	8,20
3,10	8,20
3,10	8,20
3,11	8,20
3,12	8,20
3,13	8,20
3,13	8,17
3,14	8,17
3,15	8,17
3,15	8,17
3,16	8,17
3,17	8,17
3,17	8,14
3,18	8,14
3,19	8,14
3,19	8,14
3,20	8,14
3,21	8,14
3,22	8,11
3,22	8,11
3,23	8,11
3,24	8,11
3,24	8,11
3,25	8,11
3,26	8,08
3,26	8,08
3,27	8,08
3,28	8,08
3,28	8,06
3,29	8,06
3,30	8,06
3,31	8,06
3,31	8,06

t, días	pH
3,32	8,03
3,33	8,03
3,33	8,03
3,34	8,03
3,35	8,03
3,35	8,00
3,36	8,00
3,37	8,00
3,38	7,97
3,38	7,97
3,39	7,97
3,40	7,97
3,40	7,94
3,41	7,94
3,42	7,94
3,42	7,94
3,43	7,91
3,44	7,91
3,44	7,91
3,45	7,91
3,46	7,89
3,47	7,89
3,47	7,89
3,48	7,89
3,49	7,86
3,49	7,86
3,50	7,86
3,51	7,83
3,51	7,83
3,52	7,83
3,53	7,80
3,53	7,80
3,54	7,80
3,55	7,80
3,56	7,77
3,56	7,77
3,57	7,77

t, días	pH
3,58	7,74
3,58	7,74
3,59	7,74
3,60	7,74
3,60	7,71
3,61	7,71
3,62	7,69
3,63	7,69
3,63	7,69
3,64	7,66
3,65	7,66
3,65	7,66
3,66	7,63
3,67	7,63
3,67	7,63
3,68	7,60
3,69	7,60
3,69	7,60
3,70	7,57
3,71	7,57
3,72	7,57
3,72	7,54
3,73	7,54
3,74	7,52
3,74	7,52
3,75	7,49
3,76	7,49
3,76	7,49
3,77	7,46
3,78	7,46
3,78	7,43
3,79	7,43
3,80	7,43
3,81	7,40
3,81	7,40
3,82	7,37
3,83	7,37

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
3,83	7,37	4,09	8,11	4,35	7,86
3,84	7,34	4,10	8,08	4,35	7,83
3,85	7,34	4,10	8,08	4,36	7,83
3,85	7,32	4,11	8,08	4,37	7,83
3,86	7,32	4,12	8,08	4,38	7,80
3,87	7,32	4,13	8,08	4,38	7,80
3,88	7,29	4,13	8,08	4,39	7,77
3,88	7,29	4,14	8,08	4,40	7,77
3,89	7,26	4,15	8,06	4,40	7,77
3,90	7,26	4,15	8,06	4,41	7,74
3,90	7,26	4,16	8,06	4,42	7,74
3,91	7,23	4,17	8,06	4,42	7,71
3,92	7,23	4,17	8,06	4,43	7,71
3,92	7,20	4,18	8,06	4,44	7,71
3,93	7,20	4,19	8,03	4,44	7,69
3,94	7,20	4,19	8,03	4,45	7,69
3,94	7,17	4,20	8,03	4,46	7,66
3,95	7,17	4,21	8,03	4,47	7,66
3,96	7,17	4,22	8,03	4,47	7,66
3,97	7,15	4,22	8,00	4,48	7,63
3,97	7,15	4,23	8,00	4,49	7,63
3,98	7,15	4,24	8,00	4,49	7,60
3,99	7,12	4,24	7,97	4,50	7,60
3,99	7,12	4,25	7,97	4,51	7,57
4,00	7,09	4,26	7,97	4,51	7,57
4,01	7,09	4,26	7,94	4,52	7,57
4,01	7,09	4,27	7,94	4,53	7,54
4,02	7,06	4,28	7,94	4,53	7,54
4,03	7,06	4,28	7,94	4,54	7,52
4,03	7,03	4,29	7,91	4,55	7,52
4,04	7,03	4,30	7,91	4,56	7,52
4,05	7,03	4,31	7,91	4,56	7,49
4,06	8,06	4,31	7,89	4,57	7,46
4,06	8,17	4,32	7,89	4,58	7,46
4,07	8,14	4,33	7,89	4,58	7,46
4,08	8,14	4,33	7,86	4,59	7,43
4,08	8,11	4,34	7,86	4,60	7,43

t, días	pH
4,60	7,40
4,61	7,40
4,62	7,37
4,63	7,37
4,63	7,34
4,64	7,34
4,65	7,32
4,65	7,32
4,66	7,29
4,67	7,29
4,67	7,29
4,68	7,26
4,69	7,26
4,69	7,23
4,70	7,23
4,71	7,20
4,72	7,20
4,72	7,17
4,73	7,17
4,74	7,17
4,74	7,15
4,75	7,15
4,76	7,12
4,76	7,12
4,77	7,09
4,78	7,09
4,78	7,09
4,79	7,06
4,80	7,06
4,81	7,06
4,81	7,03
4,82	7,03
4,83	7,23
4,83	7,94
4,84	7,97
4,85	7,97
4,85	7,97

t, días	pH
4,86	7,97
4,87	7,97
4,88	7,97
4,88	7,97
4,89	6,61
4,90	6,72
4,90	7,32
4,91	7,23
4,92	7,20
4,92	7,17
4,93	7,17
4,94	7,17
4,94	7,15
4,95	7,15
4,96	7,15
4,97	7,12
4,97	7,12
4,98	7,12
4,99	7,09
4,99	7,09
5,00	7,09
5,01	7,34
5,01	7,37
5,02	7,34
5,03	7,34
5,03	7,32
5,04	7,32
5,05	7,32
5,06	7,29
5,06	7,29
5,07	7,29
5,08	7,26
5,08	7,26
5,09	7,23
5,10	7,23
5,10	7,23
5,11	7,20

t, días	pH
5,12	7,20
5,13	7,20
5,13	7,17
5,14	7,17
5,15	7,17
5,15	7,15
5,16	7,15
5,17	7,15
5,17	7,12
5,18	7,12
5,19	7,09
5,19	7,09
5,20	7,09
5,21	7,09
5,22	7,06
5,22	7,06
5,23	7,06
5,24	7,03
5,24	7,03
5,25	7,03
5,26	7,23
5,26	7,20
5,27	7,17
5,28	7,15
5,28	7,15
5,29	7,15
5,30	7,12
5,31	7,12
5,31	7,12
5,32	7,09
5,33	7,09
5,33	7,09
5,34	7,06
5,35	7,06
5,35	7,06
5,36	7,06
5,37	7,03



t, días	pH
5,38	7,03
5,38	7,23
5,39	7,17
5,40	7,15
5,40	7,15
5,41	7,12
5,42	7,12
5,42	7,12
5,43	7,09
5,44	7,09
5,44	7,09
5,45	7,09
5,46	7,06
5,47	7,06
5,47	7,06
5,48	7,06
5,49	7,03
5,49	7,03
5,50	7,20
5,51	7,17
5,51	7,15
5,52	7,15
5,53	7,12
5,53	7,12
5,54	7,12
5,55	7,09
5,56	7,09
5,56	7,09
5,57	7,09
5,58	7,06
5,58	7,06
5,59	7,06
5,60	7,03
5,60	7,03
5,61	7,23
5,62	7,20
5,63	7,17

t, días	pH
5,63	7,17
5,64	7,17
5,65	7,15
5,65	7,15
5,66	7,15
5,67	7,12
5,67	7,12
5,68	7,12
5,69	7,09
5,69	7,09
5,70	7,09
5,71	7,09
5,72	7,06
5,72	7,06
5,73	7,06
5,74	7,06
5,74	7,03
5,75	7,03
5,76	7,03
5,76	7,03
5,77	7,29
5,78	7,26
5,78	7,23
5,79	7,23
5,80	7,23
5,81	7,23
5,81	7,23
5,82	7,23
5,83	7,23
5,83	7,23
5,84	7,23
5,85	7,23
5,85	7,23
5,86	7,23
5,87	7,23
5,88	7,20
5,88	7,20

t, días	pH
5,89	7,20
5,90	7,20
5,90	7,20
5,91	7,20
5,92	7,17
5,92	7,17
5,93	7,17
5,94	7,17
5,94	7,17
5,95	7,17
5,96	7,15
5,97	7,15
5,97	7,15
5,98	7,15
5,99	7,15
5,99	7,12
6,00	7,12
6,01	7,12
6,01	7,12
6,02	7,12
6,03	7,12
6,03	7,12
6,04	7,12
6,05	7,12
6,06	7,09
6,06	7,09
6,07	7,09
6,08	7,09
6,08	7,09
6,09	7,09
6,10	7,09
6,10	7,06
6,11	7,06
6,12	7,06
6,13	7,06
6,13	7,20
6,14	7,17

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
6,15	7,17	6,40	7,26	6,66	7,23
6,15	7,17	6,41	7,26	6,67	7,23
6,16	7,17	6,42	7,26	6,67	7,23
6,17	7,17	6,42	7,26	6,68	7,23
6,17	7,17	6,43	7,26	6,69	7,23
6,18	7,20	6,44	7,26	6,69	7,23
6,19	7,20	6,44	7,26	6,70	7,23
6,19	7,20	6,45	7,26	6,71	7,23
6,20	7,20	6,46	7,26	6,72	7,23
6,21	7,20	6,47	7,26	6,72	7,23
6,22	7,20	6,47	7,26	6,73	7,23
6,22	7,20	6,48	7,26	6,74	7,23
6,23	7,23	6,49	7,26	6,74	7,23
6,24	7,23	6,49	7,26	6,75	7,23
6,24	7,23	6,50	7,26	6,76	7,23
6,25	7,23	6,51	7,26	6,76	7,23
6,26	7,23	6,51	7,26	6,77	7,23
6,26	7,23	6,52	7,26	6,78	7,23
6,27	7,23	6,53	7,26	6,78	7,20
6,28	7,23	6,53	7,26	6,79	7,23
6,28	7,23	6,54	7,26	6,80	7,23
6,29	7,23	6,55	7,26	6,81	7,23
6,30	7,23	6,56	7,26	6,81	7,23
6,31	7,23	6,56	7,26	6,82	7,23
6,31	7,26	6,57	7,26	6,83	7,20
6,32	7,23	6,58	7,26	6,83	7,20
6,33	7,26	6,58	7,23	6,84	7,20
6,33	7,26	6,59	7,23	6,85	7,20
6,34	7,26	6,60	7,23	6,85	7,20
6,35	7,26	6,60	7,23	6,86	7,20
6,35	7,26	6,61	7,23	6,87	7,20
6,36	7,26	6,62	7,23	6,88	7,20
6,37	7,29	6,63	7,23	6,88	7,20
6,38	7,29	6,63	7,23	6,89	7,20
6,38	7,29	6,64	7,23	6,90	7,20
6,39	7,29	6,65	7,23	6,90	7,20
6,40	7,29	6,65	7,23	6,91	7,20

t, días	pH
6,92	7,20
6,92	7,20
6,93	7,20
6,94	7,20
6,94	7,20
6,95	7,20
6,96	7,20
6,97	7,20
6,97	7,20
6,98	7,20
6,99	7,20
6,99	7,20
7,00	7,20
7,01	7,20
7,01	7,20
7,02	7,20
7,03	7,20
7,03	7,20
7,04	7,20
7,05	7,20
7,06	7,20
7,06	7,20
7,07	7,17
7,08	7,17
7,08	7,17
7,09	7,17
7,10	7,17
7,10	7,17
7,11	7,17
7,12	7,17
7,13	7,17
7,13	7,17
7,14	7,17
7,15	7,17
7,15	7,17
7,16	7,17
7,17	7,17

t, días	pH
7,17	7,17
7,18	7,17
7,19	7,17
7,19	7,17
7,20	7,17
7,21	7,20
7,22	7,17
7,22	7,17
7,23	7,17
7,24	7,17
7,24	7,17
7,25	7,17
7,26	7,20
7,26	7,20
7,27	7,20
7,28	7,20
7,28	7,20
7,29	7,17
7,30	7,17
7,31	7,17
7,31	7,17
7,32	7,17
7,33	7,17
7,33	7,17
7,34	7,17
7,35	7,17
7,35	7,17
7,36	7,17
7,37	7,17
7,38	7,17
7,38	7,17
7,39	7,17
7,40	7,17
7,40	7,17
7,41	7,17
7,42	7,17
7,42	7,17

t, días	pH
7,43	7,17
7,44	7,17
7,44	7,17
7,45	7,17
7,46	7,17
7,47	7,17
7,47	7,17
7,48	7,17
7,49	7,17
7,49	7,17
7,50	7,17
7,51	7,17
7,51	7,17
7,52	7,17
7,53	7,17
7,53	7,17
7,54	7,17
7,55	7,17
7,56	7,17
7,56	7,17
7,57	7,17
7,58	7,17
7,58	7,17
7,59	7,17
7,60	7,17
7,60	7,17
7,61	7,17
7,62	7,17
7,63	7,17
7,63	7,17
7,64	7,17
7,65	7,17
7,65	7,17
7,66	7,17
7,67	7,17
7,67	7,17
7,68	7,17

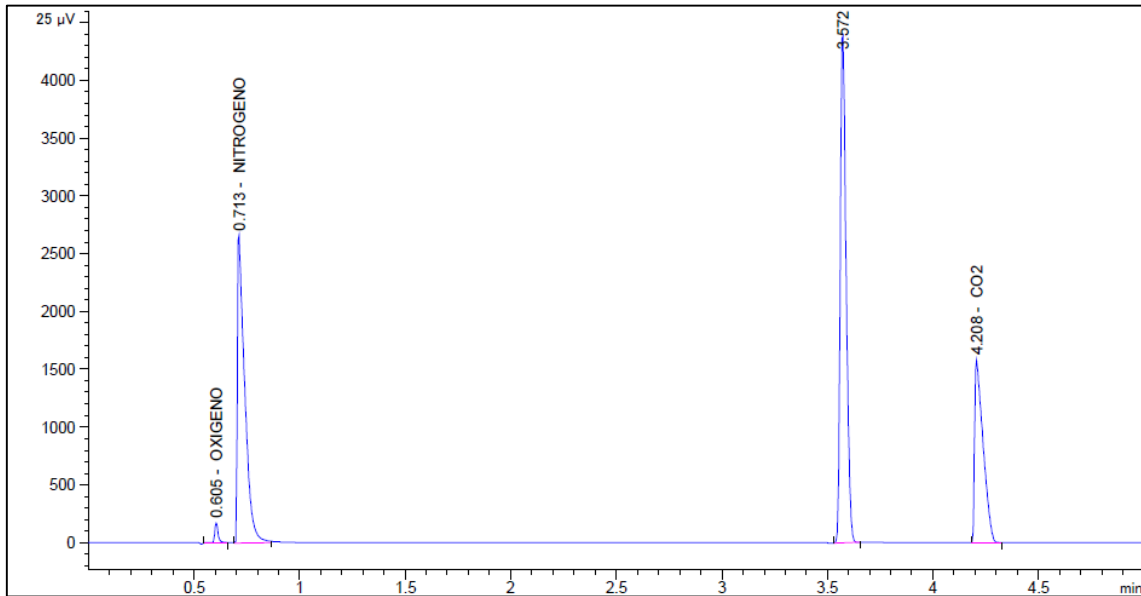
t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
7,69	7,17	7,94	7,29	8,20	7,26
7,69	7,17	7,95	7,29	8,21	7,26
7,70	7,17	7,96	7,29	8,22	7,26
7,71	7,17	7,97	7,29	8,22	7,26
7,72	7,17	7,97	7,29	8,23	7,26
7,72	7,17	7,98	7,29	8,24	7,26
7,73	7,17	7,99	7,29	8,24	7,26
7,74	7,17	7,99	7,29	8,25	7,26
7,74	7,17	8,00	7,29	8,26	7,26
7,75	7,17	8,01	7,29	8,26	7,26
7,76	7,17	8,01	7,29	8,27	7,26
7,76	7,17	8,02	7,29	8,28	7,26
7,77	7,17	8,03	7,29	8,28	7,26
7,78	7,17	8,03	7,26	8,29	7,26
7,78	7,17	8,04	7,26	8,30	7,26
7,79	7,17	8,05	7,26	8,31	7,26
7,80	7,17	8,06	7,26	8,31	7,26
7,81	7,17	8,06	7,26	8,32	7,26
7,81	7,17	8,07	7,26	8,33	7,26
7,82	7,17	8,08	7,26	8,33	7,26
7,83	7,17	8,08	7,26	8,34	7,26
7,83	7,17	8,09	7,26	8,35	7,26
7,84	7,17	8,10	7,26	8,35	7,26
7,85	7,17	8,10	7,26	8,36	7,26
7,85	7,17	8,11	7,26	8,37	7,26
7,86	7,17	8,12	7,26	8,38	7,26
7,87	7,17	8,13	7,26	8,38	7,26
7,88	7,17	8,13	7,26	8,39	7,26
7,88	7,17	8,14	7,26	8,40	7,26
7,89	7,17	8,15	7,26	8,40	7,26
7,90	7,23	8,15	7,26	8,41	7,26
7,90	7,26	8,16	7,26	8,42	7,26
7,91	7,29	8,17	7,26	8,42	7,26
7,92	7,29	8,17	7,26	8,43	7,26
7,92	7,29	8,18	7,26	8,44	7,26
7,93	7,29	8,19	7,26	8,44	7,26
7,94	7,29	8,19	7,26	8,45	7,26

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
8,46	7,26	8,72	7,23	8,97	7,23
8,47	7,26	8,72	7,23	8,98	7,23
8,47	7,26	8,73	7,23	8,99	7,23
8,48	7,26	8,74	7,23	8,99	7,23
8,49	7,26	8,74	7,23	9,00	7,23
8,49	7,26	8,75	7,23	9,01	7,23
8,50	7,26	8,76	7,23	9,01	7,23
8,51	7,26	8,76	7,23	9,02	7,23
8,51	7,26	8,77	7,23	9,03	7,23
8,52	7,26	8,78	7,23	9,03	7,23
8,53	7,26	8,78	7,23	9,04	7,23
8,53	7,26	8,79	7,23	9,05	7,23
8,54	7,26	8,80	7,23	9,06	7,23
8,55	7,26	8,81	7,23	9,06	7,23
8,56	7,23	8,81	7,23	9,07	7,23
8,56	7,26	8,82	7,23	9,08	7,23
8,57	7,26	8,83	7,23	9,08	7,23
8,58	7,26	8,83	7,23	9,09	7,23
8,58	7,26	8,84	7,23	9,10	7,23
8,59	7,23	8,85	7,23	9,10	7,23
8,60	7,26	8,85	7,23	9,11	7,23
8,60	7,23	8,86	7,23	9,12	7,23
8,61	7,23	8,87	7,23	9,12	7,23
8,62	7,23	8,88	7,23	9,13	7,23
8,63	7,23	8,88	7,23	9,14	7,23
8,63	7,23	8,89	7,23	9,15	7,23
8,64	7,23	8,90	7,23	9,15	7,23
8,65	7,23	8,90	7,23	9,16	7,23
8,65	7,23	8,91	7,23	9,17	7,23
8,66	7,23	8,92	7,23	9,17	7,23
8,67	7,23	8,92	7,23	9,18	7,23
8,67	7,23	8,93	7,23	9,19	7,23
8,68	7,23	8,94	7,23	9,19	7,23
8,69	7,23	8,94	7,23	9,20	7,23
8,69	7,23	8,95	7,23	9,21	7,23
8,70	7,23	8,96	7,23	9,22	7,23
8,71	7,23	8,97	7,23	9,22	7,23

t, días	pH	t, días	pH	t, días	pH
9,23	7,23	9,49	7,23	9,74	7,23
9,24	7,23	9,49	7,23	9,75	7,23
9,24	7,23	9,50	7,23	9,76	7,23
9,25	7,23	9,51	7,23	9,76	7,23
9,26	7,23	9,51	7,23	9,77	7,23
9,26	7,23	9,52	7,23	9,78	7,23
9,27	7,23	9,53	7,23	9,78	7,23
9,28	7,23	9,53	7,23	9,79	7,23
9,28	7,23	9,54	7,23	9,80	7,23
9,29	7,23	9,55	7,23	9,81	7,23
9,30	7,23	9,56	7,23	9,81	7,23
9,31	7,23	9,56	7,23	9,82	7,23
9,31	7,23	9,57	7,23	9,83	7,23
9,32	7,23	9,58	7,23	9,83	7,23
9,33	7,23	9,58	7,23	9,84	7,23
9,33	7,23	9,59	7,23	9,85	7,23
9,34	7,23	9,60	7,23	9,85	7,23
9,35	7,23	9,60	7,23	9,86	7,23
9,35	7,23	9,61	7,23	9,87	7,23
9,36	7,23	9,62	7,23	9,87	7,23
9,37	7,23	9,62	7,23	9,88	7,23
9,37	7,23	9,63	7,23	9,89	7,23
9,38	7,23	9,64	7,23	9,90	7,23
9,39	7,23	9,65	7,23	9,90	7,23
9,40	7,23	9,65	7,23	9,91	7,23
9,40	7,23	9,66	7,23	9,92	7,23
9,41	7,23	9,67	7,23	9,92	7,23
9,42	7,23	9,67	7,23	9,93	7,23
9,42	7,23	9,68	7,23	9,94	7,23
9,43	7,23	9,69	7,23	9,94	7,23
9,44	7,23	9,69	7,23	9,95	7,23
9,44	7,23	9,70	7,23	9,96	7,23
9,45	7,23	9,71	7,23	9,97	7,23
9,46	7,23	9,72	7,23	9,97	7,23
9,47	7,23	9,72	7,23	9,98	7,23
9,47	7,23	9,73	7,23	9,99	7,23
9,48	7,23	9,74	7,23	10,00	7,23

## ANEXO IV

### Análisis de la composición del biogás obtenido en los experimentos realizados



**Figura AIV.1. Cromatograma**