



DEPARTAMENTO DE CRISTALOGRAFÍA, MINERALOGÍA Y QUÍMICA
AGRÍCOLA

TESIS DOCTORAL:

Ensayo de estabilización y reparación de digestores anaerobios, con residuos industriales y agroalimentarios, en un proceso de *CO*-digestión anaerobia.

Presentada por Antonio José Alonso Contreras para optar al
grado de doctor por la Universidad de Sevilla

Sevilla, Mayo 2017

Ensayo de estabilización y reparación de digestores anaerobios, con residuos industriales y agroalimentarios, en un proceso de co-digestión anaerobia.

El Director

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Julián', written in a cursive style.

D.Julián Lebrato Martínez

El Tutor

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Julián', written in a cursive style.

D.Julián Lebrato Martínez



**Programa de Doctorado Recursos Naturales y Medioambiente
RD. 99/2011**

D. Antonio José Alonso Contreras

A handwritten signature in blue ink, which appears to read "Antonio J. Alonso Contreras". The signature is written in a cursive style with a horizontal line through the middle of the name.

Agradecimientos

La presente investigación ha sido realizada en el Grupo de Tratamiento de Aguas Residuales de la Escuela Universitaria Politécnica de la Universidad de Sevilla el cuál ha financiado la totalidad de la Tesis.

Al Dr D. Julián Lebrato Martínez, director de este trabajo, les agradezco su dedicación, su interés y valiosas aportaciones, así como haberme facilitado todos los medios necesarios para su realización.

Al Dr. D. Fernando Fernandez Polanco, “Padrino” del Grupo TAR, gracias por ser el guía en el camino anaerobio.

A todas y cada una de las personas que trabajan o han trabajado en el Grupo TAR, que me ofrecieron su inestimable colaboración en la realización del trabajo experimental.

Agradecer en especial a Dolores Garvi Higuera, gran profesional y amiga, por el trato recibido durante la elaboración de este proyecto en el plano profesional y especialmente en el plano personal.

A mi amigo Carlos, compañero de trabajo y excelente investigador, por la generosa ayuda que me ha brindado en la elaboración del proyecto, sus brillantes ideas y sobre todo por su amistad. Hemos pasado muchos buenos momentos juntos de los que me llevo grandes recuerdos.

Finalmente, quisiera agradecer también el más importante de los apoyos, el de mi familia, a los que les debo todo. Gracias a mis padres, a mi hermana y a Marinieves por su paciencia, comprensión y ayuda.

INDICE

Agradecimientos	6
Resumen.....	10
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1 Enfoque de la investigación.	14
1.2 Hipótesis y objetivos de trabajo del grupo de investigación (TAR).....	18
1.2.1 Hipótesis de partida.	19
1.2.2 Objetivos de trabajo.....	20
1.4 Fundamentos biológicos de la digestión anaerobia.....	21
1.5. Bioquímica y microbiología del proceso anaerobio.	23
1.5.1 Hidrólisis.....	24
1.5.2 Acidogénesis.....	24
1.5.3. Acetogénesis.....	25
1.5.4. Metanogénesis.....	26
1.6 Parámetros del proceso de digestión anaerobia.	27
1.6.1 Parámetros de control.	27
1.6.2. Parámetros de operación y diseño.	33
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	40
2.1 Residuos estudiados.....	40
2.1.1 Fango Digerido y Fango Mixto.	41
2.1.2 Residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.....	45
2.1.3 Lixiviado.....	47
2.1.4 Aguas glicerosas (Glicerina).....	50
2.1.5. Lactosuero.	53
2.2. Descripción de los Reactores anaerobios.	54
2.2.1 Microdigestores de una sola etapa.	54
2.2.2. Descripción de la unidad experimental del digestor anaerobio piloto.....	62
2.3 Descripción de los Métodos de Análisis.....	85
2.3.1 Determinación del pH (APHA, 4500-H ⁺ ,2015) y de la temperatura.	85
2.3.2 Demanda Química de Oxígeno (DQO) (APHA, 5220 B, 2005).	85
2.3.3 Alcalinidad Total.....	88
2.3.4. Ácidos Grasos Volátiles.	90

2.3.5 Sólidos Totales (ST): Sólidos totales fijos (STF) y Sólidos totales Volátiles (STV) (APHA, 2540 D, 1992).	92
2.3.6. Determinación de la producción de biogás.....	94
2.4 Instalaciones e instrumentación de laboratorio.	99
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	110
3.1 Caracterización de los residuos y fangos utilizados.	112
3.2 Ensayo con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.	114
3.3 Ensayo con Lixiviado.....	129
3.4 Ensayo con Glicerina.	2
3.5 Ensayo con Lactosuero.....	207
3.6 Ensayo Mezcla de Lactosuero y Glicerina.	231
4. CONCLUSIONES	257
4.1 Conclusiones globales.	258
4.2 Conclusiones individuales.	259
4.3 Lineas de futuro.	261
5. BIBLIOGRAFÍA.....	263
6. ANEXOS	267
6.1 Figuras	267
6.2 Conocimiento de procesos.....	267

Resumen

Una alternativa para la gestión de residuos puede ser la co-digestión anaerobia, las implicaciones del tratamiento en aguas residuales, los requerimientos a nivel de sustrato, los productos obtenidos y los mecanismos de digestión, son precisamente el tema en estudio a desarrollar en este proyecto, a través de la puesta en funcionamiento de una experiencia real en una planta piloto de digestión anaerobia.

Para la realización del estudio se construye una instalación de digestión anaerobia a escala piloto. El correcto montaje de la estructura y el control de parámetros indicadores del proceso fueron fundamentales para el correcto desarrollo de la experiencia.

Se realizaron distintos análisis por diferentes métodos estándar, para la obtención de los datos necesarios que nos permiten estudiar el funcionamiento del proceso de co-digestión anaerobia.

El objetivo principal de este proyecto es determinar el potencial del co-tratamiento de lodos de EDAR con residuos industriales y orgánicos de difícil gestión, vía digestión anaerobia. Estudio de su funcionamiento en diferentes dosis de alimentación y mezcla, y análisis del potencial reparador de estos residuos en un digester en condiciones de trabajo no viables.

Los resultados obtenidos presentan la viabilidad de diversos residuos en un proceso de co-digestion anaerobia y al Lactosuero como residuo reparador de digestores no viables, además de estabilizador de residuos no funcionales en solitario, como las aguas glicerosas.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Enfoque de la investigación.

1.2 Hipótesis y objetivos de trabajo del grupo de investigación (TAR).

- 1.2.1 Hipótesis de partida.

- 1.2.2 Objetivos de trabajo.

1.3 Fundamentos teóricos y experimentales de la investigación.

1.4 Fundamentos biológicos de la digestión anaerobia.

1.5. Bioquímica y microbiología del proceso anaerobio.

1.6 Parámetros del proceso de digestión anaerobia.

- 1.6.1 Parámetros de control.

- 1.6.2. Parámetros de operación y diseño.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Enfoque de la investigación.

En el ámbito industrial, la situación económica actual deriva desde una industria consumista a una industria en la que premia el ahorro y la eficiencia energética. La industria debe apostar por una tecnología que genere más energía y a la vez no produzca grandes cantidades de CO₂ que aumenten la tasa de CO₂ del país, es decir, se valoran los KW generados como toneladas métricas (Tm) de CO₂ equivalentes necesarias para conseguir esa misma cantidad de energía. Una alternativa para mejorar la eficiencia energética puede ser el aprovechamiento de los recursos y la valorización de los residuos. Los residuos juegan un papel importante en el ahorro, puesto que con una gestión eficiente y un planteamiento adecuado en su valorización, se puede hacer de un residuo de proceso anteriormente no valorado, una fuente de energía propia que permita el autoabastecimiento de la planta o un ingreso económico tras su venta como subproducto en otra actividad. Con esto se persigue reducir la generación de residuos o, cuando su producción es inevitable, promover su reutilización o reciclaje, así como su eliminación por una vía segura, mejorando la eficiencia en el uso de los recursos y mitigando el impacto de los mismos en la salud y el medio ambiente.

Un tipo de residuo que presenta oportunidades atractivas de gestión son los fangos o lodos generados en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR).

Una estación depuradora de aguas residuales trabaja con la premisa de perfeccionar los objetivos de depuración, mejorando el funcionamiento de los procesos con innovación constante y los métodos energéticamente más eficientes.

La creciente degradación de las aguas superficiales y de las subterráneas, debido a los vertidos de origen industrial con altas cargas orgánicas, hacen que las técnicas de depuración aerobias convencionales (lechos bacterianos, fangos activados) no sean la mejor alternativa para tratar este tipo de vertidos. En consecuencia, se han desarrollado otros procesos de depuración como puede ser la digestión anaerobia, que aún a las premisas de la EDAR junto con el aprovechamiento como recurso de los residuos generados.

Aunque se hable de ella en profundidad en apartados posteriores, se puede resumir que la digestión anaerobia cuenta con un cultivo biológico de microorganismos que se alimentan de materia orgánica, asimilándola y dando lugar a una mezcla de gases con presencia mayoritaria de metano y CO₂. A la mezcla de gases producidos durante este proceso se le denomina “gas de digestión” o “biogás” (Terreros-Mecalco, J., Olmos, A. et al; 2009).

La alta capacidad calorífica del gas de digestión, aproximadamente 23000 kJ/nm³ (Degremont, 2011), es aprovechada en los equipos de cogeneración para producir energía eléctrica y calorífica. La electricidad obtenida gracias al aprovechamiento del biogás se puede vender en caso de producirse en exceso, asimismo existe la posibilidad de inyectar el biogás a la red de distribución de gas natural e incluso de utilizarlo como combustible para vehículos. La opción más sencilla es emplearlo para abastecer las propias instalaciones de tratamiento, esto puede suponer un importante ahorro económico, dado que disminuye la energía eléctrica que se debe importar de la red. Por tanto, cualquier mejora en los rendimientos del proceso que conlleven un incremento en la producción de gas, contribuye a una mayor producción de electricidad y a un mayor ahorro energético.

Otra opción como mejora de rendimientos en el proceso, es aprovechar distintos residuos orgánicos industriales de difícil gestión, que añadidos a procesos de digestión anaerobia convencionales, no supongan una inestabilidad o inconveniente en ellos y potencien la generación de biogás. Este tipo de digestión anaerobia conjunta es denominada CO-digestión y aúna las premisas establecidas en una EDAR junto con el aprovechamiento de residuos de difícil gestión, siendo una gran alternativa para su tratamiento.

El proceso de CO-digestión consiste en el tratamiento de dos o más residuos de distinta naturaleza de forma conjunta, con ello se pretende que residuos que habitualmente son tratados individualmente y presentan efectos positivos, tanto a nivel de proceso como desde un punto de vista económico, potencien estos efectos trabajando en conjunto.

Esta digestión en conjunto o CO-digestión es una opción muy interesante dada la gran cantidad de ventajas que presenta y las perspectivas de trabajo que posibilita.

Los beneficios de la CO-digestión desde un punto de vista de operación o de proceso se deben principalmente a (Esteban Gutiérrez, M. 2014):

- Un aumento en el rendimiento metanogénico o en la capacidad de producir metano.
- Una mejora de la estabilidad del proceso por la complementariedad de los residuos tratados.
- La posibilidad de gestión de residuos cuyo tratamiento no es viable o es problemático si se lleva a cabo de manera aislada.
- Una mejora de la calidad del producto final en cuanto al contenido de nutrientes, que lo hace más atractivo para su aplicación a suelos.

Con esta tecnología se consigue una operatividad muy buena generando mayor cantidad de energía sin aumentar la tasa de CO₂, aprovechando los residuos y reduciendo el coste asociado.

Asimismo, se obtiene un fango digerido estabilizado y se disminuyen los requerimientos de espacio para el almacenamiento o los gastos derivados del transporte, abaratando los costes de gestión.

Con estas características la CO-digestión anaerobia se ha convertido en una de las tecnologías de producción de bioenergía muy eficientes desde el punto de vista energético, y una de las más beneficiosas para el medio ambiente.

Investigar en esta tecnología es muy positivo para la EDAR, que puede convertirse en gestora de residuos, generando un plus de energía y mejorando las emisiones de CO₂ del país.

Por otro lado, el uso de un co-sustratos en ocasiones resulta ventajoso en términos económicos, las ventajas de la CO-digestión radican esencialmente en que implica la combinación de flujos de residuos distintos en una única instalación y permite tratar mayores cantidades de residuos en instalaciones centralizadas a gran escala.

Una revisión publicada recientemente sobre procesos de CO-digestión anaerobia revela que los principales residuos utilizados son: fango de depuradora (27%), estiércol de distinto origen (25%), FORSU (Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos) (21%), residuos orgánicos industriales (13%), cultivos (5%), residuos de actividades agrícolas (4%) y residuos de animales y de industrias cárnicas (4%) (Mata-Álvarez et al., 2011).

1.2 Hipótesis y objetivos de trabajo del grupo de investigación (TAR).

La aplicación de la investigación y el desarrollo de los procesos anaerobios en EDAR son relativamente recientes. Aun presentando ventajas significativas, su aplicación industrial necesita mejoras en las técnicas de operación y proceso. Se pueden encontrar problemas que afectan al rendimiento del proceso, como son: la existencia de zonas muertas, los largos periodos de arranque y tiempos de decantación, la pérdida de biomasa, la agitación, la inhibición por sobrecarga y el desconocimiento de la estrategia de alimentación más adecuada que evite la acidificación del digestor.

En cuanto a técnicas anaerobias de CO-digestión los principales problemas encontrados son la toxicidad e inestabilidad del proceso, debida a la complejidad de los residuos tratados. Existen diferentes tipos de residuos aplicables a la CO-digestión anaerobia, residuos con un gran rendimiento de proceso y residuos de difícil tratamiento, los cuáles son estudiados en esta tesis para buscar perspectivas viables de aprovechamiento.

Aprovechando los conocimientos adquiridos, se estudia el funcionamiento de cócteles de residuos (co-sustratos) que mejoren la producción final de biogás y disminuyan la cantidad final de fangos, debido a los mejores rendimientos en la degradación de la materia orgánica, suma de fangos mixtos de depuradora y co-sustratos.

También se experimentan distintos métodos de recuperación de digestores, donde los residuos añadidos son tóxicos o perjudiciales para el proceso de digestión anaerobia, por lo que la producción de biogás decae.

El estudio de la CO-digestión anaerobia, las implicaciones del tratamiento en aguas residuales, los requerimientos a nivel de sustrato, los productos obtenidos y los mecanismos de digestión, tema central del estudio a desarrollar en este proyecto, se realiza a través de la puesta en funcionamiento de una experiencia real en una planta piloto de digestión anaerobia, con ensayos previos de viabilidad a través de la tecnología *Biochemical Methane Potential* (BMP) y ensayos de rendimiento en digestores piloto de agitación continua.

Por otro lado, la investigación no sólo se orienta a la determinación de las características del residuo y la máxima producción de biogás, sino hacia los aspectos tecnológicos y fundamentales de operación, que han sido optimizados para un elevado rendimiento y un correcto diseño de los CO-digestores a escala industrial.

1.2.1 Hipótesis de partida.

Las hipótesis de partida del siguiente trabajo según experiencias de estudio anteriores son:

- 1.- Es posible establecer el estudio de la CO-digestión anaerobia en digestores piloto de laboratorio, tanto en procesos continuos como discontinuos, utilizando la tecnología BMP o recreando el digestor de una EDAR real a escala piloto y procesándolo de la misma forma.
- 2.- Es posible aprovechar residuos o mezclas de residuos orgánicos industriales de difícil gestión, perjudiciales para el medio ambiente, como sustratos en un proceso de digestión anaerobia, generando un extra de biogás producido en su CO-digestión con fangos mixto de depuradora.
- 3.- Es posible establecer un régimen de trabajo en un digestor anaerobio estabilizando la producción de gas, con una alimentación de un conjunto de residuos que anteriormente por separado han sido tóxicos para el digestor y que juntos en dosis adecuadas no interfieren en el proceso anaerobio.
- 4.- Es posible recuperar un proceso de CO-digestión anaerobia de dos residuos no funcionales, añadiendo un tercero que potencie las cualidades de los residuos anteriores estabilizando el proceso y recuperando el digestor anaerobio a condiciones óptimas de proceso.
- 5.- Es posible extrapolar los datos obtenidos en el estudio de digestores de una etapa con la tecnología BMP a digestores piloto de mayor volumen, obteniendo resultados similares.

1.2.2 Objetivos de trabajo.

Para el estudio y comprobación de las hipótesis anteriormente descritas se plantean los siguientes objetivos de trabajo:

- 1.- Estudio de diferentes residuos (Residuo del deshuesado de aceituna de mesa, Lixiviado de vertedero, Aguas glicerosas y Suero ácido de empresas lácteas) en CO-digestión anaerobia en micro-digestores de una sola etapa con la tecnología BMP.
- 2.- Evaluar la viabilidad de los residuos orgánicos de difícil gestión anteriormente nombrados en un proceso anaerobio, comparando su producción de gas con la generada por un residuo ya conocido.
- 3.- Evaluar la viabilidad de las mezclas de diferentes residuos orgánicos en un proceso anaerobio, estudiando el incremento en la producción de gas del conjunto de residuos con respecto a su producción de gas individual.
- 4.- Simulación de un digestor anaerobio piloto con un volumen de 7 litros, para el estudio de la CO-digestión de los residuos orgánicos industriales. Montaje y puesta en marcha del mismo.
- 5.- Ensayo del proceso anaerobio en el digestor piloto de laboratorio con residuos no funcionales, estudiando la viabilidad de recuperación del mismo con la adición de un tercer residuo.
- 6.- Establecer un régimen de alimentación del digestor anaerobio con una mezcla de residuos en cantidades adecuadas, consiguiendo una estabilización del proceso y una producción de biogás constante y significativa.

1.4 Fundamentos biológicos de la digestión anaerobia.

La naturaleza por sí sola realiza el proceso de digestión anaerobia o biometanización de forma natural en biotopos muy diferentes; sedimentos lacustres y marinos, arrozales, micro-ambiente anóxico del suelo (caso de vertederos), en el tracto digestivo del hombre y animales rumiantes, incluso en algunas especies de termitas. (Mollela, 2000).

En el proceso de digestión anaerobia o biometanización se produce la degradación de materia orgánica biológica en ausencia de oxígeno, por la acción conjunta de una serie de microorganismos anaerobios. Como consecuencia de la degradación anaerobia, la materia orgánica es convertida principalmente en biogás, cuyos componentes mayoritarios son el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2) (McInerney et al., 1979).

El lento crecimiento de los microorganismos formadores de metano condiciona las diferentes ventajas e inconvenientes de una digestión anaerobia, en comparación a una digestión aerobia. Sin embargo, las ventajas obtenidas en un tratamiento anaerobio lo hacen competitivo frente al proceso aerobio.

La principal ventaja del proceso anaerobio es la producción de biogás como fuente de energía, junto a ella se puede añadir el beneficio de no necesitar un aporte energético para la oxidación de la materia orgánica. Además, es un proceso capaz de tratar efluentes de alta carga orgánica (como pueden ser los de la industria agroalimentaria, química, cervecera, papelera, etc.), con menor requerimiento de nutrientes. Por otro lado, la producción de fangos biológicos es muy baja, 0.08-0.15 kg SSV. Kg DQO⁻¹ frente a 0.7 kg SSV kg DQO⁻¹ en los aerobios. En última instancia al tratarse de sistemas cerrados, se reducen las posibles fuentes de mal olor. (Ruiz Cabrera, C. M. 2002).

No obstante, el tratamiento anaerobio tiene como gran desventaja la dificultad de operación en condiciones inestables, debido a la gran sensibilidad a las perturbaciones de las poblaciones microbianas que intervienen en el proceso, y la susceptibilidad a las posibles sobrecargas. Otro punto en contra es el requerimiento de altos tiempos de retención o diferentes configuraciones de proceso para obtener una adecuada estabilización del residuo (Bastone, 2000).

En cualquier caso, la tecnología anaerobia, además de constituir una alternativa ventajosa frente a los procesos aerobios convencionales, debe ser mirada como etapa individual de un proceso global de depuración, combinando procesos aerobios, anaerobios y/o químicos.

1.5. Bioquímica y microbiología del proceso anaerobio.

El proceso global de digestión anaerobia es el resultado de una serie de reacciones metabólicas realizadas por los distintos grupos tróficos que intervienen en el proceso. Las principales reacciones bioquímicas ocurridas en el proceso anaerobio habitual se pueden clasificar en cuatro etapas: la hidrólisis, la acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis.

En la figura 1, se observa el modelo propuesto por Zeikus en 1979 (Zeikus, 1979, 1981), ampliamente aceptado hoy en día, que agrupa las principales reacciones que describen el proceso.

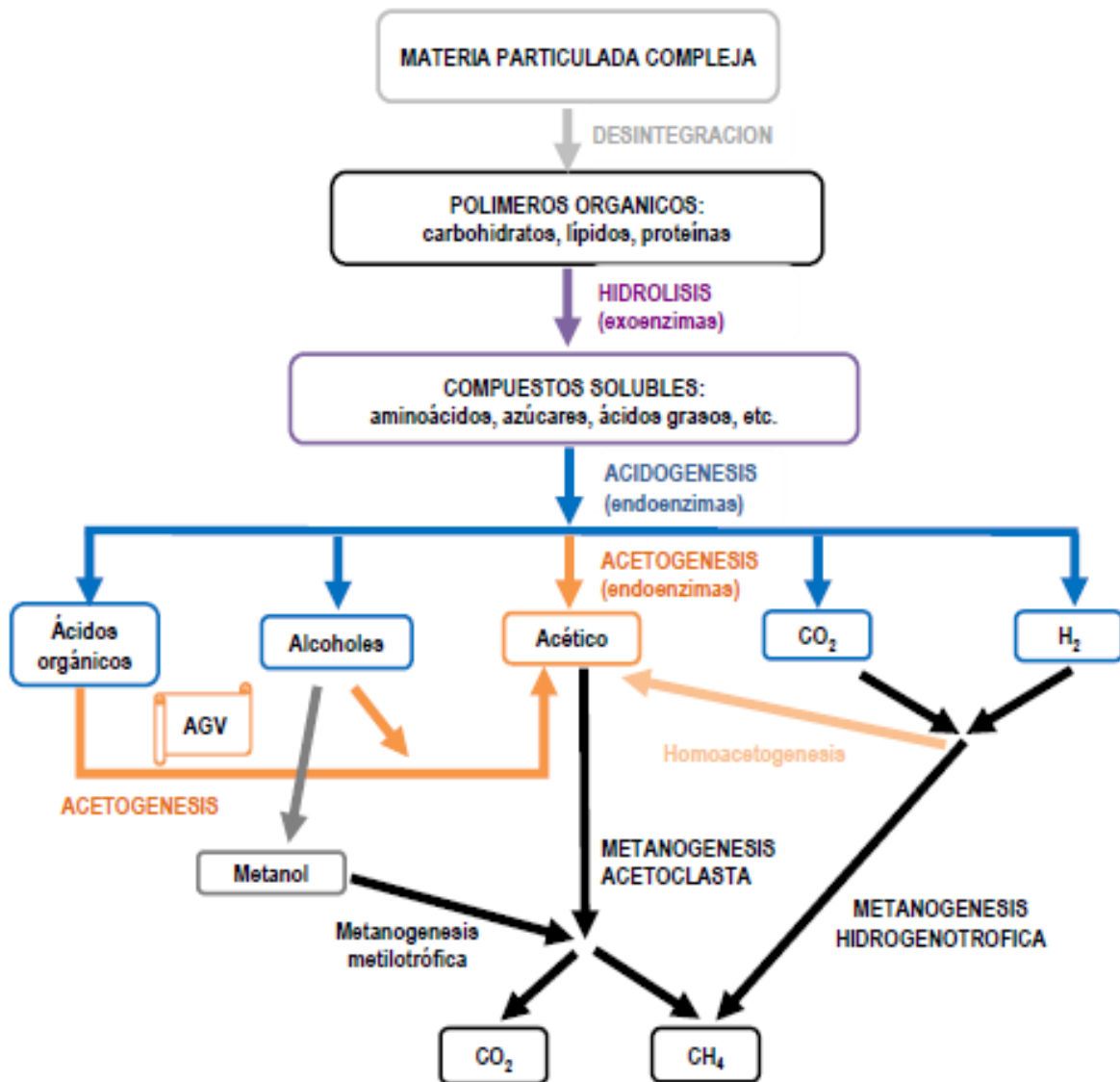


Figura 1: Esquema en el que se representan las principales etapas del metabolismo anaerobio así como los compuestos más representativos del proceso (Zeikus, 1979, 1981).

1.5.1 Hidrólisis.

La primera etapa del proceso es la hidrólisis, llevada a cabo por enzimas extracelulares secretadas por bacterias hidrolíticas. Son bacterias típicas de este grupo las anaerobias estrictas (*Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus* y *Bacillus* sp.) y las facultativas (*Escherichia Coli* y *Bacillus* sp.), (Lebrato, 1990).

En la hidrólisis se degradan los polímeros orgánicos complejos e insolubles, producidos tras una primera desintegración (lípidos, proteínas, etc.), los cuales no son accesibles en primera instancia, transformándose en compuestos simples de carácter monomérico y solubles en agua (aminoácidos, ácidos grasos, etc.), que sí pueden ser utilizados directamente por los organismos anaerobios.

La mayoría de estos compuestos son fácilmente hidrolizables, sin embargo, cuando los sustratos a hidrolizar son sólidos o poco solubles, son difíciles de biodegradar y pueden resultar limitantes en el desarrollo del proceso (Guyot, 1992).

1.5.2 Acidogénesis.

En la etapa acidogénica o acidogénesis, los organismos transforman los productos de la hidrólisis en una gran diversidad de compuestos orgánicos marcados por la composición del residuo utilizado. Como productos podemos encontrar mayoritariamente ácidos orgánicos (generalmente ácido láctico), ácidos grasos volátiles (ácidos acético, propiónico, butírico, valérico, etc.), alcoholes (glicerol, etanol), hidrógeno y dióxido de carbono. Las reacciones de esta etapa tienen lugar en el interior de las células de microorganismos de diferentes géneros (*Clostridium*, *Enterobacter*, etc.), que son denominados comúnmente como bacterias fermentativas.

Los principales organismos que intervienen en estos procesos son anaerobios estrictos, tales como *Bacteroides*, *Clostridia*, *Bifidobacteria*, *Propionibacterium*, *Selenomonas* y *Streptococci*, aunque también se pueden encontrar anaerobios facultativos como las enterobacterias y aerotolerantes como las bacterias del ácido láctico. (Archer y Kirsop, 1990; Guyot, 1992; Soubes, 1994).

1.5.3. Acetogénesis.

Tras la acidogénesis, los compuestos obtenidos son transformados en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono entre otros.

Como su propio nombre indica, la reacción principal de la acetogénesis es la formación de ácido acético, bien por productos de la hidrólisis o de la acidogénesis, o bien por una mezcla de hidrógeno y dióxido de carbono, a través de reacciones llevadas a cabo por bacterias homoacetogénicas.

En esta etapa tienen actividad tres grupos de microorganismos: las bacterias homoacetogénicas, las sintróficas u OHPA (del inglés *Obligate Hydrogen Producing Acetogen*) y las sulforeductoras. La mayoría de ellas son anaerobias estrictas. Así se pueden encontrar homoacetogénicas como *Clostridium*, *Acetobacterium*, *Sporomusa*, *Acetogenium*, *Acetoanaerobicum*, *Pelobacter* o *Eubacterium* entre otras, (Archer y Kirsop, 1990) sintróficas como *Syntrophobacter*, *Syntrophomonas* o *Syntrophus* (Dolfín, 1988) y sulforeductoras como *Desulfovibrio*, *Desulfobacter*, *Desulfotomaculum* y *Desulfomonas* (Widdel, 1988).

Las bacterias OHPA oxidan los productos de la fermentación en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono. Estas bacterias son anaerobias estrictas y dependen para su crecimiento de la eliminación del hidrógeno presente en el medio, ya que cuando la presión parcial de hidrógeno excede de 10^{-2} atmósferas para el etanol, 10^{-3} para el propionato y 10^{-4} para el butirato, la reacción de oxidación se hace termodinámicamente imposible (Guyot, 1990, 1992). La eliminación de hidrógeno del medio es llevada a cabo, por lo general, por bacterias metanógenas hidrogenofílicas, aunque en presencia de sulfatos, las bacterias sulforeductoras son capaces de establecer una relación sintrófica con las bacterias OHPA. La relación sintrófica recibe el nombre de transferencia interespecífica de hidrógeno y permite llevar a cabo las reacciones, con un balance energético favorable (Cadi, 1994).

1.5.4. Metanogénesis.

La etapa final del proceso es la formación de metano (metanogénesis), llevada a cabo por microorganismos productores de metano, las arqueobacterias. (García *et al.* 2000).

Las arqueobacterias metanógenas son anaerobias estrictas y su tasa de crecimiento es menor que la del resto de microorganismos, además solo pueden utilizar un número restringido de sustratos, principalmente acetato, hidrógeno y dióxido de carbono.

Según el sustrato utilizado pueden clasificarse en metanógenos hidrogenótrofos, capaces de producir metano a partir de hidrógeno y CO₂; y metanógenos acetoclásticos que utilizan como sustrato para formar metano el ácido acético.

Algunas de las metanógenas hidrogenofílicas como *Methanobacterium*, *Methanococcus* y *Methanobrevibacter*, producen aproximadamente un 30% del metano (Ferry, 1992). Las principales especies metanogénicas acetoclásticas, *Methanosarcina* y *Methanosaeta* (*Methanotrix*), producen el 70 % restante a partir de acetato (McCarty, 1981; McInerney *et al.*, 1979; Molleta, 1993).

Las bacterias metanogénicas son muy sensibles al pH. En la segunda fase de la digestión anaerobia se producen ácidos, por lo que si no existe en el medio una alcalinidad que tampona el pH y una población bacteriana metanógena suficiente que transforme estos ácidos, se produce una acumulación de éstos y el pH disminuye. La alcalinidad adecuada se consigue por la producción de bicarbonato amónico formado en el propio proceso. El pH debe presentar valores situados entre 6,6 y 7,6. Se estima que en valores de pH inferiores a 6 la actividad metanógena se detiene completamente (Pozo, 2013).

1.6 Parámetros del proceso de digestión anaerobia.

La digestión anaerobia desarrolla una gran cantidad de reacciones bioquímicas que dependen de multitud de parámetros. Las condiciones de operación deben de ser constantes y controladas, para evitar situaciones que se produzcan de manera descoordinada, y no se cumplan los objetivos de proceso. Parámetros como la configuración del reactor, sus condiciones, el tipo de residuo tratado y los organismos involucrados, son factores clave que determinan la evolución y el rendimiento del proceso anaerobio. A continuación se describen brevemente los distintos parámetros a tener en cuenta en un proceso básico de digestión anaerobia. Estos parámetros se clasifican en dos grandes grupos: Parámetros de control y Parámetros de operación y diseño.

1.6.1 Parámetros de control.

Se definen como parámetros de control aquellos que funcionan como indicadores de la evolución del proceso, que proporcionan una fiabilidad que permita anticiparse con tiempo suficiente ante posibles problemas en el transcurso del proceso. Los que más información muestran sobre el proceso son:

1.6.1.1 Biogás.

Uno de los parámetros más significativos es la producción de biogás, una exitosa producción de biogás indica el buen funcionamiento global del proceso. Es cierto que no resulta útil para predecir periodos de mal funcionamiento y anticiparnos a ellos, pero se puede analizar su composición a través de sensores específicos, para intentar encontrar algún indicio de inestabilidad. Una composición determinada de CO₂ y CH₄ es indicativa de estabilidad, valores cercanos al 60% en la producción de metano indican normalidad en el proceso.

1.6.1.2 pH.

El pH es un parámetro ampliamente utilizado, ya que su medida resulta sencilla y rápida en comparación con otros parámetros, además es uno de los factores que condiciona la evolución de los tratamientos anaerobios en mayor medida, a causa de su efecto sobre la actividad microbiana.

La mayor parte de los microorganismos implicados en la digestión anaerobia, se desarrollan en un rango de pH que varía entre 6 y 8. Las especies metanogénicas presentan una actividad óptima cuando el pH se establece en un rango de 6.5 y 7.2, mientras que si el pH se sitúa en torno a 6.2, las condiciones ácidas favorecen a las especies acidogénicas presentando una aguda toxicidad para las arqueobacterias metanógenas. Cuando el pH de un digestor en condiciones de equilibrio comienza a disminuir por debajo de un valor de 5.5, la actividad de los microorganismos metanogénicos cesa completamente. En estas condiciones, el pH puede seguir disminuyendo hasta un valor de 4.5, en el que la actividad del resto de microorganismos implicados se detiene (Soube, 1994).

1.6.1.3 Alcalinidad.

La alcalinidad es un factor importante para la digestión anaerobia, ya que determina la capacidad de un sistema para prevenir cambios rápidos en el pH, gracias al efecto tampón de diferentes especies químicas. Una de las especies con capacidad tampón más importante es el bicarbonato. Una alcalinidad elevada supone una mayor estabilidad, ya que permite resistir con mayor eficacia los cambios repentinos de pH. Habitualmente, en la fase inicial de arranque de un digestor anaerobio, la producción de ácidos volátiles provoca un descenso del pH, pero a medida que las especies metanogénicas convierten esos compuestos en CH₄ y CO₂, tanto el pH como la alcalinidad del sistema aumentan. Un descenso en la alcalinidad puede deberse a diferentes causas, una de ellas puede ser la acumulación de ácidos orgánicos, debido a la reducción de la actividad de las especies metanógenas por la presencia de agentes tóxicos, o debido a una sobrecarga orgánica (Esteban Gutiérrez, M., et al; 2014).

1.6.1.4 Ácidos Grasos Volátiles (AGV).

Son considerados el parámetro de control más adecuado, ya que se trata de un parámetro que refleja la acción de las bacterias acetogénicas y los organismos metanogénicos, dos de los principales grupos microbianos de la digestión anaerobia. El carácter ácido que poseen puede llegar a alterar las condiciones ácido-base del sistema, por lo que su control de forma periódica en el laboratorio es clave para anticiparnos a posibles fallos en el proceso.

Las técnicas para su medida, como la cromatografía o la espectroscopía, suelen ser caras y por tanto no utilizadas habitualmente. Otras técnicas más sencillas y menos costosas como valoraciones e indicadores, suelen usarse con más frecuencia.

Las medidas realizadas a este parámetro representan a los AGV totales, ya que elegir un AGV individual como mejor indicador de proceso resulta complicado. Cada AGV individual sigue una evolución determinada en el proceso, en función del tipo de residuo empleado y de las condiciones de operación.

El ratio AGV/alcalinidad es otro de los parámetros importantes para el seguimiento y posible indicador de la estabilidad del proceso (Ruiz Cabrera, C. M. 2002).

1.6.1.5 Sólidos totales.

En función del diseño del reactor según el contenido en sólidos, tenemos tres tipos de digestores:

- Bajo contenido en sólidos: 10%

- Contenido medio en sólidos: 15-20%

- Alto contenido en sólidos: 22-40%

Se requiere un menor volumen del reactor cuanto mayor sea el contenido en sólidos y menor sea la cantidad de agua, debido a que la cantidad de sólidos de entrada está asociada a la humedad del afluente. Así, un valor del 10% de sólidos totales significa una humedad de la corriente del 90%.

En cuanto a la influencia que tienen los sólidos en el proceso de digestión, un aumento de la media de sólidos en suspensión del efluente puede ser perjudicial, con un aumento lento de la presencia de AGV, una disminución en la producción de gas y un lavado de bacterias que salen del reactor con la corriente de salida (Ocaña Perez-Cerdá. Fco. J. 2011).

1.6.1.6 Demanda Química de Oxígeno (DQO).

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro que representa indirectamente el contenido de materia orgánica de un residuo, a través del oxígeno necesario para oxidar químicamente dicha materia orgánica. La carga orgánica introducida en un digestor es la cantidad máxima asimilable que tiene el digestor, medido en kg DBO o SV / m³ de digestor (Ocaña Perez-Cerdá. Fco. J. 2011).

Un aumento de la carga con materia orgánica disuelta puede influenciar en el proceso de digestión. Las tres etapas principales del proceso pueden desequilibrarse aumentando la presencia de AGV junto con la producción de gas, y reduciendo el pH rápidamente.

Otra forma de desequilibrar las etapas del proceso es aumentar la carga con materia orgánica en suspensión. Con esto se produce un efecto de lavado de las bacterias que salen del reactor con la corriente de salida, aumentando los AGV y disminuyendo la producción de gas.

1.6.1.7 Inhibidores.

Es difícil atribuir la toxicidad de una sustancia y sus efectos inhibitorios, estos parámetros no solo dependen de la concentración del compuesto en sí, sino también de la capacidad de adaptación o aclimatación de la biomasa anaerobia y de otros factores como la temperatura, la presencia de otras sustancias, etc.

Lo cierto es que algunos compuestos orgánicos en cierta concentración pueden ser tóxicos e inhibir reacciones de la anaerobiosis, causando efectos reversibles o irreversibles, dependiendo de la afección al rendimiento del proceso, pudiendo llegar a desestabilizarse por completo.

Como ejemplo podemos utilizar el nitrógeno amoniacal, que ha sido ampliamente estudiado como agente inhibitorio de procesos anaerobios, no obstante, hay que tener en cuenta que para sostener la actividad metabólica de los microorganismos que intervienen en el proceso, es necesaria cierta cantidad de nitrógeno, ya que se trata de un nutriente esencial para los mismos (Calli et al., 2005).

Otro compuesto que puede resultar problemático durante la operación de digestores anaerobios es el sulfato. Las sulfatoreductoras compiten con las especies que intervienen en el proceso, y la reducción del sulfato a sulfuro de hierro puede provocar toxicidad, dos efectos negativos que pueden desequilibrar la operación en el digestor. Asimismo, algunos metales pesados (Cu, Zn, Cr, etc.) en concentraciones traza son necesarios para sostener la actividad de numerosas enzimas o coenzimas, pero pueden resultar tóxicos por encima de determinados niveles (Angelidaki et al., 1997).

1.6.1.8 Tipo de residuo.

Hay multitud de residuos orgánicos para utilizar en la CO-digestión anaerobia y por tanto hay que tener en cuenta que cada uno de ellos tendrá una composición distinta, con diferentes proporciones de moléculas orgánicas. Esta composición y sus características afectan significativamente a la evolución del proceso, tanto en producción de biogás como en eliminación de sólidos volátiles y tiempo de retención.

Por tanto, la composición del residuo utilizado debe ser estudiada con detenimiento, y descartar residuos que posean o puedan generar compuestos tóxicos o inhibidores para los microorganismos anaerobios, que condicionen en gran medida la viabilidad del proceso.

Este parámetro resulta un punto muy importante en la investigación central de esta tesis, ya que se eligen residuos de difícil tratamiento para intentar evitar su toxicidad o inhibición del proceso, a través de la adición de otro residuo que los neutralice o favorezca su degradación en digestión anaerobia.

Según los intereses del investigador puede elegirse un tipo de residuo u otro. Como puede verse en la figura 2, en general los compuestos que presentan más grasas producen una mayor cantidad de biogás, en contraposición con los carbohidratos. Sin embargo, el tratamiento de grasas es mayor en el tiempo, puesto que son menos accesibles al ataque de enzimas. Las proteínas se degradan de forma más rápida y el tiempo de tratamiento es menor (Van Lier et al., 2008).

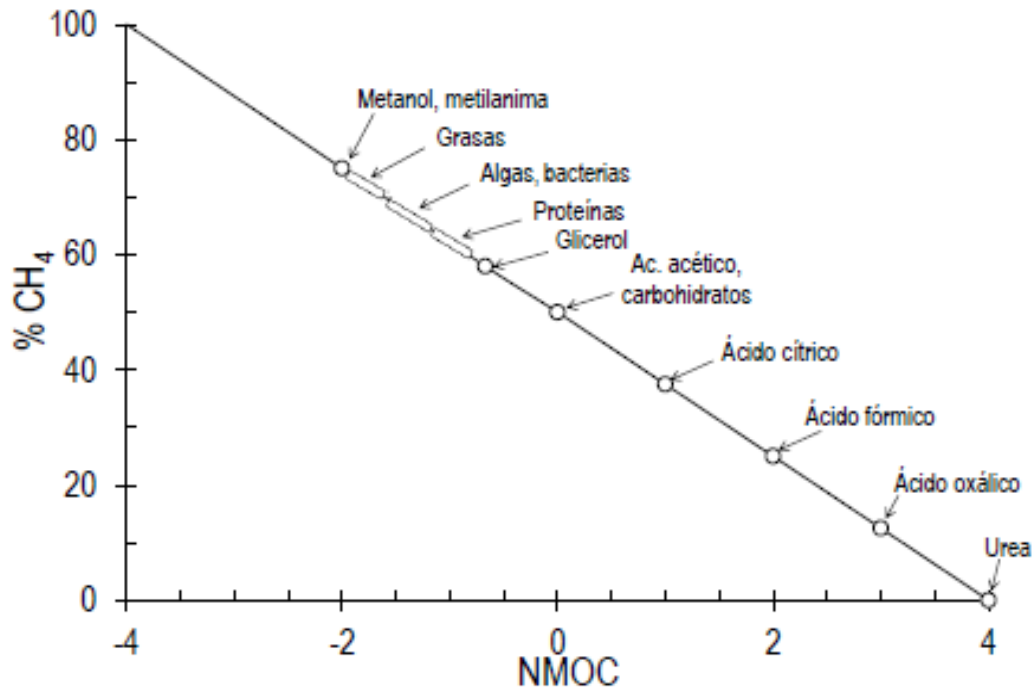


Figura 2: Composición esperada del biogás en la digestión anaerobia de diferentes compuestos en función del respectivo número de oxidación medio de los átomos de carbono (NMOC), (Van Lier et al, 2008).

1.6.2. Parámetros de operación y diseño.

Es preciso tener unas pautas o parámetros de operación y diseño para operar bajo condiciones anaerobias con éxito. Se pueden utilizar diferentes modos de operación en un digestor anaerobio, y se elige el modo de trabajo según las características del residuo a tratar y la tecnología a desarrollar en la operación.

1.6.2.1 Temperatura.

Las fluctuaciones en la temperatura tanto en la fase de arranque como en cualquier otra fase del proceso, pueden causar importantes cambios y desequilibrios en el sistema. Es uno de los principales factores que afectan al proceso de biometanización, por tanto hay que evitar variaciones de temperatura mayores a 2-3°C para bacterias mesófilas y 1°C para las termófilas, asegurando así un funcionamiento adecuado del digestor.

Como se anticipa anteriormente, la temperatura influye sobre la actividad de las especies que degradan la materia orgánica, base de la funcionalidad del proceso. Se han descrito tres rangos o zonas de temperatura en los que se da la actividad anaerobia: el rango psicrófilo (5-25° C), el rango mesófilo (20-40° C) y el rango termófilo (50-70° C). Si bien es cierto que las diferentes poblaciones implicadas en el proceso de biometanización son dependientes de las condiciones de temperatura, los microorganismos metanogénicos son extremadamente sensibles a los cambios de este parámetro y por ello presentan unos intervalos óptimos considerablemente reducidos (Ocaña Pérez-Cerdá. Fco. J. 2011).

Operar en un rango de temperatura termofílico implica una mayor velocidad de reacción, mayor producción de biogás y una mejor destrucción de patógenos, debido a una temperatura mayor en comparación con el rango mesofílico. Por otro lado tiene la desventaja de ser un proceso más complicado, puesto que las bacterias termófilas resultan más sensibles a determinados agentes tóxicos, así como a fluctuaciones en la temperatura fuera del rango óptimo.

1.6.2.2 Agitación.

La agitación favorece la distribución de la biomasa en el reactor, logrando a través de distintos sistemas, el transporte pasivo de microorganismos y compuestos generados en la degradación de la materia por todo el digestor.

El tipo de sistema de agitación empleado y la intensidad con la que se realiza la agitación condiciona la evolución del proceso. Una agitación excesiva puede provocar una insuficiente proximidad entre especies microbianas que dificulta su reacción conjunta. Una agitación pobre puede interferir negativamente en las distintas fases de operación evitando la correcta anaerobiosis y la producción de biogás.

Algunos sistemas de agitación o mezcla pueden ser la inyección del biogás producido, la recirculación del lixiviado en configuraciones sin agitación, o la recirculación de parte del fango digerido. Asimismo, se pueden encontrar configuraciones de flujo pistón vertical u horizontal, e incluso sistemas con agitación mecánica similares a los digestores clásicos de mezcla.

El flujo de tipo pistón es habitual en los digestores que operan en modo continuo con una alta concentración de sólidos. En este tipo de configuraciones, el contenido del digestor no se mezcla completamente, sino que va avanzando desde la parte en la que se alimenta hacia la salida. (Speece et al., 2006; Stroot et al., 2001; Kim et al., 2002; Vavilin et al., 2005).

1.6.2.3 Carga orgánica.

La cantidad de residuo alimentado diariamente es otro de los puntos a tener en cuenta con respecto al modo de operar un digestor anaerobio. La alimentación o carga orgánica con la que se trabaja, concretamente la carga orgánica volumétrica (COV), se puede expresar tanto en kilogramos de sólidos volátiles como en términos de DQO (kg SV (m³.d)), respectivamente.

La cantidad de alimentación empleada depende del diseño del reactor, de la tecnología empleada y de las características del residuo a tratar. Hay que prestar atención a los distintos parámetros para utilizar una cantidad de alimentación adecuada, ya que una elevada carga puede provocar la inhibición del proceso por la gran cantidad de AGV producidos. La cantidad de agua en el residuo también es importante, la velocidad de hidrólisis es limitada y ralentiza el transporte de AGV de la zona acidogénica a la metanogénica en un residuo seco, ya que este ocurre a través de la fase líquida (Ahring et al., 1995).

1.6.2.4 Tiempo de Retención.

Este parámetro afecta a la eficiencia del digestor con respecto a la eliminación de materia orgánica y la producción específica de biogás y metano. Trabajando en el campo del tratamiento de aguas residuales, podemos hablar de tiempo de retención de sólidos (TRS), parámetro que hace referencia al tiempo de residencia del fango en el reactor, directamente relacionado con el tiempo que la biomasa es retenida en el mismo; y de tiempo de retención hidráulico (TRH), parámetro referido al tiempo de residencia del agua o fase líquida.

En procesos tales como los de digestión anaerobia de residuos orgánicos, o en los digestores típicos de fango de mezcla completa, en que el contenido en materia seca del reactor es elevado, ambos parámetros son iguales ya que existe una única fase en el reactor. En consecuencia, parte de la biomasa anaerobia es eliminada al retirar el residuo tratado. En este caso concreto, el TRH y el TRS adquieren el mismo valor por lo que es más conveniente utilizar el término Tiempo de Retención (TR) (Esteban Gutiérrez, M. 2014).

La forma en que puede afectar el TR influyente a la eficiencia del proceso, es la necesidad de tiempo para que los microorganismos crezcan lo suficiente como para compensar la cantidad retirada del digestor y se pueda mantener el proceso en un estado estacionario.

1.6.2.5 Tipo de reactor.

Existen diferentes tecnologías para llevar a cabo el tratamiento de residuos orgánicos a través de digestión anaerobia. Los reactores tipo batch de una sola etapa son los más utilizados, ya que presentan menos fallos técnicos y se trata de sistemas que requieren un coste menor de inversión. Son en estos digestores en los que se aplica la tecnología BMP que aporta numerosos datos y detalles del co-sustrato en estudio.

Al constar de una sola etapa, en ella se llevan a cabo todas las reacciones del proceso de anaerobiosis de forma simultánea (Nagao et al., 2012).

Se puede operar con este tipo de reactores de una sola etapa de dos maneras diferentes: en modo continuo, donde se añade residuo en intervalos regulares y simultáneamente se va eliminando el producto tratado, y en modo discontinuo o batch, donde son llenados en el inicio y se dejan en funcionamiento durante un periodo de tiempo que podría ser considerado como el tiempo de retención. Transcurrido este período de tiempo y medidos todos los parámetros, los reactores se vacían y se ponen en funcionamiento nuevamente utilizando materia digerida de la experiencia anterior.

En general, los reactores diseñados para operar en modo discontinuo presentan varias ventajas en comparación con otro tipo de diseños, algunas de ellas son: una mayor simplicidad, menores requerimientos en mantenimiento y un coste de inversión menor (Li et al., 2011).

Otros sistemas utilizados son los reactores continuos de una única etapa y los sistemas continuos bi-fase o multi-fase. Los sistemas bi-fase o multi-fase están formados por diferentes reactores, en cada uno de ellos tienen lugar de manera separada diferentes fases bioquímicas del proceso (Khalid et al., 2011; Fezzani & Cheikh, 2010). Este sistema permite prevenir sobrecargas, mejorando así la estabilidad del proceso, a través del control de la fase de acidificación, mediante la optimización del tiempo de retención hidráulico. Además, al tener más de una etapa permite optimizar independientemente cada una de las condiciones para cada fase del proceso. A pesar de tener ventajas, su mantenimiento es mayor y por tanto son menos utilizados que los digestores de una fase.

En este trabajo también se ponen en marcha digestores semicontinuos, ya que ofrecen datos más equiparables a la realidad en una EDAR común, ventaja muy importante con respecto a los BMP. Al utilizar este tipo de reactores se pueden experimentar los cambios a escala piloto sin la necesidad de realizarlos en la EDAR real, con la posibilidad de realizar cambios de forma segura y barata que después se lleven a cabo en la EDAR correspondiente.

Además de estos dos tipos de reactores, existen otros que no están en este estudio, como pueden ser los de alta velocidad, que también pueden ser gestionados por el grupo de estudio que realiza este proyecto (Grupo TAR).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Residuos estudiados.

2.2 Descripción de los Reactores anaerobios.

2.3 Descripción de los Métodos de Análisis.

2.4 Instalaciones e instrumentación de laboratorio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se realiza una explicación detallada del material empleado para llevar a cabo los ensayos experimentales, incluyendo una descripción tanto de los diferentes equipos y reactores utilizados, como del procedimiento seguido en los análisis de laboratorio.

2.1 Residuos estudiados.

Para el desarrollo de la investigación se emplean residuos de distinta procedencia, pero con una característica en común, son residuos difíciles de gestionar. Las alternativas para su reutilización no están completamente desarrolladas o su tratamiento resulta excesivamente caro. Son residuos cuya composición los hace peligrosos para el medio ambiente y, por tanto, no se permite su vertido a cauces o ríos sin un tratamiento previo.

Existen multitud de residuos que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente y su gestión no ha sido optimizada. En este trabajo se eligen dos residuos de tipo industrial, por su gran dificultad de gestión e interés actual en su aplicación al proceso anaerobio en EDAR, el Lixiviado y la Glicerina. Por otro lado, como base de documentación y experiencia positiva en el proceso que se desarrolla, se estudia el residuo del deshuesado de la aceituna de mesa y el lactosuero, como residuos con un posible gran potencial metanogénico, basado en experiencias anteriores llevadas a cabo por este grupo de investigación (Benito, C. 2016).

2.1.1 Fango Digerido y Fango Mixto.

Un componente imprescindible para el arranque de la digestión anaerobia es el fango digerido o inóculo. El proceso global de degradación anaerobia es complejo y requiere la presencia de distintos grupos de microorganismos, por lo que el origen y naturaleza del inóculo tiene una clara influencia en la cinética y niveles de degradación obtenidos. Una fuente de biomasa metanógena activa como inóculo es primordial para el arranque del proceso de degradación anaerobia.

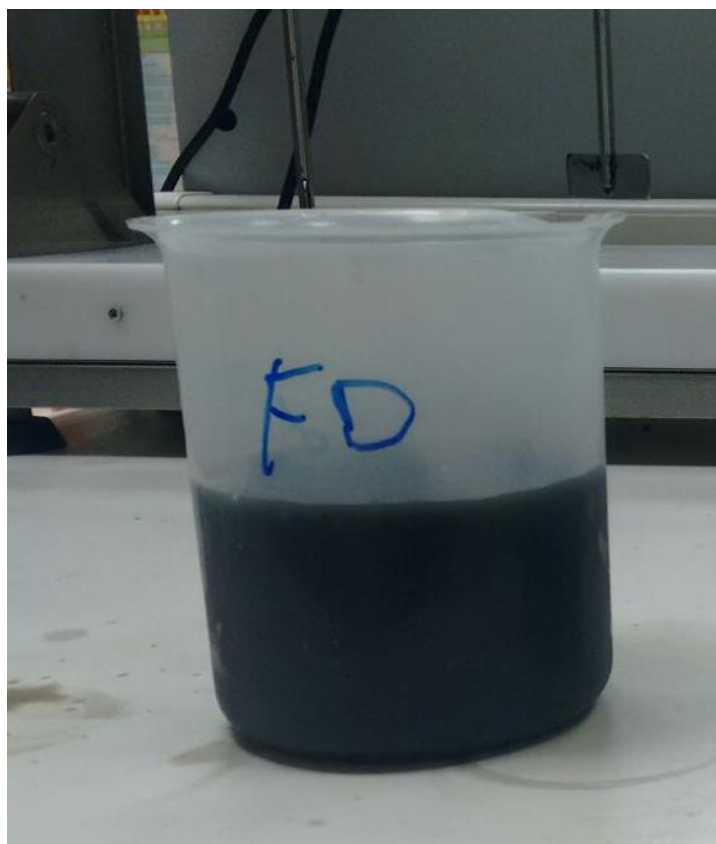


Figura 3: Imagen de la muestra de Fango Digerido. (Fotografía: Antonio José Alonso).

EDAR EL COPERO

El fango digerido proviene de los reactores anaerobios de una EDAR convencional, en este caso la de Copero, situada en Sevilla. La Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) Copero tiene una capacidad actual de tratamiento de 255.000 m³/día y depura las aguas residuales de la cuenca sur de Sevilla, la población de Dos Hermanas y el polígono industrial La Isla. Su capacidad de diseño es para una población total de 950.000 habitantes equivalentes.

Se ha desarrollado en tres fases. La primera de ellas, origen de la EDAR, se puso en servicio en 1987 y consistía en un tratamiento primario con su correspondiente línea de fangos con digestión anaerobia. Fue ampliada con los mismos procesos en 1993 y, finalmente, en el año 2001, se puso en marcha el tratamiento secundario con ampliación de la línea de fangos. Desde 2003 cuenta con aprovechamiento energético del gas producido, con una potencia de cogeneración de 4 x 630 (kW/h). En sus terrenos se encuentra una planta solar fotovoltaica de 1 MW de potencia nominal.

Esta EDAR posee tratamiento secundario biológico (fangos activos) y tratamiento de estabilización de fangos mediante digestión anaerobia y deshidratación. De este último tratamiento de depuración se obtiene el fango ya estabilizado que es utilizado en el presente ensayo.



Figura 4: Imagen de la EDAR de Copero (Sevilla). (Fotografía: Página web, www.EMASESA.com).

En un tratamiento de depuración de aguas residuales urbanas convencional, el agua llega a través de colectores hasta la planta depuradora. En primera instancia el agua es llevada hasta el pre-tratamiento, donde a través de un desbaste se retiran los sólidos de mayor tamaño. El agua es conducida posteriormente hasta un desarenado-desengrasado, donde son retirados las arenas y los flotantes.

El siguiente paso es la decantación primaria donde se separa la mayor parte de los sólidos sedimentables (los cuales se depositan en el fondo) y del material flotante (se quedan en las superficie), que no pudieron ser eliminados en procesos anteriores. En esta etapa puede emplearse un tratamiento físico-químico que actúe como floculante, favoreciendo la unión de las partículas y su retirada. Tras esta decantación se aplica generalmente un tratamiento biológico, donde la materia orgánica presente es degradada por acción de una serie de microorganismos, denominado fango biológico. Por último, el agua es llevada hasta una decantación secundaria para separar el fango biológico del proceso anterior del agua depurada, que se trata en un tratamiento terciario para afinar sus características con el fin de reutilizarla.

Los fangos de desecho del proceso son tratados y acondicionados para su posterior utilización o depósito en vertedero (EDAR Copero, 2016).

El residuo base de alimentación del digestor en estudio es el fango mixto (sustrato), formado por una mezcla de fangos provenientes de la decantación primaria y secundaria. Este fango se utiliza como garantía de arranque del proceso anaerobio, estableciendo un mínimo de producción de gas.

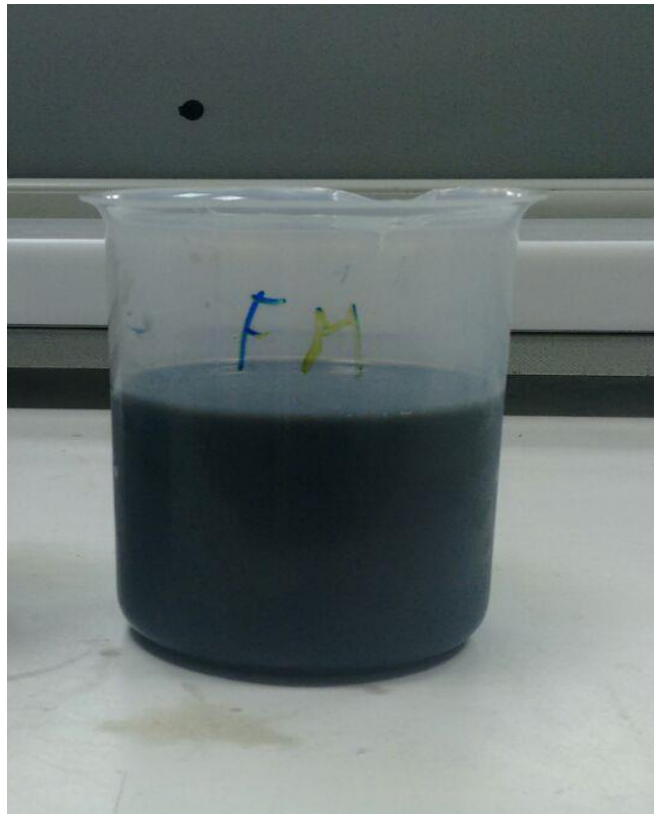


Figura 5: Imagen de la muestra de Fango Mixto. (Fotografía: Antonio José Alonso).

La adición de los residuos en estudio, varía esta producción de biogás positiva o negativamente, tomando como base la producida en solitario por el fango mixto.

Este fango base, al igual que otros residuos, es proporcionado por la EDAR de Copero, que colabora estrechamente con la labor investigadora.

El fango en digestión utilizado en el arranque del proceso es conocido como inóculo, el fango mixto se denomina sustrato. El resto de residuos estudiados se nombran a partir de ahora como co-sustratos.

Un cosustrato adecuado para su adición en un proceso de co-digestión anaerobia es el que cumple los siguientes requisitos:

- Obtención sencilla y económica.
- Disponible en cantidades suficientes.
- Alto contenido en materia orgánica.
- Degradable mediante un proceso de digestión anaerobia y en las cantidades necesarias.

A partir de estas directrices se estudian los co-sustratos seleccionados.

2.1.2 Residuo del deshuesado de la aceituna de mesa

Un buen ejemplo de residuo de difícil gestión en Andalucía es el residuo del proceso de obtención de aceite y aceituna de mesa en la industria oleícola.

El proceso de fabricación de la aceituna de mesa, se desarrolla con la siguiente secuencia: recolección y transporte, escogido o clasificación, tratamiento con lejías, colocación en salmuera, fermentación, clasificación, deshuesado y finalmente encasado. En el proceso de deshuesado se extrae el hueso mecánicamente, llevando junto a él parte de la pulpa. Este residuo tiene grandes volúmenes de generación en Andalucía, de ahí la necesidad de encontrar vías alternativas de aprovechamiento.



Figura 6: Imagen de la muestra de Residuo del deshuesado de la aceituna de mesa. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Según los datos de la agencia andaluza de energía, Andalucía dispone de 1.400.00 ha de olivar, que produjeron, según los datos de la campaña 2014/2015, 4.000.000 de toneladas de aceitunas, de las cuales 3.700.000 toneladas fueron destinadas para la producción de 800.000 toneladas de aceite de oliva, generando un total de 370.000 toneladas de hueso triturado, y las 300.000 toneladas de aceitunas de mesa restantes, que generan unos 220.000 toneladas de hueso entero (Agencia Andaluza de energía, 2015).

Entre las distintas vías de aprovechamiento del hueso de aceituna, tanto el triturado como el entero, se destaca la dedicada a producir energía térmica y electricidad, generada por la combustión del hueso en grandes hornos de cogeneración (Ben, S. 2010).

La ventaja de la aplicación de este residuo en un tratamiento anaerobio es la generación de energía térmica y eléctrica sin el gasto energético previo producido para su combustión. Así como una alternativa para su gestión como residuo.

En este estudio se ensaya la adición de residuo del deshuesado de la aceituna de mesa en distintas cantidades a un proceso de co-digestión anaerobia, en un digestor piloto de 7 litros, para comprobar así la hipótesis de su viabilidad como residuo con potencial metanogénico.

Tras un ensayo de tratabilidad (Jar test), se observa que a pocas revoluciones de agitación pasaba de estado sólido a líquido, por tanto se introduce directamente en el digestor, aprovechando la agitación del mismo para homogeneizarlo con los fangos de depuradora tratados y mejorar su comportamiento como fluido. Esto permite su procesado en digestión anaerobia sin tratamiento previo.

El residuo ha sido proporcionado por AgroSegura, cooperativa vinculada a la industria oleícola, situada en Puertas de Segura, Jaén.

2.1.3 Lixiviado.

En muchas ocasiones, el tratamiento a residuos industriales consiste en su disposición bajo tierra o en vertederos controlados. De esta manera el residuo queda aislado del exterior y se degrada de forma constante alejado de la población evitando cualquier tipo de peligro. La dificultad en los vertederos es el control del agua. Cuando el agua percola a través de las basuras urbanas, disuelve componentes inorgánicos y orgánicos que producen lixiviados contaminados, que pueden constituir un importante riesgo potencial para el ecosistema circundante y las poblaciones humanas (Pastor, J. 2002).



Figura 7: Imagen de lixiviados en vertedero. (Fotografía: González, Y. 1995).

El presente estudio evalúa la viabilidad, a escala de laboratorio, de la incorporación de lixiviados de vertedero al proceso de co-digestión anaerobia. La cuestión principal es si los lixiviados de vertedero son un co-sustrato adecuado para aumentar la producción de biogás en un proceso anaerobio. La base de cálculo es el gas adicional que hay que producir y la cantidad de lixiviado que hay que añadir a la entrada para obtenerlo.

A pesar de que la co-digestión con otros sustratos ya se ha demostrado viable, la complejidad del lixiviado (principalmente, alta conductividad y gran presencia de metales y metales pesados) hace necesario un proceso específico de adaptación de la biomasa anaerobia.

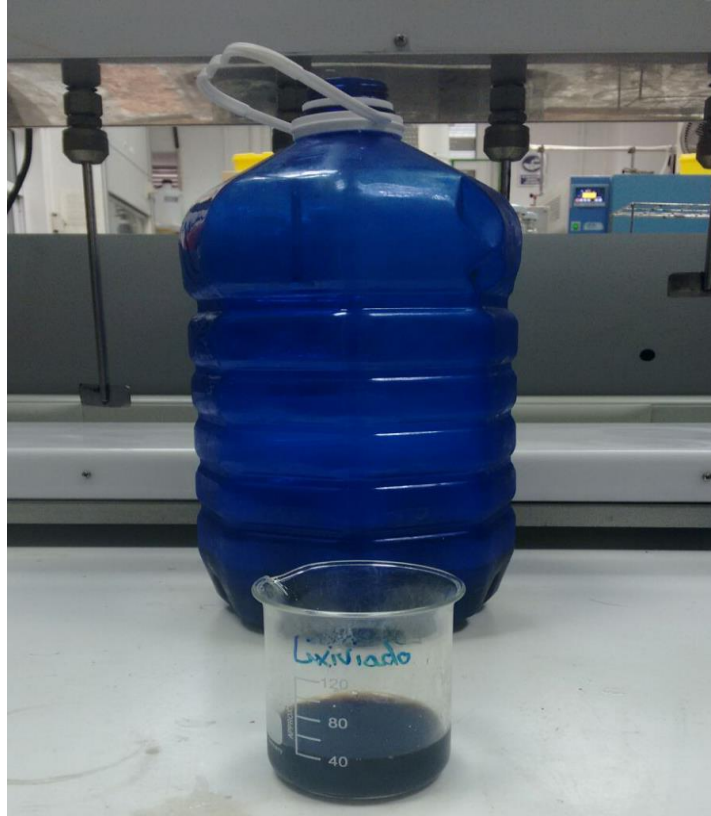


Figura 8: Imagen de la muestra de lixiviados. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Los lixiviados de vertedero cumplen con las tres primeras condiciones de un co-sustrato adecuado para la adición en co-digestión, y este estudio pretende comprobar la cuarta, validando las siguientes hipótesis:

- Los lixiviados de vertedero pueden ser degradados mediante un proceso de digestión anaerobia.
- Se puede llegar a introducir en el sistema una cantidad de lixiviados suficiente para conseguir el incremento de biogás propuesto.
- La complejidad del sustrato (presencia de metales y alta conductividad) requiere un proceso de adaptación paulatino de la biomasa.

La finalidad del estudio de este residuo es su incorporación a la digestión anaerobia de una EDAR, consiguiendo un aumento de la producción de biogás. Dos son los riesgos fundamentales que conlleva el aporte de lixiviados de vertedero al proceso:

(1) la adición de un sustrato de características complejas y muy diferentes a la alimentación habitual, y (2) la disminución del tiempo de residencia, de ahí la importancia de una investigación previa en laboratorio.

La integración de lixiviados de vertedero en el proceso de digestión anaerobia de una EDAR es además una interesante vía de gestión conjunta de residuos.

MANCOMUNIDAD DE LA VEGA.

El lixiviado utilizado para el ensayo ha sido proporcionado por la Mancomunidad de la Vega (Sevilla). La Mancomunidad de Servicios La Vega es una Administración Local nacida en 1998 de la agrupación de municipios para la gestión de la recogida y tratamiento de basuras (RSU). Está compuesta por un total de 17 municipios mancomunados: Alcalá del Río, Alcolea del Río, Brenes, Burguillos, Cantillana, Castilblanco de los Arroyos, Castilleja de la Cuesta, Gerena, Guillena, La Algaba, La Rinconada, Lora del Río, Peñaflor, San Juan de Aznalfarache, Tocina, Villanueva del Río y Minas y Villaverde del Río. El objetivo de la Mancomunidad de Servicios La Vega es ofrecer servicios de recogida selectiva, gestión de residuos urbanos y reciclaje. Tratamiento, recuperación y valorización de los residuos. (Mancomunidad la Vega, 2016).

2.1.4 Aguas glicerosas (Glicerina).

El cosustrato de glicerina proviene de la industria de fabricación de biodiesel, y se les denomina aguas glicerosas.

El proceso de transesterificación consiste en combinar el aceite (normalmente aceite vegetal) con un alcohol ligero, normalmente metanol, y deja como residuo de valor añadido propanotriol (glicerina) que puede ser aprovechada por la industria cosmética, entre otras (Dinis, A.2012).

El gran volumen de glicerina generada por la fabricación de biodiesel hace necesaria su gestión adecuada para evitar daños o perjuicios al medio ambiente si es vertida de forma incontrolada.

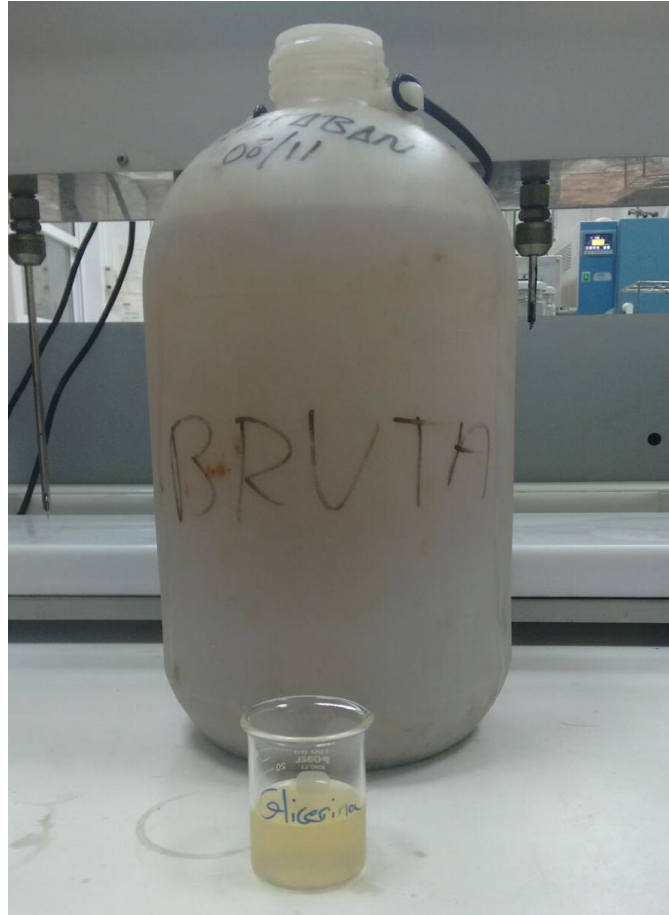


Figura 9: Imagen de la muestra de Glicerina. (Fotografía: Antonio José Alonso).

El presente estudio evalúa la viabilidad, a escala de laboratorio, de la incorporación de glicerina al proceso de co-digestión anaerobia. La cuestión principal es si la glicerina es un cosustrato adecuado para aumentar la producción de biogás en un proceso anaerobio.

A pesar de que la codigestión con otros sustratos ya se ha demostrado viable, la complejidad de la glicerina (principalmente su alta conductividad) hace necesario un proceso específico de adaptación de la biomasa anaerobia.

La glicerina cumple con las tres primeras condiciones de un buen co-sustrato y este estudio pretende comprobar la cuarta, validando las siguientes hipótesis:

- La glicerina puede ser degradada mediante un proceso de digestión anaerobia.
- Se puede llegar a introducir en el sistema una cantidad de glicerina suficiente para conseguir el incremento de biogás propuesto.
- La complejidad del sustrato (presenta alta conductividad) requiere un proceso de adaptación paulatino de la biomasa.

La finalidad del estudio de este residuo es su incorporación a la digestión anaerobia de una EDAR, consiguiendo un aumento de la producción de biogás. Dos son los riesgos fundamentales que conlleva el aporte de glicerina al proceso: (1) la adición de un sustrato de características complejas y muy diferentes a la alimentación habitual y, (2) la disminución del tiempo de residencia, de ahí la importancia de una investigación previa en laboratorio.

La integración de glicerina en el proceso de CO-digestión anaerobia de una EDAR es además una interesante vía de gestión conjunta de residuos.

ENTABAN BIOCOMBUSTIBLES DEL GUADALQUIVIR SA.

La glicerina utilizada en este estudio es proporcionada por la empresa Entaban Biocombustibles.

La empresa Entaban Biocombustibles del Guadalquivir SA está ubicada en la localidad de Sevilla. Entaban Biocombustibles fue constituida en 2001, dedicada a la importación, exportación, comercio, reciclaje, extracción y venta, de aceites minerales, vegetales y animales. Además de la transformación y producción de biocombustibles y subproductos. (Entaban Biocombustibles, 2016).

2.1.5. Lactosuero.

En una tesis paralela a ésta, realizada por un compañero de investigación, se obtienen resultados que indican el posible funcionamiento de una mezcla de residuos, que asociados al fango mixto, funcionan de mejor manera en el proceso anaerobio mejorando sus prestaciones.

La utilización de glicerina como residuo produce una gran producción de gas en sus inicios, pero posteriormente el proceso anaerobio comienza a decaer disminuyendo o agotando la producción de gas, debida a la toxicidad del residuo alimentado. Con esta situación, se plantea la recuperación del digester anaerobio con un tercer residuo indicado por dicha experiencia. El residuo elegido es un derivado de la fabricación de productos lácteos, el lactosuero.

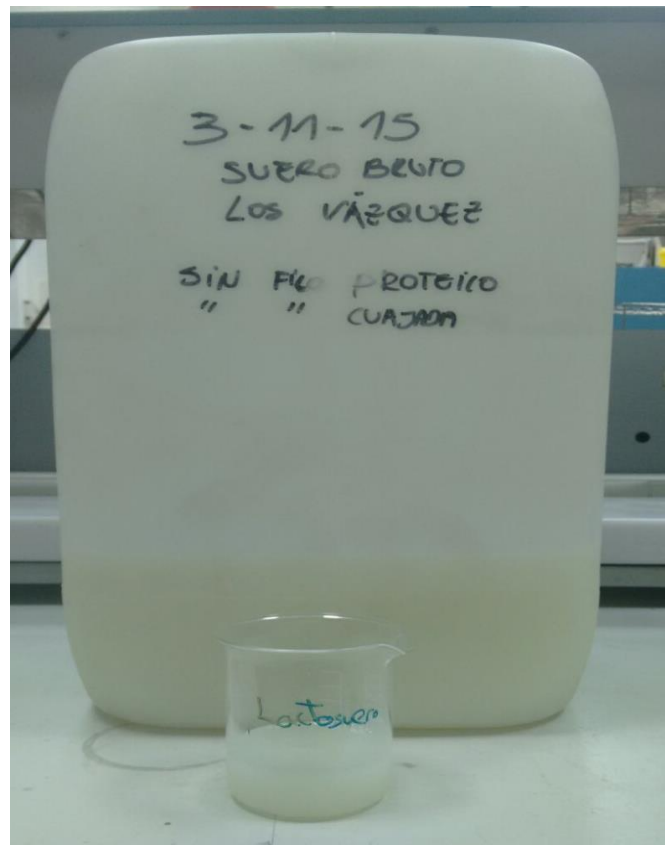


Figura 10: Imagen de la muestra de Lactosuero. (Fotografía: Antonio José Alonso).

El lactosuero es obtenido a partir de la elaboración del queso durante la etapa de separación de la cuajada o fase micelar. Esta separación se realiza a través de un proceso de coagulación de la leche, que se traduce en la floculación de las micelas de caseína, que se sueltan para formar un gel compacto aprisionando el líquido de dispersión que constituye el lactosuero. Este residuo es uno de los mayores contaminantes que existen en la industria alimentaria. Normalmente es desechado como efluente, el cual crea un serio problema ambiental, debido a que afecta física y químicamente la estructura del suelo, generando una disminución en el rendimiento de cultivos agrícolas. Cuando se desecha en el agua, reduce la vida acuática al agotar el oxígeno disuelto (Parra, 2009).

LOS VAZQUEZ

Este residuo ha sido proporcionado por la empresa de fabricación quesera de Los Vázquez, más concretamente la fábrica situada en Castilleja del Campo (Sevilla).

2.2. Descripción de los Reactores anaerobios.

Para llevar a cabo el estudio y realizar la investigación, se utilizan dos tipos de reactores anaerobios, microdigestores de una sola etapa con capacidad de 0,250 litros y un digestor anaerobio piloto de 7 L de volumen operando en discontinuo.

2.2.1 Microdigestores de una sola etapa.

Para la realización del ensayo con microdigestores de una sola etapa, se emplean a modo de reactor, botes de borosilicato de 250 mL. Estos botes quedan cerrados herméticamente por medio de un tapón plástico de ajuste y un tapón de rosca que fija el tapón plástico al bote evitando posibles fugas (Figura 11).



Figura 11: Imagen de reactor de una sola etapa (Fotografía: Antonio José Alonso).

2.2.1.1 Desarrollo de la técnica BMP (Biochemical Methane Potential)

En este tipo de reactores se desarrolla la tecnología BMP. Con esta tecnología se lleva a cabo el estudio del potencial bioquímico de metano asociado a un residuo o sustrato, a través de su adición a microdigestores que operan en condiciones anaerobias. Se utilizan reactores de una sola etapa en los que se introduce un sustrato acompañado de una biomasa madre ya adaptada a las condiciones anaerobias. Estos digestores se colocan dentro de un equipo de agitación que también posee una sonda térmica que mantiene la temperatura de trabajo a 36°C, temperatura óptima para el desarrollo de las bacterias metanogénicas (Figura 12).



Figura 12: Imagen del equipo agitador (Fotografía: Antonio José Alonso).

Se dejan trabajar a los digestores en las condiciones descritas durante 21 días, realizando medidas diarias del potencial metanogénico por medio de una técnica manométrica que mide la producción de biogás a partir del aumento de presión en un recipiente de volumen constante.

El potencial metanogénico de un residuo (*Biochemical Methane Potential - BMP*) se define como la producción específica de metano para un tiempo de degradación infinito. En la práctica el ensayo tiene una duración finita y el potencial se obtiene por extrapolación de la curva. El BMP se suele expresar como el volumen de metano producido en condiciones normales (273 K, 1atm) por unidad de residuo alimentado (kg SV). Debido a la complejidad de los residuos, no es posible conocer normalmente su composición, por lo que se utilizan los sólidos volátiles (SV) para describir su concentración (Fernández-Polanco, P. et al. 2005)

En este caso en lugar de cuantificar la cantidad de metano se determina la cantidad de biogás total, de donde se obtiene el potencial de producción de biogás.

2.2.1.2 Objetivos de los test BMP.

Los test BMP se llevan a cabo con el objetivo de estudiar los siguientes puntos:

- El potencial metanogénico de un sustrato en condiciones anaerobias, es decir, su biodegradabilidad ante bacterias para obtener un producto deseado (Biogás).
- La inhibición de la digestión anaerobia causada por diferentes sustratos.
- La aplicabilidad de estos sustratos a digestores piloto de un mayor volumen de trabajo.

2.2.1.3 Puesta en marcha de los ensayos BMP.

El ensayo comienza con la organización de los microreactores, y la asignación de un tapón de plástico y uno de rosca a cada uno de ellos. Además, deben ser rotulados con la mezcla de sustratos que van a contener (Figura 13).

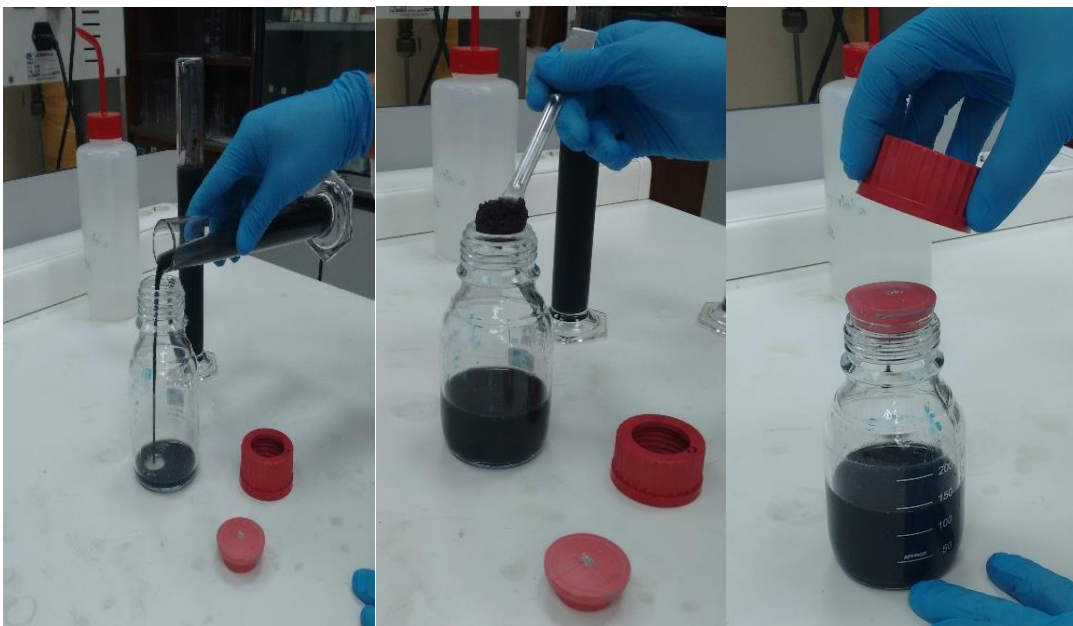


Figura 13: Imagen de la preparación de BMP (Fotografía: Antonio José Alonso).

Una vez preparados, se comienza a preparar las mezclas de residuos a estudiar. Estas mezclas se preparan en recipientes independientes y no en los propios botes que actúan como reactores. El motivo es la necesidad de muestra sobrante para su caracterización inicial. Una vez retirada la muestra destinada a ser analizada, se llena cada reactor con de 150 mL, dejando aproximadamente 100 mL como campana de almacén para el biogás producido (Figura 14).

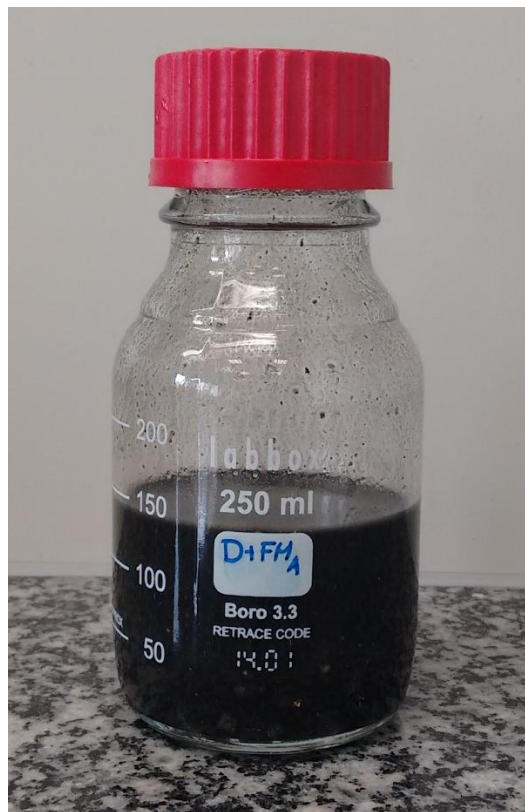


Figura 14: Imagen del digestor BMP listo para iniciar el proceso anaerobio (Fotografía: Antonio José Alonso).

Con el fin de minimizar errores de proceso y obtener resultados fiables, se recomienda la realización de los ensayos por triplicado, tal y como se realiza en esta investigación. En cada reactor se añade una biomasa madre o inóculo, el sustrato base para todos los test BMP (fango mixto), y un residuo diferente, y en ciertos casos un mismo residuo pero en cantidades distintas. Se debe reservar algún reactor para el estudio del inóculo y el fango mixto en mezcla y separados, para así tener una base comparativa en la producción conjunta con otros residuos.

El inóculo o biomasa madre se trata de un componente imprescindible para el arranque de la digestión anaerobia, ya que es la principal fuente de biomasa metanogénica activa. Dado que el proceso global de degradación anaerobia es complejo y requiere la presencia de distintos grupos de microorganismos, el origen y naturaleza del inóculo tiene una clara influencia en la cinética y niveles de degradación obtenidos (Benito, C. 2015).

En este trabajo, se utiliza como inóculo para los test BMP fango en digestión procedente de los reactores anaerobios de una planta de tratamientos de aguas residuales.

Se denomina fango mixto a la mezcla de fangos producidos en el proceso de decantación en una planta depuradora de aguas residuales. Este sustrato se utiliza como base estabilizadora del proceso anaerobio, es decir, como alimentación base para la población bacteriana, asegurando la viabilidad del proceso al menos en su parte inicial.

Es conveniente introducir el inóculo y el fango mixto en una cámara caliente a 36°C durante al menos tres días antes de iniciar el ensayo. Este tiempo es suficiente para readaptar el lodo a la temperatura del ensayo y activar a la población metanógena. La muestra de fango puede presentar alta heterogeneidad por lo que es conveniente distribuir el fango en cada ensayo de la manera más homogénea.

Para otorgar una estabilidad y una viabilidad al proceso anaerobio durante todo el ensayo, se añade en la mezcla inicial una pequeña cantidad de bicarbonato de potasio, hasta obtener una concentración de 5 g KHCO_3 L⁻¹. Además se ajusta el pH en un rango neutro, al mismo valor de pH que presenta inicialmente el inóculo, empleando una disolución de HCl o una disolución de NaOH. Asimismo, se adiciona una pequeña cantidad de una disolución que contiene varios macronutrientes, micronutrientes y elementos traza en una concentración de 1mL L⁻¹ (Figura 15).

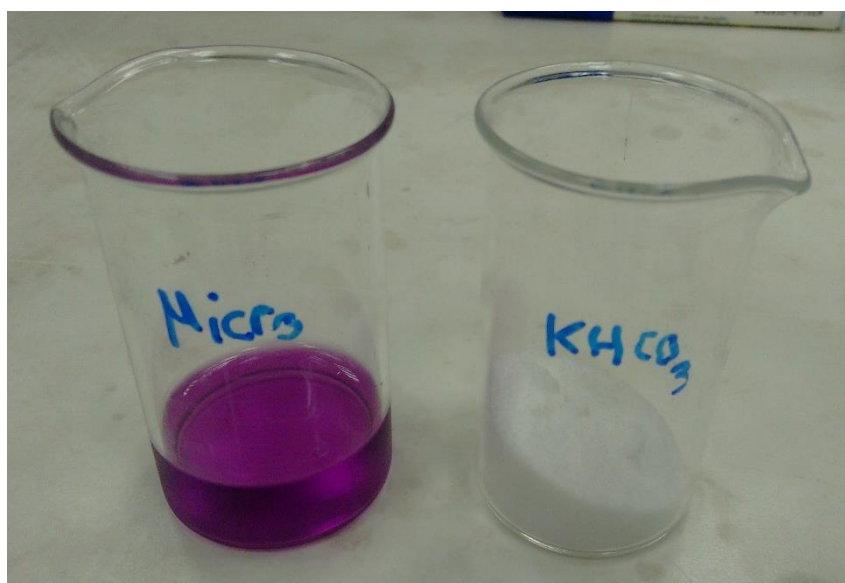


Figura 15: Imagen del Bicarbonato y los micronutrientes estabilizadores del proceso (Fotografía: Antonio José Alonso).

Una vez preparados los microreactores con las mezclas en estudio, se introducen en el equipo de agitación durante 21 días, asegurando así la homogeneidad de la mezcla en todo momento y el aprovechamiento total del volumen útil del reactor. Además este equipo de agitación está provisto de una resistencia que mantiene la temperatura de trabajo constante (36°C).

En cuanto a la producción de biogás, se cuantifica diariamente de forma manual utilizando un transductor de presión (ifm PN 5007). Tras cada medida, se vacía el gas acumulado en el espacio superior de la botella hasta que la presión indicada por el transductor iguala el valor de la presión atmosférica. Los valores de presión son convertidos a volúmenes, utilizando la ecuación de los gases ideales.

Un dato a tener en cuenta es la composición del biogás generado. Esta composición se determina extrayendo del reactor un volumen de gas conocido, utilizando una jeringa, e inyectando este volumen en un caudalímetro que contiene NaOH. El CO₂ que forma parte del biogás queda precipitado junto al NaOH obteniendo así el volumen de metano producido.

El tiempo de ensayo utilizado para los test de biodegradabilidad ha sido aproximadamente de 21 días. Durante este tiempo se estudia la adición de diferentes cantidades de glicerina para estimar la cantidad idónea a añadir al digestor piloto de 7 litros, sin que éste se vea afectado en su funcionamiento.

2.2.1.4 Seguimiento.

Se programa un seguimiento continuo de los reactores en inicio, funcionamiento y final:

1. Antes de los ensayos:

Caracterización de los residuos por separado y en las mezclas. Para su caracterización se realizan análisis de pH, SV, ST y DQO.

2. Durante el ensayo:

Medición de la producción de biogás diaria junto con el análisis de la composición del gas dos días a la semana.

3. Al final del ensayo:

Análisis de caracterización a cada mezcla transcurridos los 21 días de ensayo (DQO total, ST, SV, pH, Alcalinidad y AGV).

2.2.2. Descripción de la unidad experimental del digester anaerobio piloto.

El digester anaerobio piloto de 7 L se instalada en el laboratorio de análisis experimental del grupo investigador (grupo TAR), situado en la Escuela Universitaria Politécnica de la Universidad de Sevilla.

Los digestores y el material utilizado en los ensayos han sido facilitados por el grupo de trabajo (TAR), provenientes de experiencias anteriores.

En la figura 16 se muestra la unidad experimental compuesta por una unidad central, el reactor anaerobio con su respectiva tapadera independiente, y varias unidades complementarias, baño térmico (termostato), recirculación, bomba de alimentación y recogida de muestras, caudalímetro y válvulas de paso y gomas. A continuación se describen cada una de las unidades que lo componen:



Figura 16: Imagen de la unidad experimental completa (Fotografía: Antonio José Alonso).

2.2.2.1 Digestor anaerobio piloto (7 L.)

La unidad central base del ensayo es un reactor cilíndrico de doble camisa, situado en una estructura de soporte con cuatro apoyos. La complejidad del digestor para su correcto funcionamiento hace necesario una serie de salidas y entradas de agua, muestras y gases. En este caso el cuerpo del digestor posee dos aberturas en la parte superior situadas en puntos opuestos de la circunferencia, y dos aberturas en la parte inferior, una de ellas coincidente con el punto central de la circunferencia y otra en el extremo derecho en línea recta con la central.

Además posee una tapadera independiente con cinco nuevas aberturas, una central y cuatro dispuestas a su alrededor representando los vértices de un cuadrado.

La unión del cuerpo del digestor y la tapadera se realiza con una abrazadera que rodea la circunferencia del digestor, unida en sus extremos por un tornillo de rosca y tuerca, ajustando el contacto entre ambas superficies con silicona gel, que permite el cierre hermético e impide la fuga de gases.

A continuación podemos ver algunas imágenes del reactor ya descrito:



Figura 17: Imágenes del digestor anaerobio utilizado en el proceso. (Fotografía: Antonio José Alonso).



Figura 18: Imagen de la tapa superior del digester anaerobio utilizado en el proceso.
(Fotografía: Antonio José Alonso).

El digester es el receptáculo donde se introduce la materia orgánica mezclada con el fango y en el cual se produce la digestión anaerobia, por ello, a continuación, se describen de forma más detallada sus características:

- Reactor de vidrio encamisado de doble cilindro concéntrico y tapa troncocónica, 7 L de volumen útil y 500 mm de alto.
- Cilindro interior de vidrio DN 120 mm, Dext 140 mm, Dint 130 mm y grosor de pared de 10 mm.
- Cilindro exterior de vidrio DN 140 mm, Dext 150 mm, Dint 130 mm y grosor de pared de 10 mm.
- Tapa superior con cinco aberturas de Dint 30 mm para sondas y para entrada/salida de fluidos.
- Tapa inferior con dos aberturas de Dint 20 mm.

- Unión de digestor y tapa con bridas atornilladas de perímetro exterior 500 mm, perímetro interior 410 mm y grosor de 30 mm. Unión con 1 tornillo y tuerca de 30 mm.
- Las entradas y salidas encontradas en el cuerpo del digestor tienen un Dint de 30 mm.

2.2.2.1.1 Tapa del digestor.

El digestor posee una tapadera independiente con cinco aberturas, una central y cuatro dispuestas a su alrededor representando los vértices de un cuadrado (Figura 19).



Figura 19: Imagen superior de la tapadera del digestor anaerobio utilizado en el proceso.
(Fotografía: Antonio José Alonso).

Es una de las partes más importantes del mismo, a través de ella se introduce la alimentación o mezcla a digerir, por medio de una de sus aberturas laterales derechas con respecto al centro. La otra abertura lateral de este mismo lado se utiliza para recoger la muestra a la que se realiza el análisis.

La abertura central es utilizada como salida de gas producido, el cual se deriva hasta el caudalímetro para proceder a su medida. Las aberturas restantes pueden ser utilizadas para introducir los sistemas de medición y toma de datos (sensor de pH, conductivímetro, termómetro, etc.).

En la figura 20 se observan los distintos instrumentos de medida, en concreto medidores de pH, conductividad, redox y termómetro.



Figura 20: Imagen de los diferentes sensores multiparamétricos utilizados en la toma de medidas. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Los datos obtenidos a través de los instrumentos de medida colocados en el interior del digestor, presentan grandes disimilitudes con respecto a los medidos *in situ* tras la recogida de la muestra, tras el paso de las primeras 360 horas de estudio. Se asocia esta varianza de resultados a la mala calibración de las sondas, ya que al tratarse de un reactor anaerobio, no puede abrirse para sacar las sondas y calibrarlas semanalmente, por tanto se desestiman estos datos y se retiran las sondas interiores. Las mediciones de estos parámetros se realizan *in situ* tras recoger la muestra.

2.2.2.2 Unidades complementarias.

2.2.2.2.1 Alimentación y recogida de muestras

La alimentación del digestor con los diferentes residuos descritos anteriormente se realiza en régimen semicontinuo, alimentando el digestor cada doce horas con la mezcla de residuos adecuada en cada momento.

Se emplean las aberturas laterales derechas de la tapadera del digestor para alimentar y tomar muestras. En estas aberturas se colocan vidrios interiores que permiten hacer llegar la alimentación al centro del digestor y ser movida por la recirculación de forma rápida y eficaz, aprovechando así todo el volumen de trabajo. Las aberturas restantes de la tapadera no son utilizadas en el ensayo, por tanto, quedan selladas con tapones de corcho no poroso para evitar pérdidas de biogás (Figura 21).



Figura 21: Imagen de las aberturas superiores en la tapa del digestor. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Para la alimentación del reactor y la recogida de muestras se utilizan bombas peristálticas, puestas en funcionamiento de forma manual (Figura 22). Una única bomba con dos cabezales es la encargada de alimentar y recoger la muestra. Dicha bomba está programada con una frecuencia de vaciado/llenado de 0,003 l/s. Con esta frecuencia de alimentación tan lenta se consigue evitar inestabilidad en el digestor, introduciendo poco a poco la nueva carga y aclimatándose a la temperatura de operación. La dosis alimentada es llevada a todo el volumen del digestor por acción de la recirculación.



Figura 22: Imagen de la bomba peristáltica utilizada en el proceso (Fotografía: Antonio José Alonso).

Para la recogida de muestras se opera del mismo modo que para la alimentación, vaciando un volumen similar al alimentado para no sobrecargar la instalación (Figura 23).



Figura 23: Imagen de la instalación de alimentación y extracción de muestra utilizada en el proceso (Fotografía: Antonio José Alonso).

Los residuos ensayados se conservan en bidones de 25 L refrigerados a una temperatura de 4°C, para evitar su degradación con el paso del tiempo. Tras preparar la mezcla de alimentación se atempera antes de ser alimentada, dejándose 30 minutos a temperatura ambiente. Cuando el residuo utilizado es sólido, se emplea una varilla agitadora para que la mezcla de residuos de alimentación sea homogénea, de una textura fluida semejante a una emulsión (Figura 24).



Figura 24: Imagen de la varilla agitadora eléctrica utilizada para homogeneizar la mezcla. (Fotografía: Antonio José Alonso).

El digestor se alimenta cada doce horas, introduciendo en cada turno una mezcla de sustratos que ronda un volumen de 300 ml de media.

Es muy importante que todas las conexiones empleadas en la alimentación y recogida de muestras queden lo más herméticas posible, para evitar la entrada de aire exterior al digestor, así como la pérdida del biogás generado.

2.2.2.2 Baño térmico.

El biodigestor cuenta con una doble capa, quedando una cavidad entre ambas capas por la cual circula el agua utilizada para controlar la temperatura del mismo. El agua es llevada a la temperatura de operación por medio de un baño térmico, en él se instala un termostato, una bomba de transporte de fluidos y una resistencia (Figura 25).



Figura 25: Imagen del baño térmico utilizado en el proceso (Fotografía: Antonio José Alonso).

Este sistema permite almacenar, calentar y circular agua hasta el digesor, manteniendo su temperatura estable en todo el circuito.

El agua proveniente del baño térmico, entra en el digesor a través de una de sus aberturas laterales, concretamente la que se encuentra en la parte superior derecha (Figura 26).



Figura 26: Imagen de la entrada del agua en el digesor (Fotografía: Antonio José Alonso).

El agua introducida por la abertura superior derecha tiene salida en el digestor por la abertura inferior izquierda (Figura 27).



Figura 27: Imagen de la salida del agua desde el digestor (Fotografía: Antonio José Alonso).

En la abertura de salida se conecta una goma que traslada el agua nuevamente hasta el baño térmico, donde se estabiliza la temperatura y repite el circuito descrito.

Es importante un buen ajuste de las gomas en las distintas aberturas, ya sean las del biodigestor o las del baño térmico, para que no se produzcan fugas de agua en el circuito. En este caso, como se comenta en anteriores apartados, se trabaja en el rango de las bacterias mesófilas, normalmente entre 34-37° C, por lo cual, la temperatura de operación programada en el termostato es de unos 36° C aproximadamente.

2.2.2.2.3 Recirculación.

Para que se produzca una mezcla homogénea en el interior del digestor y la digestión se produzca de la manera más uniforme posible, se instala un sistema de recirculación de fluidos. En este sistema se hace salir el fluido tratado por la abertura superior izquierda del digestor (Figura 28), a través de una goma conectada a una bomba peristáltica. Esta bomba recircula el fluido nuevamente hasta el digestor, introduciendo la mezcla por la abertura inferior (Figura 29).



Figura 28: Imagen de la salida de recirculación en el digestor (Fotografía: Antonio José Alonso).



Figura 29: Imagen de la entrada de recirculación en el digestor (Fotografía: Antonio José Alonso).

No es necesaria ni conveniente una excesiva agitación, ya que puede evitar el contacto entre moléculas y con ello la formación de concentrados de bacterias, que degraden la materia orgánica conjuntamente a una mayor velocidad. Por tanto, se regula una velocidad de giro a pocas revoluciones, que consiga un nivel de agitación suficiente para mover el total del volumen del digestor, permitiendo que la mezcla sea homogénea y la digestión uniforme.

Las bombas peristálticas para el transporte de fluidos suelen tener una gran capacidad para asimilar caudales mucho mayores que el tratado 0,120 l/s (Figura 30). Un problema encontrado es la rotura de gomas en el proceso de recirculación, dado que el funcionamiento es ésta es continuo. La resistencia de la goma ante un contacto constante de la bomba provoca su rotura vaciando parte del contenido del digestor e interrumpiendo el proceso. Para evitar este tipo de problema, seccionamos la goma de recirculación en dos partes, colocando conexiones plásticas a ambos lados e instalando una goma interior que cambiaremos periódicamente para evitar su rotura y parálisis momentánea del ensayo (Figura 31).

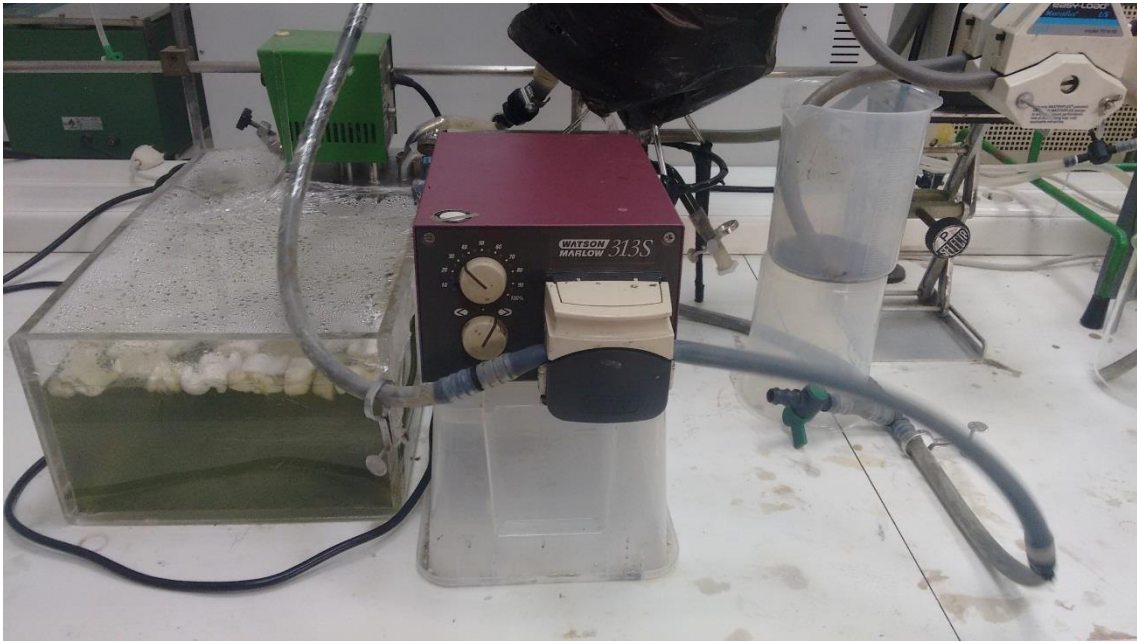


Figura 30: Imagen de la bomba peristáltica utilizada para la recirculación (Fotografía: Antonio José Alonso).



Figura 31: Imagen de la unión entre secciones en la bomba peristáltica utilizada en la recirculación (Fotografía: Antonio José Alonso).

2.2.2.2.4 Recogida de gases.

El gas producido en el proceso anaerobio crea una presión interna en el digestor superior a la exterior (atmosférica), por lo que sale por la abertura superior central de la tapadera y es conducido por una goma hasta el caudalímetro de medida (Figura 32). El gas generado entra en el caudalímetro ejerciendo una presión sobre el agua contenida en él, desplazándola hasta el exterior por la goma de salida. El agua desplazada cae a un recipiente de almacenaje, donde se mide el volumen de agua desplazada y por tanto el de biogás producido. A través de dicho caudalímetro se obtiene la medida del caudal de biogás producido por el reactor, en un ciclo y/o día.

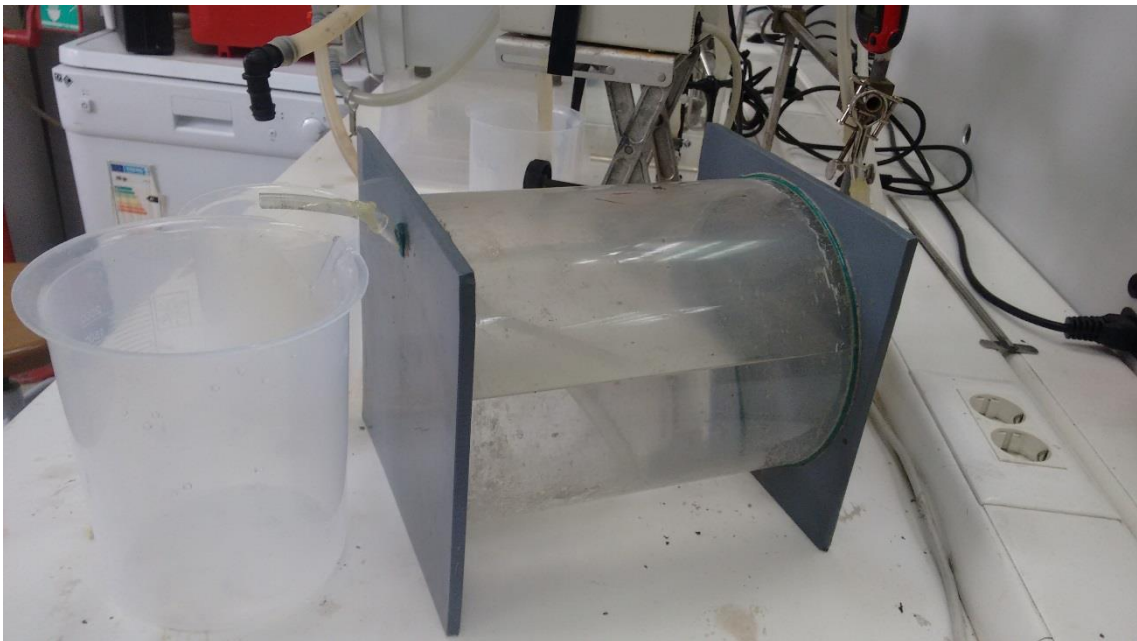


Figura 32: Imagen del caudalímetro de gas utilizado para la medida de los litros de biogás producidos (Fotografía: Antonio José Alonso).

2.2.2.3 *Desarrollo, instalación y puesta en funcionamiento del digestor.*

2.2.2.3.1 *Cuestiones generales*

El digestor trabaja en régimen semicontinuo de alimentación y en condiciones isotermas. El digestor está situado dentro de un laboratorio climatizado, por lo que no se encuentra expuesto a factores externos como pueden ser la lluvia, el viento o la radiación solar, que pueden afectar al proceso anaerobio.

Las condiciones isotermas se consiguen gracias a un termostato de inmersión. Este termostato consta de una sonda de temperatura, un controlador, una bomba y una resistencia. El termostato se coloca en un depósito almacén de agua o baño térmico con un volumen de 15 litros. La resistencia que incorpora el termostato se encarga de calentar el agua hasta la temperatura programada en el controlador, y medida por la sonda de temperatura. A través de la bomba, se circula el agua de forma continua por la camisa externa del digestor.

La salida de agua de la camisa externa del digestor es conectada al depósito de almacén de agua, allí se calienta nuevamente a la temperatura programada y repite el circuito. La impulsión del afluente y del influente se ha llevado a cabo con una bomba peristáltica, midiendo caudales de entrada y de salida iguales. Esta circulación de agua mantiene el digestor en condiciones isotermas, a una temperatura alrededor de los 36°C, temperatura óptima para el desarrollo de la experiencia anaerobia.

Los residuos y fangos de alimentación se han conservado dentro de un frigorífico para ralentizar la degradación y mantener sus características. El digestor se alimenta dos veces al día con una mezcla de sustratos de un volumen de 300 ml de media.

Para homogeneizar la nueva alimentación con el fango digerido interior, y que las condiciones sean iguales en todo el digestor, se cuenta con una recirculación ya descrita, impulsada por una bomba peristáltica que ha funcionado de forma continua.

La alimentación se realiza dos veces al día a través de una bomba peristáltica accionada de forma manual, a una velocidad de 0,003 l/s.

Al ser un recipiente de vidrio, expuesto a la incidencia de la luz, es necesario taparlo con un material opaco, para asegurar que organismos fototrópicos no proliferen y compitan con los metanogénicos. En este caso, el material utilizado ha sido el plástico negro de las bolsas que normalmente se utilizan para tirar los residuos domésticos. Se realizan varias perforaciones al plástico que cubre el digestor para así poder ver el estado interior del mismo y controlar el proceso de alimentación y toma de muestras (Figura 33).



Figura 33: Imagen de las ventanas realizadas en el plástico que cubre el digestor para ver su estado (Fotografía: Antonio José Alonso).

Como ya se ha comentado, el gas producido se dirige hasta un caudalímetro donde se mide el volumen de biogás producido.

2.2.2.3.2 Instalación.

Una vez planteado el modo de ensayo y obtenidos todos los materiales e instrumentos de trabajo se procede a la instalación de la unidad experimental.

Se comienza con el anclaje de la unidad central a la mesa de trabajo y a su punto de apoyo.

Con el digestor ya anclado se coloca la tapadera del mismo, asegurando la abrazadera periférica que une ambos cuerpos (Figura 34).

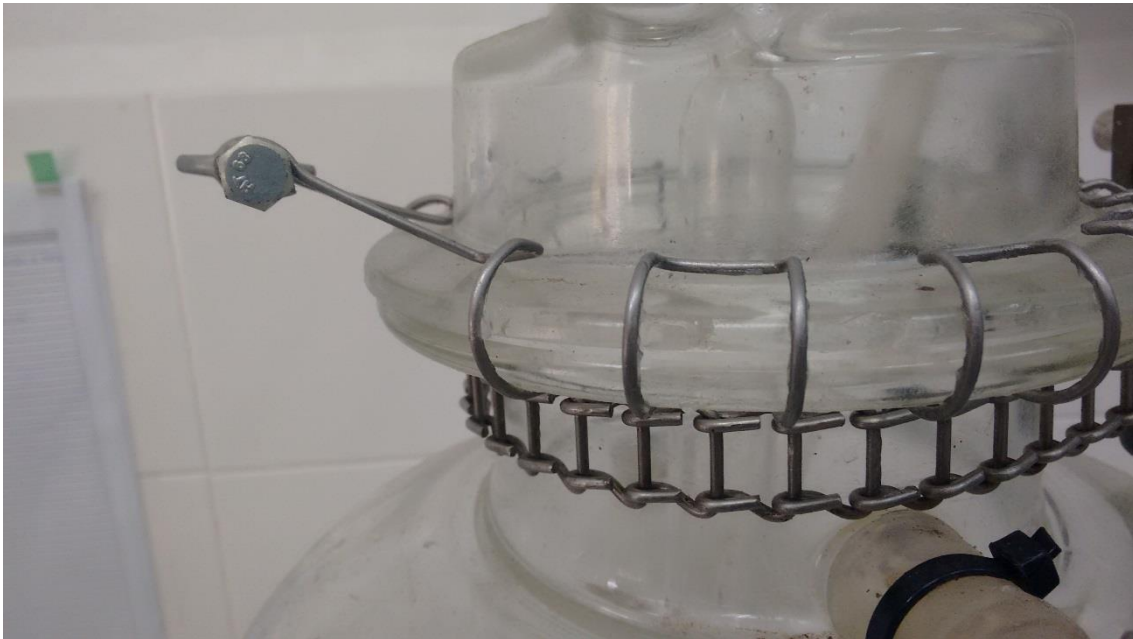


Figura 34: Imagen de la abrazadera que une la tapa al digestor (Fotografía: Antonio José Alonso).

La siguiente fase de instalación es el ajuste de las conexiones y gomas a las aberturas del digestor que se utilizan en el proceso, haciendo hincapié en la perfección de su unión para evitar posibles pérdidas. Asimismo, se sellan las aberturas restantes que no son utilizadas.

Una vez ajustadas todas las conexiones y gomas, se instalan las unidades complementarias: termostato, bomba de alimentación y toma de muestras, bomba de recirculación y caudalímetro (una vez calibrado), (Figura 35).



Figura 35: Imagen de las unidades complementarias al digester anaerobio (Fotografía: Antonio José Alonso).

Instaladas estas unidades se comprueba su correcto funcionamiento y puesta a punto con agua como fluido de prueba.

Tras programar y poner a punto las unidades complementarias con agua, se vacía el digester y se cubre con el plástico opaco para evitar la radiación de la luz (Figura 36).



Figura 36: Imagen del digester cubierto por el plástico protector (Fotografía: Antonio José Alonso).

Con este último paso el digestor se encuentra en óptimas condiciones para arrancar el ensayo.

2.2.2.3.3 Arranque.

En el proceso de arranque se procede al llenado del digestor con fango madre de digestión, un fango con una población ya adaptada a trabajar en condiciones anaerobias.

Una vez lleno, se vuelve a comprobar el correcto funcionamiento de las unidades complementarias y se realiza la calibración del termostato para conseguir las condiciones isotermas propuestas para llevar a cabo el ensayo.

La alimentación comienza tras conseguir las condiciones de trabajo planteadas. El digestor se alimenta en primera instancia con fango mixto de depuradora, hasta encontrar una estabilidad en la producción de gas que indique que el proceso se desarrolla correctamente. Una vez en este punto, se comienza el ensayo con otros residuos para ver si se cumplen las hipótesis formuladas y los objetivos marcados.

2.2.2.3.4 Seguimiento.

Para el estudio del digestor se ha programado un seguimiento continuo monitorizado de la siguiente manera:

- Toma de datos *in situ* tras recogida de muestras: pH y temperatura.
- Análisis de caracterización a la alimentación, la salida y los sustratos: DQO total, sólidos totales, sólidos volátiles, alcalinidad total, alcalinidad soluble, AGV total y AGV soluble.
- Medición diaria del caudal de gas contabilizado para tener un registro diario de volumen producido.

2.2.2.3.5 Periodo de estudio.

El estudio de los distintos residuos se realiza de forma secuencial:

La primera fase consiste en el estudio del comportamiento y estabilización de un digestor piloto de 7 litros de volumen, añadiendo una alimentación compuesta en su totalidad por fango mixto.

Tras alcanzar una estabilidad en la producción de biogás, que indica una estabilidad en el proceso anaerobio, se empieza a adicionar una alimentación de fango mixto junto con alguno de los residuos estudiados. La cantidad a añadir es tomada de experiencias anteriores con los mismos residuos en digestores anaerobios de una sola etapa.

Se estudia de este modo el paté, el lixiviado y la glicerina, obteniendo resultados dispares detallados en el apartado de discusión y resultados.

La segunda fase, dados los interesantes resultados obtenidos en la glicerina, se estudia con más detenimiento en micro-reactores anaerobios de una sola etapa, para así optimizar la cantidad a adicionar en la alimentación y conseguir una estabilidad de proceso en el digestor piloto.

Una vez estudiada en micro-reactores, se vuelve a introducir en el digestor piloto, obteniendo mejores resultados que en la experiencia anterior, pero no logrando la estabilidad final requerida.

Una tercera fase innovadora es el estudio de recuperación y aumento en la producción de biogás de un reactor anaerobio caído por un residuo no adecuado para su funcionamiento. Esta recuperación se intenta conseguir a partir de una alimentación con un residuo distinto que vuelva a estabilizar el digestor, evitando así su caída y recuperando las condiciones normales de trabajo. Con esta premisa, se comienza a alimentar el digestor con un residuo derivado de la fabricación de productos lácteos, el lactosuero. La mezcla de fango mixto y lactosuero funciona de la forma esperada optimizando el proceso.

Una cuarta fase en el proceso es la inclusión nuevamente de la glicerina en el digester junto al lactosuero. La dificultad de gestión de un residuo complicado como es la glicerina hace muy interesante su aprovechamiento en digestión anaerobia, convirtiendo a la depuradora en gestora de residuos. Con esta intención se añaden distintas cantidades de glicerina a la mezcla de fango mixto y lactosuero, buscando una cantidad idónea para una producción extra de biogás, sin desestabilizar el proceso.

Con la optimización de este ensayo se concluye esta experiencia con resultados positivos.

2.3 Descripción de los Métodos de Análisis.

Para comprobar el buen funcionamiento de los digestores anaerobios puestos en marcha y sus rendimientos de operación, se evalúan periódicamente los distintos parámetros de control y operación, a través de la realización de los siguientes análisis.

2.3.1 Determinación del pH (APHA, 4500-H⁺,2015) y de la temperatura.

El pH mide la concentración de iones hidrógeno. Un pH elevado indica una baja concentración de iones H⁺, y por tanto un medio alcalino. Por el contrario, un pH bajo indica la acidificación del medio. Dado que los principales microorganismos involucrados en este proceso trabajan de forma óptima en un rango de pH de 7-8, este debe mantenerse cercano a la neutralidad.

Es el primero de los datos a conocer tras realizar la toma de muestras diaria. El pH-metro utilizado para medir este parámetro es CRISON GLP 21+, que contiene una sonda portátil CRISON (5200T). Dicho pH-metro permite trabajar en condiciones normales con un límite de precisión $\pm 0,1$ unidades de pH.

De forma simultánea se mide la temperatura con un termómetro de mercurio convencional, debiendo mantenerse cercana a los 36°C. La medición de este parámetro presenta una precisión de $\pm 0,1$ °C.

2.3.2 Demanda Química de Oxígeno (DQO) (APHA, 5220 B, 2005).

Representa la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar por vía química la totalidad de la materia orgánica presente en la muestra.

En la actualidad existen métodos sencillos y rápidos para realizar las medidas de DQO. Un ejemplo son los métodos colorimétricos, en los que se introduce la muestra en tubos ya preparados para su análisis y que tras una breve espera, se introducen en un espectrofotómetro donde se mide directamente la concentración de materia orgánica de la muestra.

Este novedoso método es excesivamente caro para un laboratorio experimental, por tanto no está disponible en muchos laboratorios, obligados a realizar medidas de la DQO de una manera diferente.

En este caso la medición se realiza a partir del Método 5220B (APHA, 2005), explicado a continuación. Se toman 10 mililitros de muestra y se diluyen en 2 litros de agua destilada. De esta dilución se toman 5 mililitros, que se introducen en un tubo de ensayo. A estos tubos de ensayo se les aplica un tratamiento de oxidación. La reacción de oxidación se realiza en bloque de digestión con sistema de reflujo abierto. Consiste en la oxidación de la materia orgánica empleando una disolución de dicromato potásico en un medio ácido (H_2SO_4), en presencia de sulfato de plata que actúa como catalizador. Esta mezcla cuyas características se expresan en la figura 37 es calentada a $150^\circ C$ durante 120 minutos en tubos de ensayo.

	Concentración (N)	Volumen (mL)
Dicromato potásico	0,25	10
Sulfato ferroso amónico	0,10	
Ácido sulfúrico + sulfato de plata		30
Muestra		20

Figura 37: Tabla con los datos específicos del método para la determinación de la DQO empleado en este estudio.

Posteriormente, se dejan enfriar los tubos a temperatura ambiente y se realiza la determinación de la DQO, midiendo el dicromato en exceso, que no reacciona en el proceso de digestión, con ayuda de una solución de sulfato de hierro y amonio (sal de Möhr, 0,25 N). El indicador de oxi-reducción utilizado es la ferroína, añadiendo solo unas gotas en cada titulación.



Figura 38: Imagen del indicador a utilizar en la valoración para la determinación de la DQO. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Este volumen de sal de Möhr obtenido se introduce en la siguiente fórmula para calcular el dato de DQO que necesitamos.

$$\frac{(B - V) \times M \times 8000}{V_m}$$

Donde, B es el volumen de sal de Möhr esperado en una digestión correcta, V es el volumen de sal de Möhr obtenido en nuestra muestra, M la molaridad de la sal de Möhr, 8000 la constante de equivalencia y Vm es el volumen de muestra analizada.

Los resultados se expresan en mg de O₂, necesarios para oxidar un litro de muestra (mg.L⁻¹).

La determinación presenta una precisión de $\pm 0,05 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$

2.3.3 Alcalinidad Total.

Otro análisis para el seguimiento del digestor es la alcalinidad total, en ella se mide la concentración de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos presentes en la muestra, aunque también puede incluir boratos, fosfatos y otras bases presentes.

Para su análisis se recogen 25 ml de muestra a los que se añade 100 ml de agua destilada en un Erlenmeyer. Se realiza una valoración a la mezcla con un ácido fuerte, como es el ácido clorhídrico (0,1 N). Se mide el pH de la muestra en un inicio, debiendo estar cercano a la neutralidad. A medida que se añade el ácido fuerte, el pH va bajando hasta que llega a pH 4, donde se para la valoración y se anota el volumen de ácido utilizado indicado en la bureta desde la que se añade el ácido.

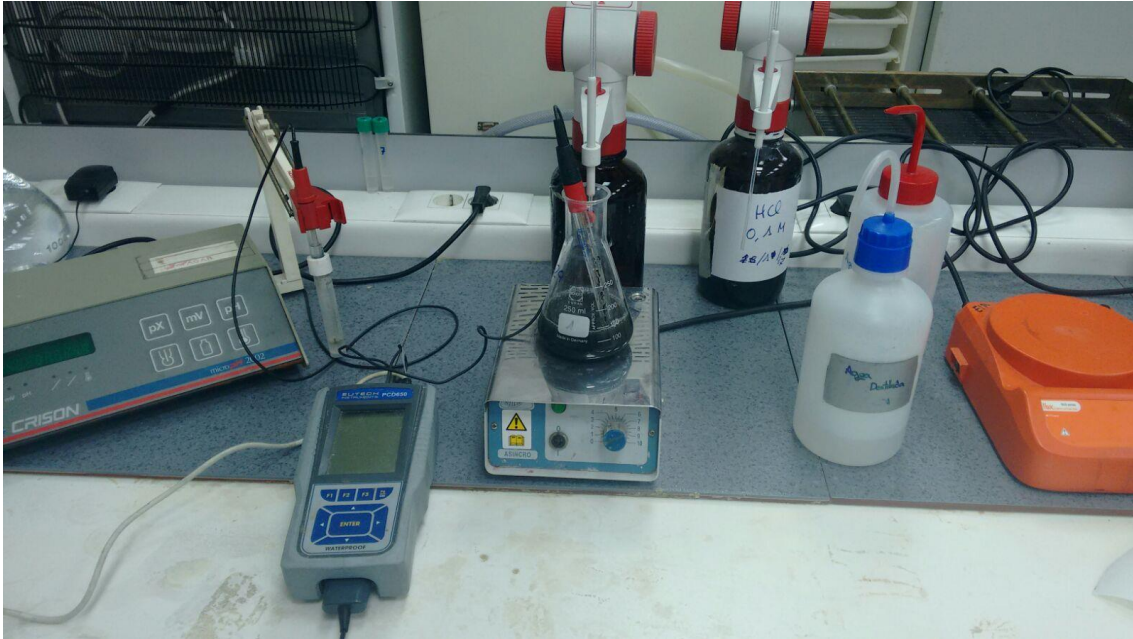


Figura 39: Imagen de la valoración realizada para obtener el dato de alcalinidad. (Fotografía: Antonio José Alonso).

El dato obtenido se asocia a la alcalinidad total, calculada con la siguiente fórmula:

$$\text{Alcalinidad (mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}) = \frac{A \times N \times 50000}{V}$$

Donde, A es el volumen de disolución de ácido estándar gastado en la valoración (en mL), N es la normalidad el ácido estándar utilizado, V es el volumen de muestra utilizado (en mL) y 50000 es una constante de equivalencia.

Los resultados son expresados como g.L⁻¹ de CaCO₃ o acético.

Otra medida realizada de la misma forma es la alcalinidad soluble. Este tipo de alcalinidad se realiza de la misma manera que el proceso anterior, con la salvedad de filtrar o centrifugar la muestra en un inicio. Los 25 ml de muestra inicial junto con los 100 ml de agua destilada son filtrados en una bomba de vacío con un filtro de 0,7 µm de diámetro de poro.

Con la filtración se consigue retirar la máxima cantidad posible de sólidos encontrados en la muestra. Otra forma de retirar los sólidos de la muestra es centrifugándola durante 10 min a 3000 r.p.m.

Para su centrifugado se reparten los 25 ml de muestra iniciales en tubos de centrifuga, con un volumen equitativo en todos ellos. Estos tubos son centrifugados tres veces, en primera instancia con la adición de 25ml de agua destilada, se añade 50 ml de agua en la segunda y otros 25 ml en la tercera. Entre centrífuga y centrífuga se retira el sobrenadante de los tubos a un Erlenmeyer, el cuál será objeto de nuestro análisis.

Tras el centrifugado o filtrado de la muestra, se realiza el análisis tal y como se ha explicado anteriormente, calculando el valor de alcalinidad soluble con la misma fórmula empleada en la alcalinidad total.

2.3.4. Ácidos Grasos Volátiles.

Es importante conocer la producción de ácidos grasos volátiles, pues marca el punto de estabilización que presenta el digestor, indicando el correcto funcionamiento en las cinéticas de las reacciones de producción y eliminación de dichos ácidos.

Los ácidos grasos volátiles determinados son: el ácido acético, propiónico, butírico, isobutírico, valérico e isovalérico.

Para realizar el análisis se aprovecha el proceso de análisis anterior, donde se calculaba la alcalinidad. Una vez terminado el análisis se recoge el matraz y se pone a calentar en la placa calefactora.



Figura 40: Imagen de la muestra calentada en la placa calefactora. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Una vez comience a hervir, se cuentan tres minutos de reloj y se retira el matraz de la placa. Este matraz es llevado hasta un baño de agua donde enfriamos a temperatura ambiente. Una vez frío se realiza una valoración de la misma forma que en el análisis de alcalinidad, empleando esta vez una base fuerte, como es el hidróxido sodico (NaOH). Se mide el pH, bajo en sus inicios debido al ácido clorhídrico añadido en el proceso anterior, hasta llevarlo a pH 7 con la adición de la base fuerte. Tal y como se realiza en el análisis de alcalinidad, se anota el dato de volumen de base gastado en el proceso y se lleva a la siguiente fórmula para su cálculo:

$$\text{AGV (mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}) = \frac{B \times N \times 50000}{V}$$

Donde, B es el volumen de disolución de base estándar gastado en la valoración (en mL), N es la normalidad la base estándar utilizado, V es el volumen de muestra utilizado (en mL) y 50000 es una constante de equivalencia.

Los resultados son expresados como g.L^{-1} de CaCO_3 o acético.

2.3.5 Sólidos Totales (ST): Sólidos totales fijos (STF) y Sólidos totales Volátiles (STV) (APHA, 2540 D, 1992).

El contenido en materia sólida de la muestra está formado por varias fracciones que engloban tanto los sólidos orgánicos como inorgánicos:



Figura 41: Imagen de la clasificación de sólidos (Pozo, L. 2013).

Con la medida de los sólidos totales fijos y volátiles, es posible determinar la cantidad de materia sólida inerte y la cantidad de materia orgánica o biomasa existente en la muestra.

Para realizar el análisis correspondiente a los sólidos fijos, se vierten 25 mililitros en un crisol previamente pesado. Este crisol se mete a estufa a una temperatura aproximada de 105°C durante 24 horas. Una vez pasado el tiempo indicado, se saca el crisol y se deja en la campana de enfriamiento durante 10 minutos, antes de ser pesado nuevamente. Se anota el valor dado y se comienza el análisis de sólidos volátiles.

Para ello se introduce el crisol proveniente del análisis anterior en una mufla u horno a 550°C durante 20 minutos. Una vez transcurridos estos 20 minutos, se retira el crisol a una estufa programada a una temperatura de 105°C, con la intención de no producir un cambio brusco de temperatura y producir error en el pesado.

En esta estufa se almacena durante 10 minutos para suavizar su temperatura. Posteriormente se saca el crisol y se lleva a la campana de enfriamiento durante otros 10 minutos. Cuando el crisol está a temperatura ambiente, se pesa por última vez y se anota el valor obtenido.



Figura 42: Imagen de la campana de enfriamiento y la balanza de precisión (Fotografía: Antonio José Alonso).

El cálculo de la materia inerte y la materia orgánica se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$ST = \frac{P2-P1}{V} \times 1000$$

$$SV = \frac{P2-P3}{V} \times 1000$$

Siendo:

ST: Sólidos totales (g.L-1).

SV: Sólidos volátiles (g.L-1).

P1: Tara de la cápsula vacía (g).

P2: Peso de cápsula + muestra tras 24 h a 105°C.

P3: Peso de cápsula + muestra tras 20 minutos a 550°C.

V: Volumen de muestra (L).

Los resultados se expresan como mg L^{-1}

La determinación presenta una precisión de $\pm 0,1 \text{ mg L}^{-1}$

2.3.6. Determinación de la producción de biogás

La producción de biogás es un parámetro indicativo de la biodegradabilidad del efluente problema, los gases producidos son el producto final del metabolismo de las bacterias anaerobias (vía catabolismo).

Además, el análisis de su composición, en especial el dióxido de carbono, proporciona una medida indirecta de la actividad de las bacterias metanogénicas y de la evolución de la alcalinidad (equilibrio carbónico), (Ruiz Cabrera, C. 2002).

El volumen de gas producido se determina de forma diferente según el tipo de digestor empleado.

En cuanto a los microdigestores, el volumen de biogás producido se cuantifica manualmente utilizando un transductor de presión (ifm PN 5007), (Figura 43).



Figura 43: Imagen del equipo de medida de la presión (Fotografía: Antonio José Alonso).

Para realizar la medida de presión se coloca una aguja en el medidor y se introduce en el microdigestor reflejando la presión medida en bar (Figura 44).



Figura 44: Imagen de la medida del biogás producido (Fotografía: Antonio José Alonso).

Los valores de presión son convertidos a volúmenes, utilizando la ecuación de los gases ideales.

El cálculo teórico basado en esta ley funciona con la suposición de que la solubilidad del metano en el medio es despreciable. El aumento de la presión se relaciona con un aumento en el número de moles del sistema.

La producción de Biogás se calcula a partir de los datos de presión .Para calcular el volumen de Biogás producido se utiliza la siguiente fórmula:

$$\frac{V \text{ cámara gas} \times T}{P \times T \text{ ensayo}} \times \frac{\text{Presión medida}}{1,01 \text{ mbar}}$$

De donde;

P = presión en condiciones normales.

V cámara gas= Volumen de la cámara de gas del BMP (dm³)

T = Temperatura de referencia (273K)

T Ensayo = Temperatura del ensayo (K)

Presión medida= presión medida en los ensayos (mbar)

Mb =1,101325 para quitar los mbar, está dividido entre mil para que el resultado del volumen de biogás se obtenga en mililitros.

Con respecto al digestor piloto de 7 litros, el biogás generado se mide directamente a través de un caudalímetro. En la salida de biogás generado se conecta un caudalímetro que mide en continuo. Este caudalímetro se fábrica de forma artesanal, consiste en un recipiente herméticamente sellado con tres salidas. La primera salida (1), corresponde a la conexión con el digestor y por tanto la entrada del biogás producido. Este biogás genera una presión en el agua contenida en el recipiente, desplazándola hasta salir por la salida 2 hasta un recipiente de almacenaje.

Una vez desplazada toda el agua contenida en el recipiente se mide el volumen de agua desplazado como volumen de gas producido y se vuelve a llenar el recipiente con agua. El llenado se realiza por la salida 2 a través de una manguera conectada a la red de agua local. Esto ejerce una presión hacia el digestor que provoca que el agua se desplace por la goma hasta su interior. Este problema se soluciona abriendo la salida número 3, dejando escapar el aire introducido en el proceso de llenado, evacuándolo a través de una manguera hasta el exterior. Una vez llenado el recipiente se cierra la salida número 3 y la producción de biogás vuelve a generar presión en el caudalímetro, desplazando nuevamente el agua hasta el recipiente de almacenaje (Figura 45).

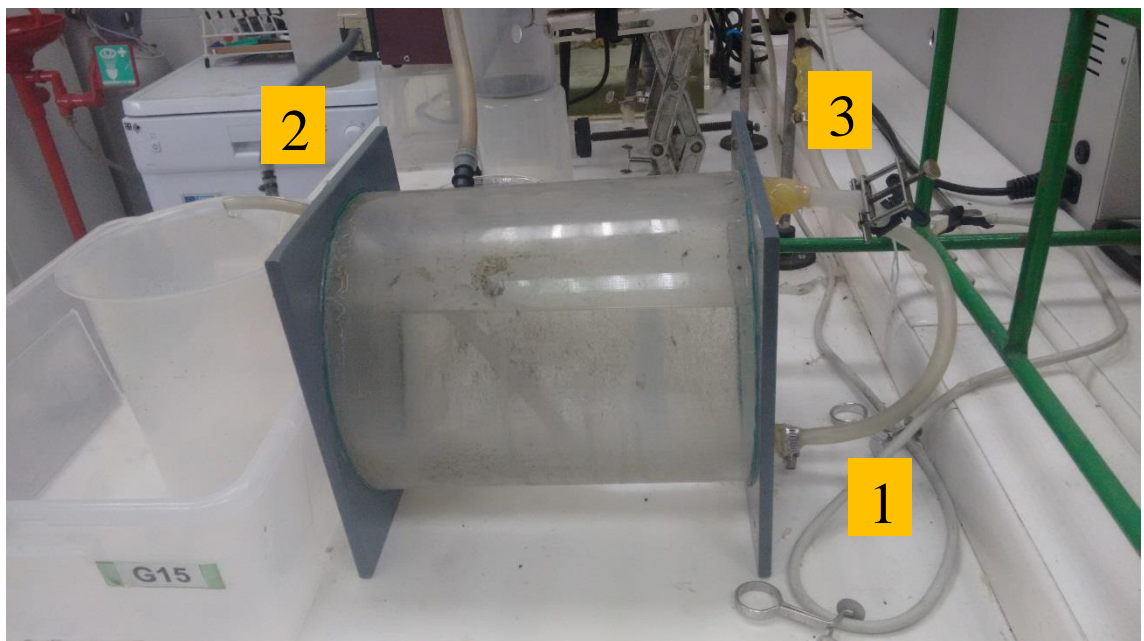


Figura 45: Imagen del caudalímetro utilizado en el proceso anaerobio (Fotografía: Antonio José Alonso).

Se contabilizan los litros producidos al día por el digestor llevándolos a un sistema informático para ver su evolución en el tiempo gráficamente.

Para asegurar que el caudalímetro mide correctamente, se calibra anteriormente.

Se realizan periódicamente medidas de la composición del biogás. El proceso seguido para determinar la composición del biogás, se basa en hacer pasar un volumen conocido de éste, extraído con una jeringa desde el digestor, por un caudalímetro que contiene en su interior NaOH.

Al introducir el biogás en el baño de NaOH, queda precipitado el CO_2 y por tanto el volumen desplazado y medido por el caudalímetro corresponde al metano (Figura 46). Con el dato de metano se puede obtener el de CO_2 por simple diferencia con el volumen total introducido. Se extrapola la relación obtenida a la producción normal de biogás, obteniendo la composición de éste. En general la composición obtenida corresponde con un 60 % de metano y un 40% en CO_2 .



Figura 46: Imagen del baño de NaOH utilizado para medir la composición del gas generado (Fotografía: Antonio José Alonso).

2.4 Instalaciones e instrumentación de laboratorio.

Las distintas instalaciones e instrumentos utilizados para la realización de los análisis anteriormente descritos son las siguientes:

- Estufa y mufla

Utilizados para la determinación de los sólidos totales y volátiles que contiene la biomasa a analizar.



Figura 47: Imágenes de la mufla u horno (derecha) y la estufa (izquierda) utilizada en el análisis.

- Balanza de precisión.

Utilizada en el análisis de sólidos, así como para otras posibles aplicaciones en lo que respecta al pesado de muestras o reactivos.



Figura 48: Balanza de precisión utilizada para realizar las pesadas en los análisis. (Fotografía: Antonio José Alonso).

- Campana de enfriamiento o desecador.

Utilizada en la determinación de sólidos para el enfriamiento de las muestras a su salida del tratamiento térmico.



Figura 49: Imagen de las campanas de enfriamiento utilizadas en el análisis. (Fotografía: Antonio José Alonso).

- pH-Metro, Conductivímetro

Utilizado para la medición diaria de la conductividad y del pH de la biomasa en digestión. Además se emplea para controlar las valoraciones en los análisis de alcalinidad y AGV.



Figura 50: Imagen del pH-metro utilizado en la medición. (Fotografía: Antonio José Alonso).

- Centrífuga

Utilizada para separar la fase sólida de la líquida en el análisis de alcalinidad y AGV soluble.



Figura 51: Imagen de la centrífuga utilizada en el análisis. (Fotografía: Antonio José Alonso).

- Dispensador programado

Dado que trabajamos periódicamente con los mismos volúmenes, se colocan dispensadores preparados para capturar un volumen determinado en los botes que contienen los compuestos necesarios en el proceso, facilitando así la toma de volúmenes constante y la realización de los análisis.

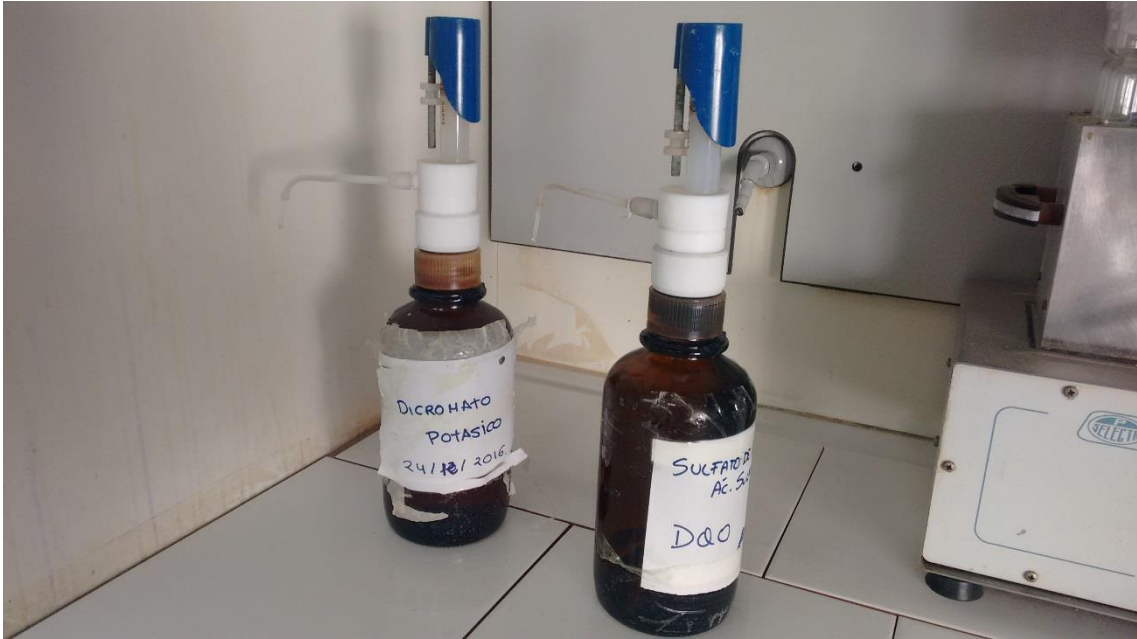


Figura 52: Imagen de los dispensadores programados utilizados en el análisis. (Fotografía: Antonio José Alonso).

- Buretas electrónicas

Para realizar las valoraciones utilizamos buretas electrónicas, mucho más exactas en las medidas que otras manuales.

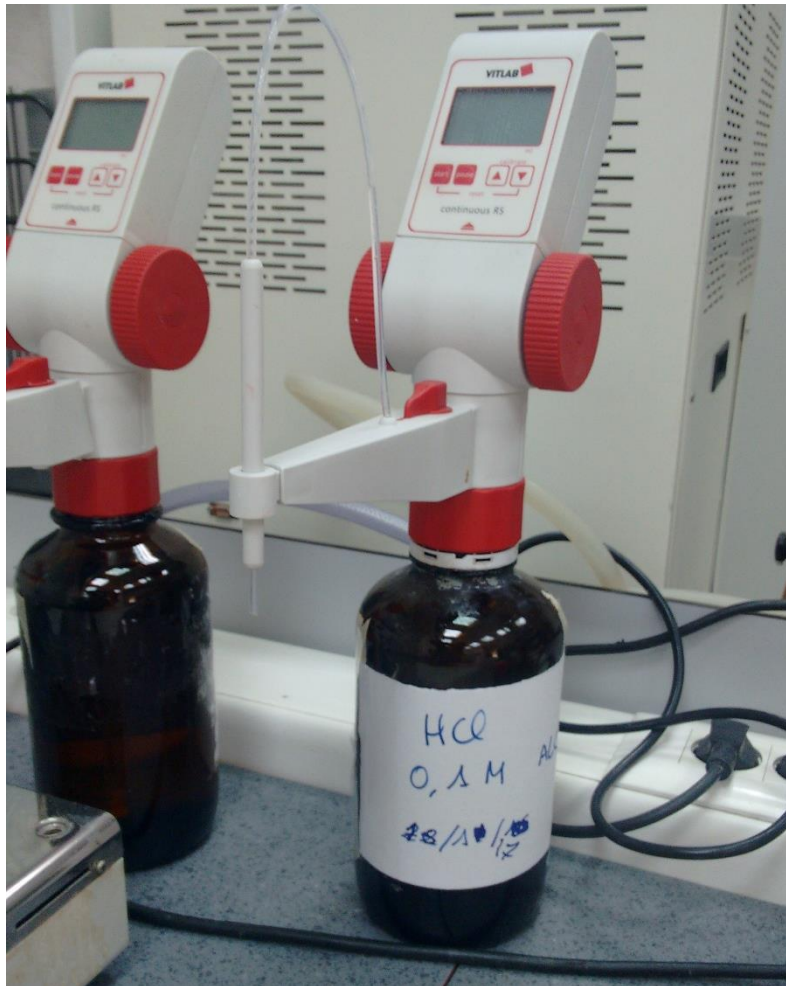


Figura 53: Bureta electrónica y manual utilizada en el proceso de análisis. (Fotografía: Antonio José Alonso).

- Placa calefactora

Utilizada para llevar a ebullición las muestras de los distintos análisis.



Figura 54: Imagen de la placa calefactora utilizada en el análisis. (Fotografía: Antonio José Alonso).

- Digestor

Pequeño digestor con receptáculos preparados para tubos de ensayos donde se realiza la digestión de la muestra diluida, para posteriormente realizar los análisis de DQO.



Figura 55: Imagen del digestor utilizado para realizar el análisis de DQO. (Fotografía: Antonio José Alonso).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de los residuos y fangos utilizados.

3.2 Ensayo con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

3.3 Ensayo con Lixiviado.

3.4 Ensayo con Glicerina.

3.5 Ensayo con Lactosuero.

3.6 Ensayo Mezcla de Lactosuero y Glicerina.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se argumentan los resultados obtenidos en el estudio de un proceso de digestión anaerobia en digestores piloto de laboratorio. Posteriormente se discute si cumplen las hipótesis propuestas y alcanzan por tanto los objetivos marcados.

El digestor piloto de laboratorio ha funcionado en régimen anaerobio durante aproximadamente 24 meses, de forma casi ininterrumpida, desde Enero de 2015 a la actualidad, donde se continúa su investigación para poner en prácticas posibles aplicaciones futuras propuestas en este trabajo.

El régimen de alimentación de este digestor ha sido semi-continuo, estableciendo dos alimentaciones diarias con un volumen total medio de 0,400 L. Cada quincena, la EDAR que proporciona los residuos en estudio y los fangos utilizados, provee al equipo investigador con nuevos sustratos, para reponer los ya acabados y evitar una degradación de los aún conservados.

A tener en cuenta la inestabilidad producida en el digestor en cada cambio de alimentación, haciendo necesario un periodo de adaptación hasta su adaptación al nuevo residuo durante un periodo breve de tiempo. Por este motivo, todos los residuos y fangos estudiados se caracterizan a su entrada en laboratorio en términos de DQO, Sólidos totales, volátiles y fijos, % materia volátil y pH.

Los análisis a las muestras tomadas del digestor se analizan tres veces por semana, mientras que las mediciones del gas generado se realizan diariamente. La composición de éste se comprueba dos días a la semana con cada cambio de alimentación.

Con los resultados obtenidos se comprueban las hipótesis expuestas, demostrando la viabilidad del proceso anaerobio en laboratorio y la utilidad de los residuos en el ensayo.

La viabilidad del ensayo se mide en la producción de biogás producida con respecto a la esperada en el proceso. Los valores de estabilidad del proceso quedan reflejados en cada uno de los sustratos en términos de DQO, % materia volátil, alcalinidad, AGV y pH, siendo comparados con una base establecida de éstos parámetros en un proceso anaerobio exitoso.

La demanda química de oxígeno (DQO), es un parámetro que representa el contenido de materia orgánica de un residuo a través del oxígeno necesario para oxidar químicamente la materia orgánica. Por tanto, analizando el contenido de DQO del sustrato que estamos introduciendo en el digestor y la materia obtenida tras la digestión, podemos comprobar en qué medida se está eliminando la materia orgánica en nuestro digestor.

La cantidad de microorganismos que existen en el digestor es representada por el porcentaje de materia volátil medido. Este porcentaje corresponde a los sólidos volátiles medidos, tal y como se describe en el apartado Materiales y Métodos de este escrito. La cantidad de microorganismos existentes en un digestor refleja el estado en el que se encuentra. Una estabilidad en los microorganismos representa un buen funcionamiento del proceso, una correcta alimentación y un desarrollo idóneo de las reacciones del proceso anaerobio. Un aumento de la masa microbiana supone tanto una excelente reproducción de las distintas colonias, como un entorno con las condiciones idóneas para su desarrollo. Un auge excesivamente alto en la cantidad de microorganismos, supone una mayor competitividad por el alimento y la posible desestabilización del digestor.

Una escasa población microbiana indica que la alimentación suministrada es escasa o que las condiciones que rodean su hábitat no son las más indicadas.

La producción de ácidos grasos volátiles dividida por la alcalinidad debe de mantenerse dentro del rango 0.1- 0.4, rango que asegura la estabilidad del proceso. Cualquier variación de este rango supone un desequilibrio en el sistema.

El pH es un factor clave que indica en qué fase del proceso estamos y las reacciones que se están produciendo o van a producirse en el reactor. Para un correcto funcionamiento del sistema, el rango de pH debe de estar entre 6,5 y 8.

Con el estudio de todos estos parámetros, se puede indicar si el proceso de digestión anaerobia con un co-sustrato de apoyo se realiza correctamente, con una gran estabilidad y una producción de gas positiva.

Los residuos utilizados en este estudio son el residuo del deshuesado de la aceituna de mesa, el lixiviado, la glicerina y el lactosuero. Se presentan los datos obtenidos con cada uno de los residuos en un proceso de digestión anaerobia, tras un período de estabilización del digestor.

3.1 Caracterización de los residuos y fangos utilizados.

Cada uno de los residuos es caracterizado una vez recibido en el laboratorio. La investigación tiene una duración de aproximadamente 24 meses, los residuos estudiados han sido conservados en frigorífico a 4°C, manteniendo sus características iniciales y evitando su degradación. El fango mixto ha sido recibido de quince en quince días, por lo que su caracterización ha sido más asidua.

Los datos de la tabla 56 presentan la caracterización de los fangos y residuos ensayados en esta investigación. Los datos expuestos representan una media del total de sus análisis, siendo representativa de sus características, ya que los datos de caracterización representan una monotonía en sus resultados.

Figura 56: Tabla de Caracterizaciones de resultados.

Residuos y Fangos	pH	DQO (mg/L)	ST (mg/L)	SV (mg/L)	MV (%)	SF (mg/L)
Fango Digerido	8,5	12.345	15.185	7.442	49	7.743
Fango Mixto	5,6	36.776	26.080	19.735	76	6.345
Residuo del deshuesado de la aceituna de mesa		420.850	320.000	295.000	92	25.000
Lixiviado	7,9	37.203	23.274	13.828	59	9.446
Glicerina	5,7	85.832	43.268	34.228	79	9.040
Lactosuero	4,5	63.068	45.520	34.075	75	11.445
Error	± 0,01	± 0,7	± 0,9	± 0,8	± 1	± 0,8

Se puede observar que todos los residuos estudiados a excepción del lixiviado poseen una DQO alta, que sugiere un comportamiento favorable para una producción extra de biogás en un proceso anaerobio. En el caso del lixiviado, si no desestabiliza el proceso anaerobio, puede adicionarse como co-sustrato aunque no produzca una cantidad extra de biogás, debido a su peligrosidad como contaminante.

Todos los residuos poseen un porcentaje alto de MV, que asegura una población bacteriana que degrade la materia orgánica en el proceso anaerobio, el mayor porcentaje lo posee el residuo del deshuesado de la aceituna de mesa y el menor el lixiviado. En cuanto al pH, el lactosuero, la glicerina y el fango mixto poseen un pH ácido que puede desestabilizar el digestor, el lixiviado y el paté no deben de causar problemas para que el digestor mantenga la neutralidad.

El fango digerido posee datos que referencian su estabilidad como inóculo para el ensayo BMP.

3.2 Ensayo con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

El primero de los ensayos se realiza con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa proveniente de los residuos de la extracción del hueso de la aceituna de mesa. Se introduce en el digestor tras una pequeña homogeneización con el fango mixto, por medio de una varilla agitadora, que mejora su comportamiento como fluido.

En un primer momento se alimenta el digestor solo con fango mixto de depuradora para estabilizar el proceso anaerobio. Tras este periodo de estabilización se comienza a introducir el residuo de aceituna, estudiando el efecto que tiene este sobre el proceso ensayado. Además, se ensayan diferentes adiciones de residuo para encontrar la cantidad adecuada para la optimización del proceso anaerobio.

- Discusión de resultados.

Los primeros datos de la figura 57 representan el potencial de producción de gas que tiene el digestor en el proceso de co-digestión. En diversas columnas se exponen una media de los litros diarios que el digestor produce a la semana sin y con las distintas cantidades de residuo. En la última columna se representa el incremento o pérdida de biogás producido por el efecto del residuo añadido en el proceso anaerobio.

Los datos expuestos se expresan como la media de litros producidos por el digestor a la semana, para así realizar más fácilmente la comparación entre datos.

En un inicio tras el período de arranque y estabilización, la producción de gas generada con la adición del residuo no llega a la producida por el digestor con tan solo el fango mixto. Este dato cambia a lo largo de las semanas de estudio, aumentando su producción tras incrementar la cantidad de residuo añadido.

En la semana ocho la producción decae debido a la excesiva carga en la alimentación y la no adaptación del digestor a ella. En las semanas restantes la

producción de biogás aumenta y se estabiliza con un incremento medio del 10 %, de lo que se deduce que el punto crítico donde se produce la mayor cantidad de gas sin desestabilizar el proceso es con 5,6 gramos de paté. Aumentando la dosis de residuo no se encuentra un beneficio significativo con respecto a la producción de biogás, aunque sí que se puede adicionar, ya que no desestabiliza el proceso anaerobio y elimina el excedente de residuos, convirtiendo a la EDAR en gestora de residuos.

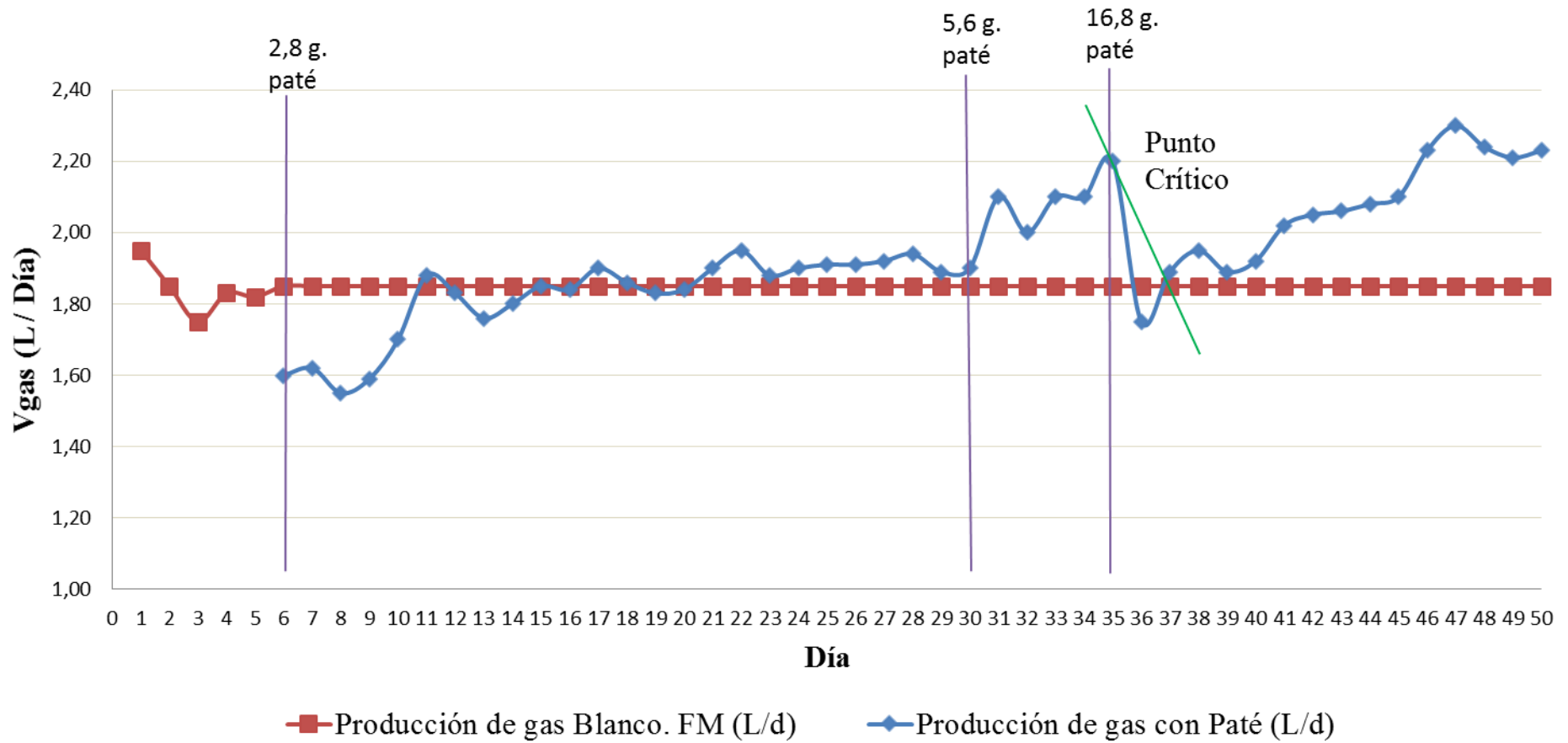
Figura 57: Tabla de datos del volumen de gas obtenido con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Volumen medio semanal de gas producido con y sin residuo del deshuesado de la aceituna de mesa (Paté).					
Semanas	Alimentación		Producción media (L) sin paté	Producción media (L) con paté	% de incremento de Biogás
	Fango mixto (L)	Paté de aceituna (g)			
1	0,400		1,850		
2	0,400	2,8		1,620	-13%
3				1,830	-1%
4				1,860	0,5%
5				1,900	2,7%
6	0,400	5,6		1,920	3,8%
7				2,100	13,5%
8	0,400	16,8		1,890	2,4%
9				2,060	11%
10				2,230	9,7%

A continuación se representan los datos de la tabla anterior en tres gráficas distintas, la gráfica 58, donde vemos los litros de gas producidos diariamente por el digestor, la gráfica 59 que sirve como ampliación del punto crítico alcanzado en el ensayo, y la 60 representando los mismos datos pero en este caso a escala semanal. En ambas gráficas se representa con color azul el volumen de gas producido tras la adición del residuo y con color rojo la media de producción de gas sin residuo.

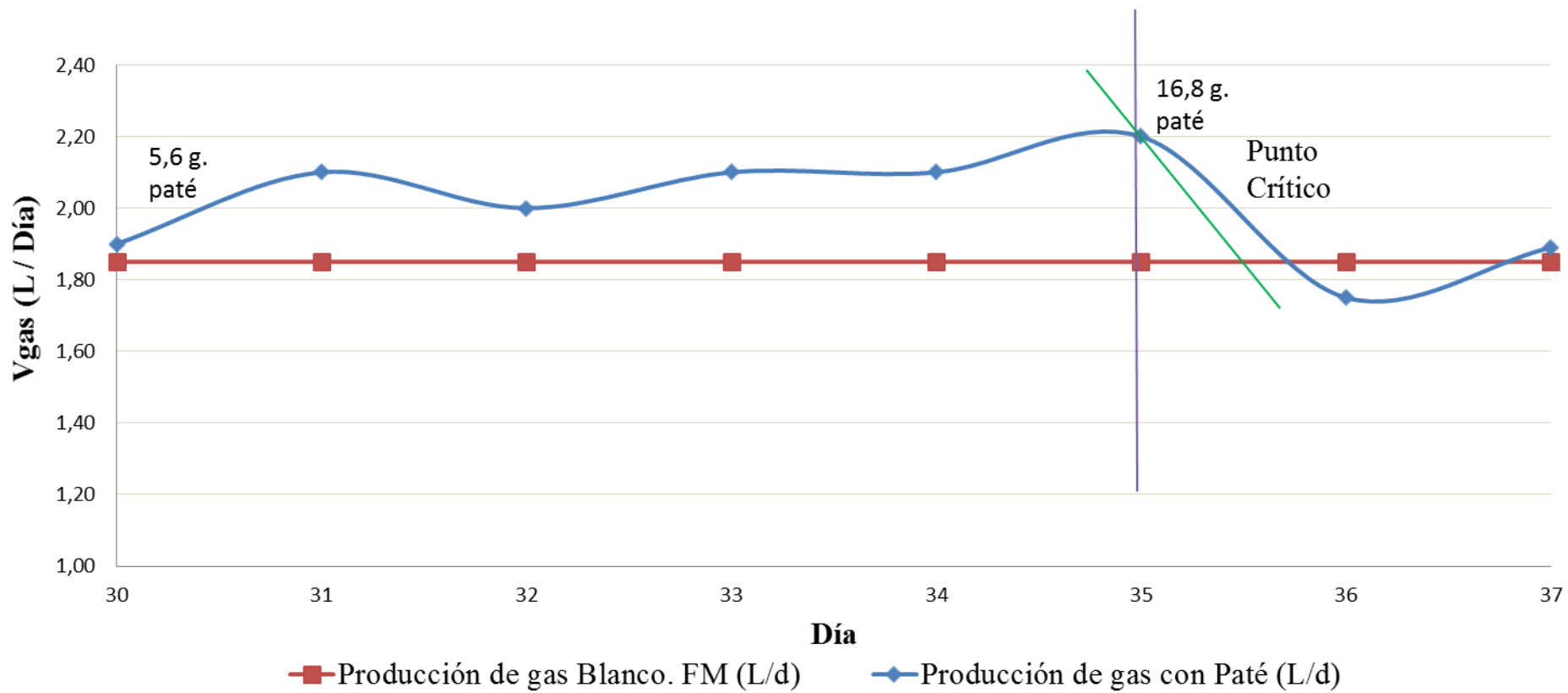
Una vez estabilizado el digestor tras el arranque, a partir del día 5 concretamente, se comienza a alimentar el digestor con el sustrato y la producción de gas comienza a ser ligeramente superior a medida que se va aumentando la carga de residuo en la alimentación. El día 35 la producción de biogás decae, tras aumentar la dosis de residuo añadida. Esta caída en la producción de gas está asociada a la no adaptación del digestor a una gran carga de residuo en la alimentación, adaptándose posteriormente de forma paulatina hasta estabilizarse en un incremento en la producción de 0,040 L. Esta situación se ve más claramente en la gráfica 60, donde las columnas representan el volumen de gas producido por semanas, consiguiendo una regularidad en el proceso de digestión anaerobia y un incremento pequeño pero positivo en la producción de biogás, con respecto a la media producida en solitario por el fango mixto, representada por la línea roja.

VOLUMEN DE GAS DIARIO CON Y SIN PATÉ DE ACEITUNA.



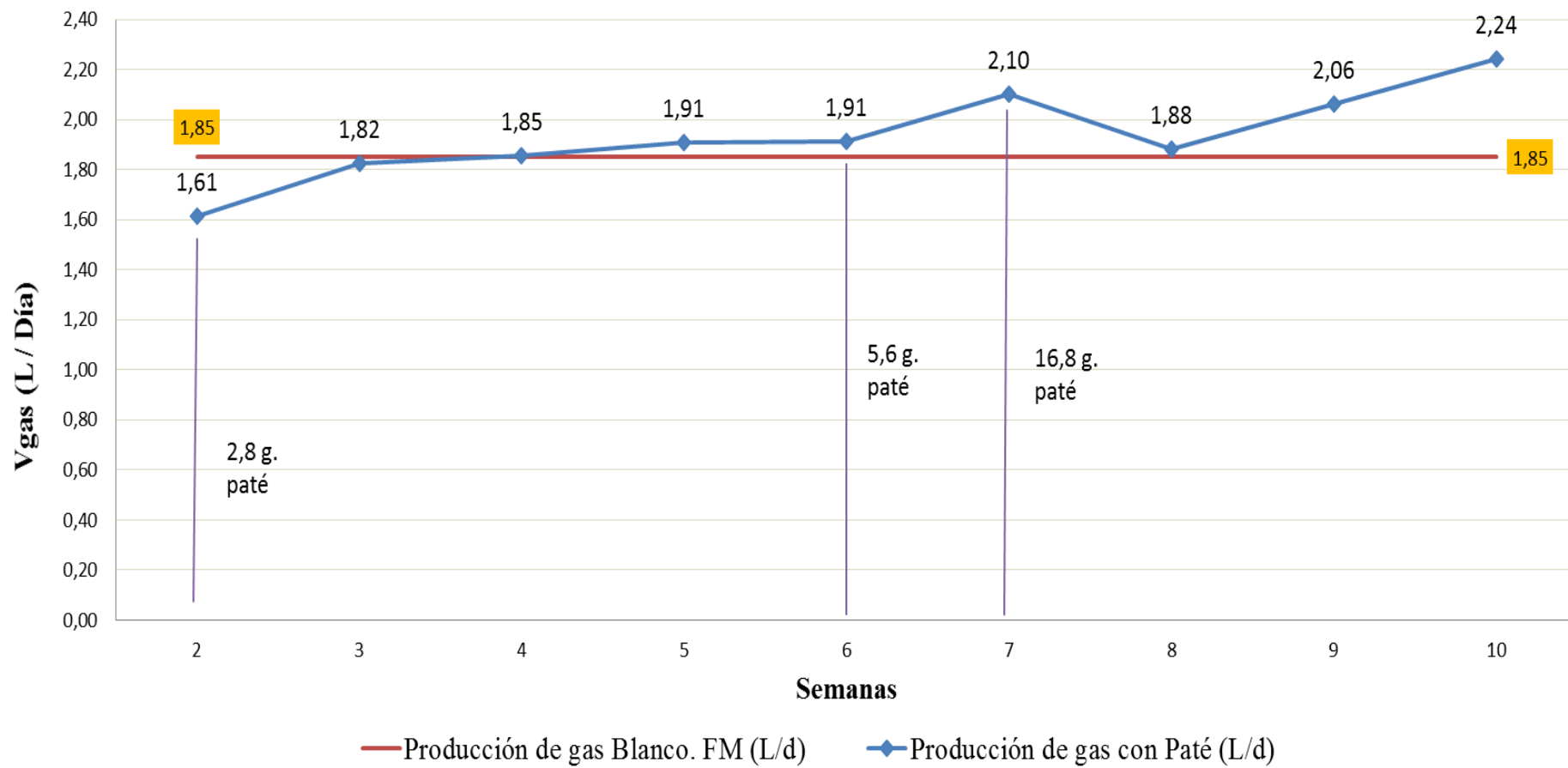
Figuras 58: Gráfica diaria de la producción de gas obtenida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

VOLUMEN DE GAS DIARIO CON Y SIN PATÉ DE ACEITUNA (AMPLIACIÓN PUNTO CRÍTICO).



Figuras 59: Gráfica ampliación del punto crítico en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

VOLUMEN DE GAS MEDIO SEMANAL CON Y SIN PATÉ DE ACEITUNA



Figuras 60: Gráfica semanal de la producción de gas obtenida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Se analiza ahora la viabilidad del proceso de co-digestión con el residuo del deshuesado de la aceituna de mesa, para ello se observa la estabilidad de los distintos parámetros estudiados en este proyecto.

Con respecto a la DQO, se comparan los datos de entrada, salida y eliminación de materia orgánica. Estos datos son los representados en las figuras 61, 62, 63 y 64. En la tabla 61, se exponen los datos de DQO de la alimentación del digestor y de la muestra sacada para el análisis en mg litro, y el rendimiento de eliminación en porcentaje. El porcentaje de rendimiento de eliminación de materia orgánica se ha calculado por diferencia entre la DQO de entrada y la de salida dividido por la DQO de entrada, todo ello multiplicado por cien.

Figura 61: Tabla con los datos de DQO obtenidos en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Semanas	Media DQO Entrada (mg/l)	Media DQO Salida (mg/l)	% eliminación DQO
2	36.605 ± 0,7	14.779 ± 0,8	60 %
3	36.703 ± 0,7	10.430 ± 0,8	72 %
4	34.393 ± 0,7	11.721 ± 0,8	66 %
5	37.243 ± 0,7	11.938 ± 0,8	68 %
6	31.205 ± 0,7	11.466 ± 0,8	63 %
7	31.352 ± 0,7	16.223 ± 0,8	48 %
8	40.601 ± 0,7	20.133 ± 0,8	50 %
9	41.306 ± 0,7	19.435 ± 0,8	53 %
10	37.964 ± 0,7	17.313 ± 0,8	54 %

En las gráficas 62 y 63 se representan los datos de la tabla 66 a escala diaria y semanal. En color rojo puede verse la DQO de la alimentación, con una media de DQO de entrada de 36000 mg/L. En color azul se representa la DQO de la muestra de digestor analizada, con una media de DQO de salida de 15000 mg/L. En color verde se presenta el porcentaje de eliminación de DQO en el proceso anaerobio. Los datos obtenidos son bastante buenos, obteniendo un promedio de eficiencia de eliminación de 60%, alcanzando incluso valores cercanos al 70% en algunas ocasiones. A mayor porcentaje de eliminación mayor biodegradabilidad del sustrato y por tanto mayor eficiencia del proceso. La eficiencia del proceso marca la producción de gas, de lo que se concluye que el residuo utilizado es muy biodegradable, y por ello la producción de gas en el proceso anaerobio mejora.

En la figura 64 se compara el porcentaje de eliminación de DQO con respecto al parámetro central indicador, el volumen gas producido. Puede apreciarse que hay una disminución en el % de eliminación de DQO en la semana 6, punto en el que se aumenta la carga de alimentación, que inicia un proceso de saturación en el digestor. La saturación de carga en el digestor, provoca la disminución del porcentaje de eliminación de DQO y por tanto una disminución en el volumen gas producido en las semana posterior. De estos datos se deduce que la disminución en el porcentaje de eliminación de DQO, anticipa la disminución en la cantidad de biogás producido.

Posteriormente tras adaptarse a la nueva carga de alimentación la eliminación de DQO sube junto con el biogás generado.

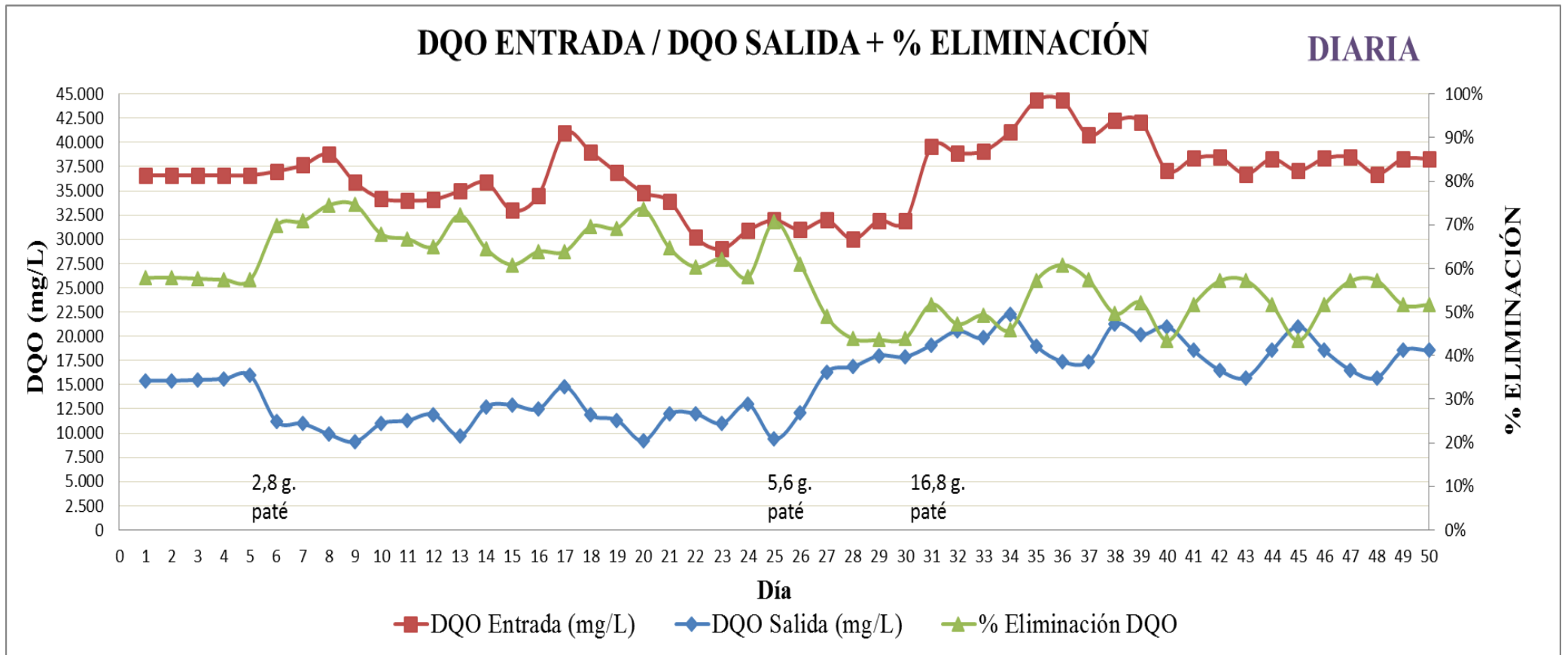


Figura 62: Gráfica de datos diarios de la DQO obtenida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

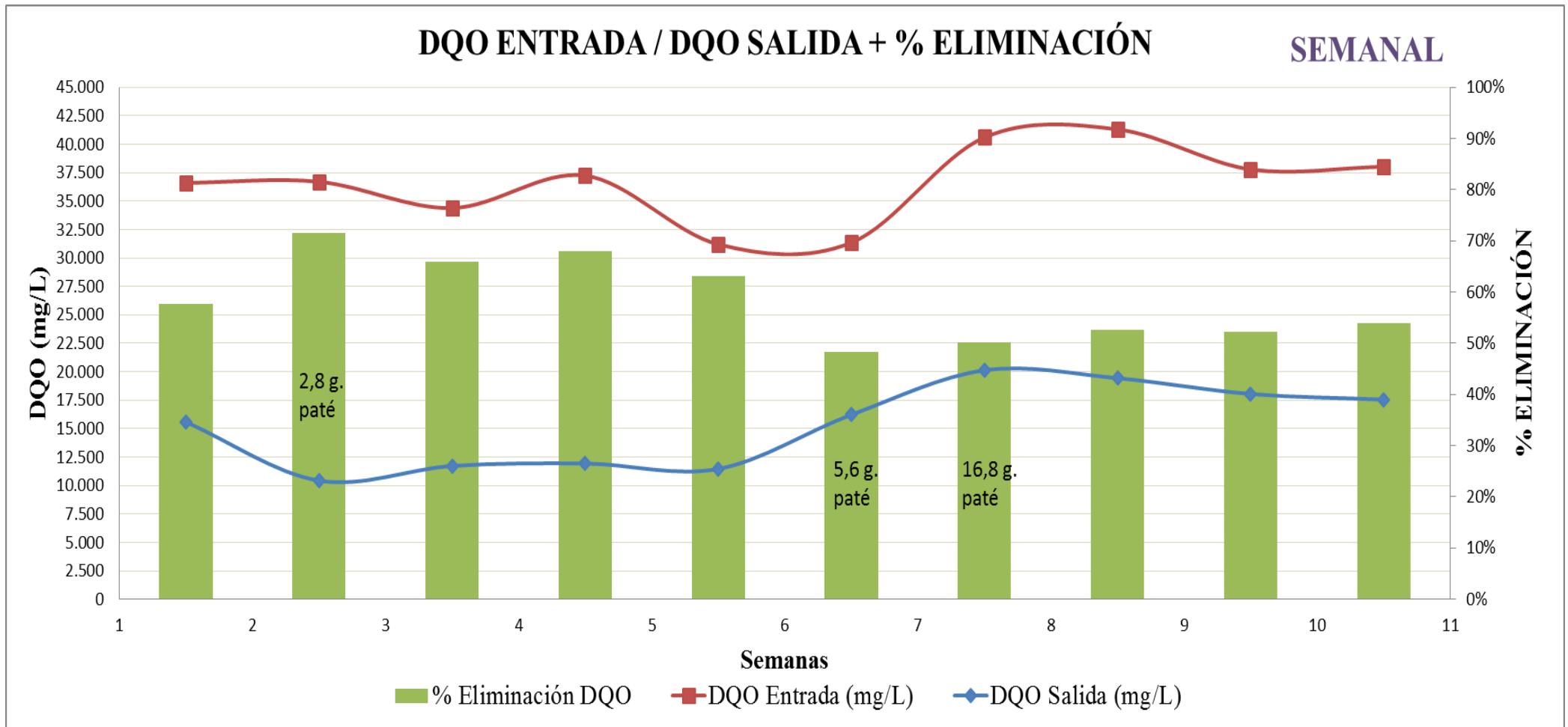


Figura 63: Gráfica de datos semanales de la DQO obtenida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

% ELIMINACIÓN / VOLUMEN GAS CON PATÉ

SEMANAL

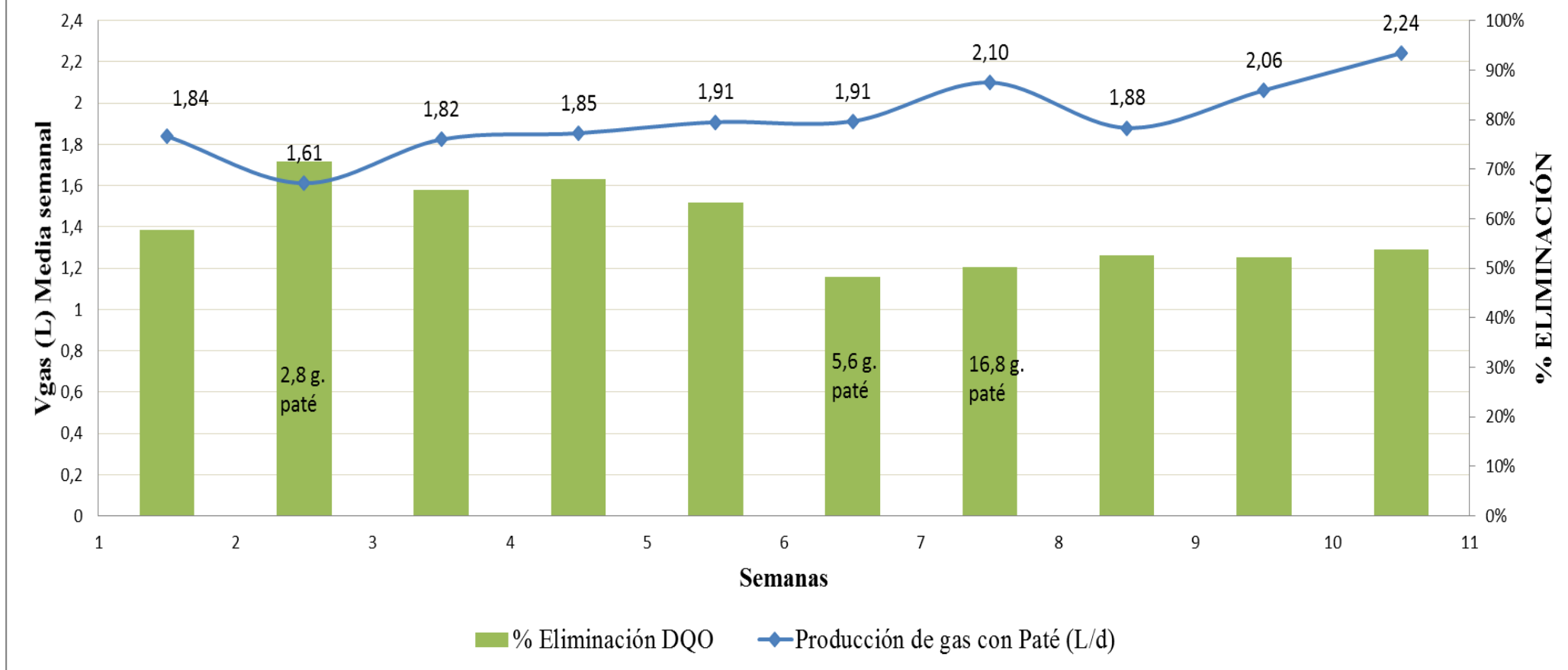


Figura 64: Gráfica de datos semanales de la DQO y volumen gas obtenida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Un parámetro esencial en el proceso de digestión anaerobia es la cantidad de microorganismos que existen en el digestor, representados por el porcentaje de materia volátil medido.

En la figura 65 se exponen los datos de materia volátil (MV) medidos en este ensayo. Se presentan los datos de materia volátil en la alimentación y en la salida del digestor. La diferencia entre ambas multiplicada por cien, indica el porcentaje de materia volátil eliminada.

El porcentaje de materia volátil es calculado por la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos volátiles medidos en las muestras de ensayo, todo ello multiplicado por cien.

En las figuras 66 y 67 pueden verse los datos de la tabla 65 gráficamente, tanto a escala diaria como semanal. En ambas gráficas se presenta en rojo la materia volátil referente a la alimentación, con una media de 73 %. En color azul se presenta la materia volátil correspondiente a la muestra de digestor analizada, con una media de 62 %. En color verde se presenta el porcentaje de eliminación de materia volátil. La eliminación de materia volátil con el residuo del deshuesado de la aceituna de mesa como residuo es baja, con una media de eliminación del 17 %. Estos datos son muy positivos ya que mantiene dentro del digestor una población activa media del 80 %.

Se puede observar en la gráfica 67 la comparativa entre la eliminación de materia volátil y el volumen de gas producido (línea color azul). Se observa en la semana 5 aumenta la eliminación de materia en el digestor, lo que indica que la población activa disminuye en su interior y por tanto predice que la cantidad de gas producida será menor en las semanas posteriores, tal y como sucede.

Figura 65: Tabla de datos de materia volátil obtenida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

% MV y % de eliminación			
Semanas	MV Entrada	MV Salida	% eliminación MV
1	72 % ± 1	60 % ± 1	16%
2	71 % ± 1	61 % ± 1	14 %
3	62 % ± 1	59 % ± 1	13 %
4	72 % ± 1	59 % ± 1	18 %
5	79 % ± 1	62 % ± 1	22 %
6	75 % ± 1	66 % ± 1	17 %
7	75 % ± 1	63 % ± 1	15 %
8	74 % ± 1	61 % ± 1	18 %
9	74 % ± 1	61 % ± 1	19 %
10	74 % ± 1	62 % ± 1	16 %

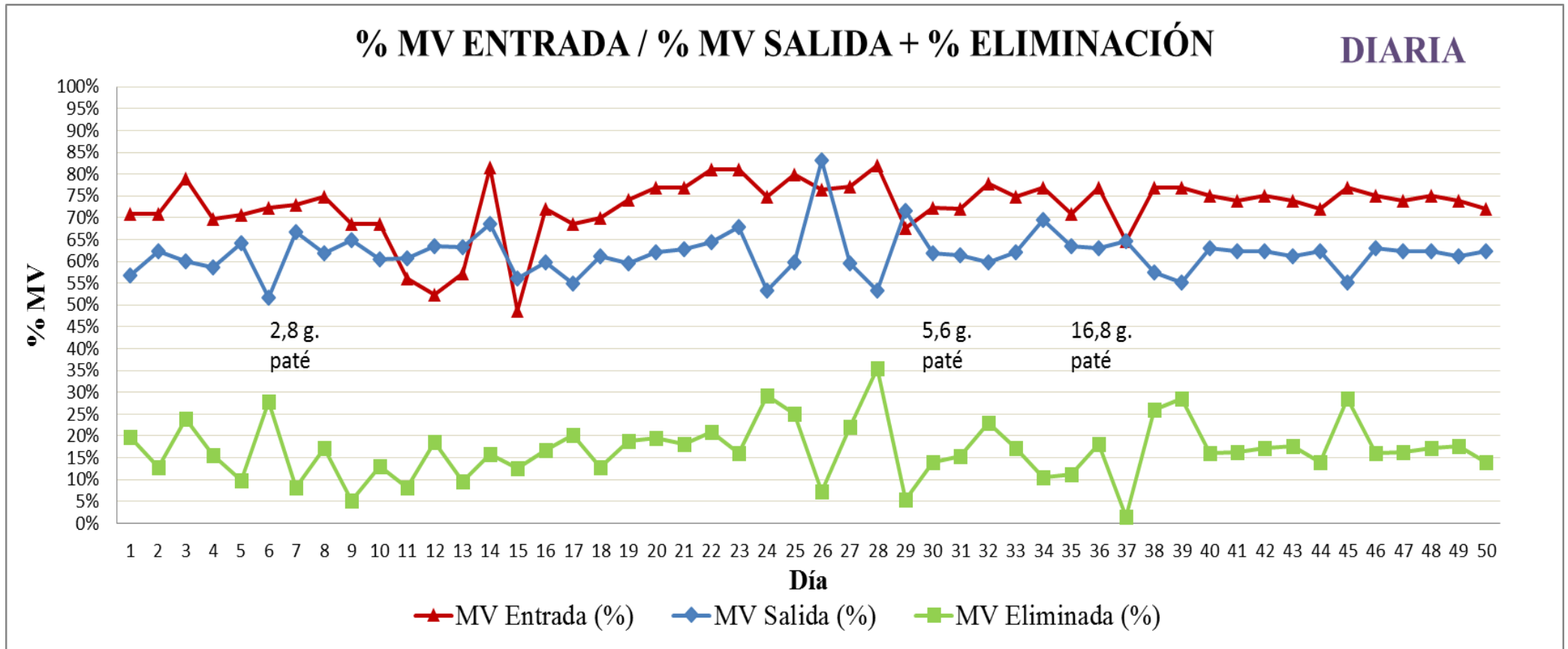


Figura 66: Gráfica de los datos diarios de materia volátil obtenida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

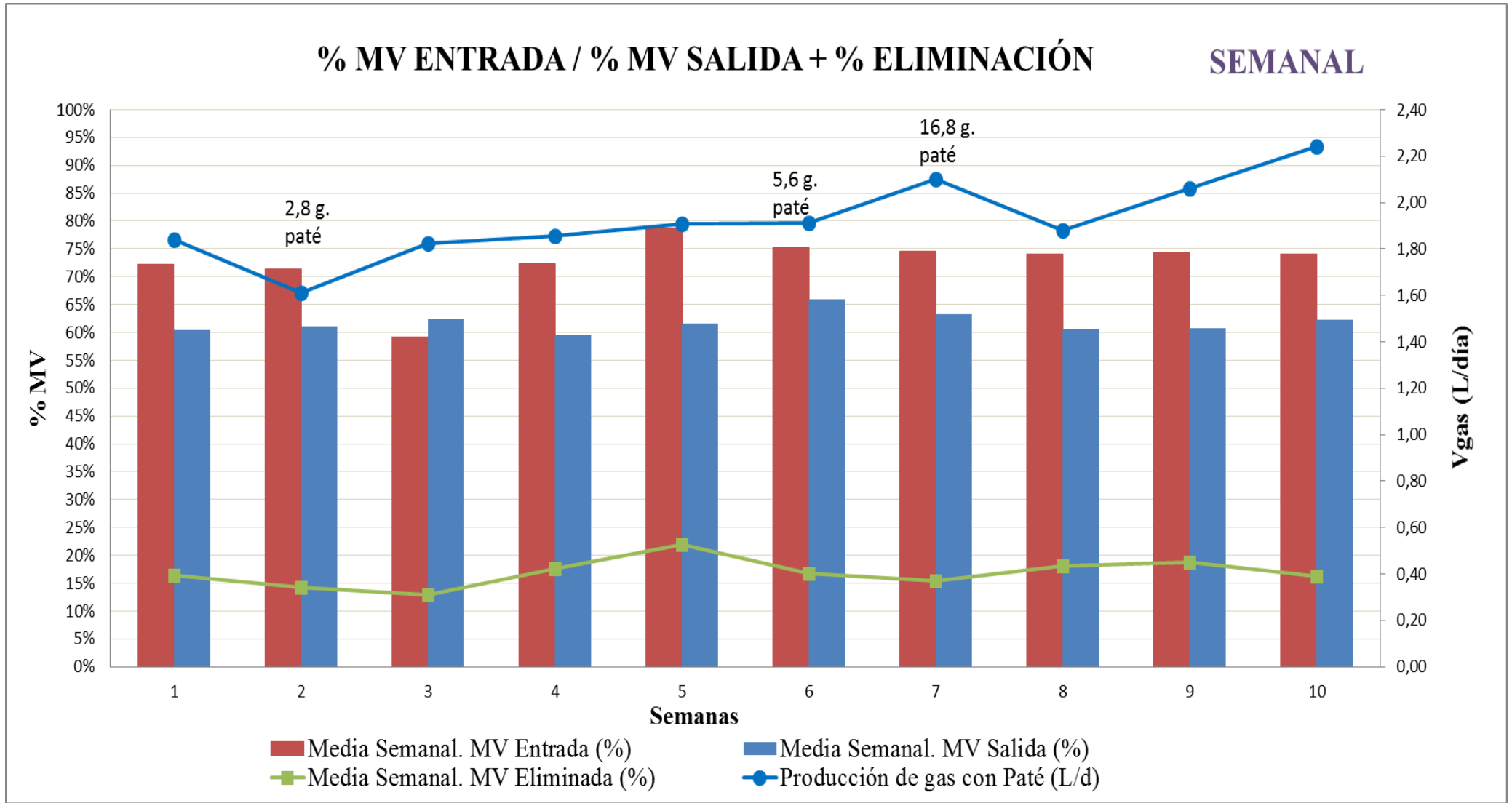


Figura 67: Datos semanales de la materia volátil obtenida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Se describen ahora dos de los parámetros fundamentales para la estabilidad del proceso, la producción de ácidos grasos volátiles y la alcalinidad.

La figura 68 recoge las medias semanales de los datos diarios recogidos en el proceso, donde puede verse que el digestor en estudio cuenta con una capacidad tampón aceptable, muy cercana al límite inferior del rango marcado e incluso bajando de él en algunas ocasiones. En esta tabla se observa que la cantidad de AGV y alcalinidad medida en mg/l de CaCO_3 va aumentando a medida que pasan las semanas y aumenta la cantidad de paté alimentado. Una vez se alimenta el digestor con la cantidad máxima a experimentar (16,8 g. de paté) durante un periodo continuo, los datos de alcalinidad y acidez se estabilizan en un rango cercano 6000 mg/l y 600 mg/L respectivamente.

En las figuras 69 y 70 se representan gráficamente los datos de la tabla anterior, tanto a escala diaria como a escala semanal. En ambas gráficas se presentan en morado los datos de alcalinidad y en naranja los de AGV. En la gráfica 69 se destaca la disminución en la semana 5 de la producción de AGV coincidiendo con el resto de datos que predicen una disminución en la producción de biogás, tal y como se ve en la gráfica 70. Al disminuir los AGV, disminuye la acidez y por tanto aumenta la alcalinidad en el digestor, tal y como se observa en la gráfica. En las semanas finales, el proceso se estabiliza volviendo a valores altos de AGV.

Figura 68: Tabla de datos de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Semanas	Media Semanal. ALCALINIDAD (mg/L) (CaCO₃)	Media Semana. ACIDEZ (mg/L) (CaCO₃)
1	4.439 ± 1,1	336 ± 0,9
2	4.037 ± 1,1	339 ± 0,9
3	4.319 ± 1,1	481 ± 0,9
4	4.690 ± 1,1	405 ± 0,9
5	6.009 ± 1,1	479 ± 0,9
6	6.568 ± 1,1	485 ± 0,9
7	6.422 ± 1,1	618 ± 0,9
8	6.081 ± 1,1	638 ± 0,9
9	6.005 ± 1,1	612 ± 0,9
10	5.977 ± 1,1	616 ± 0,9

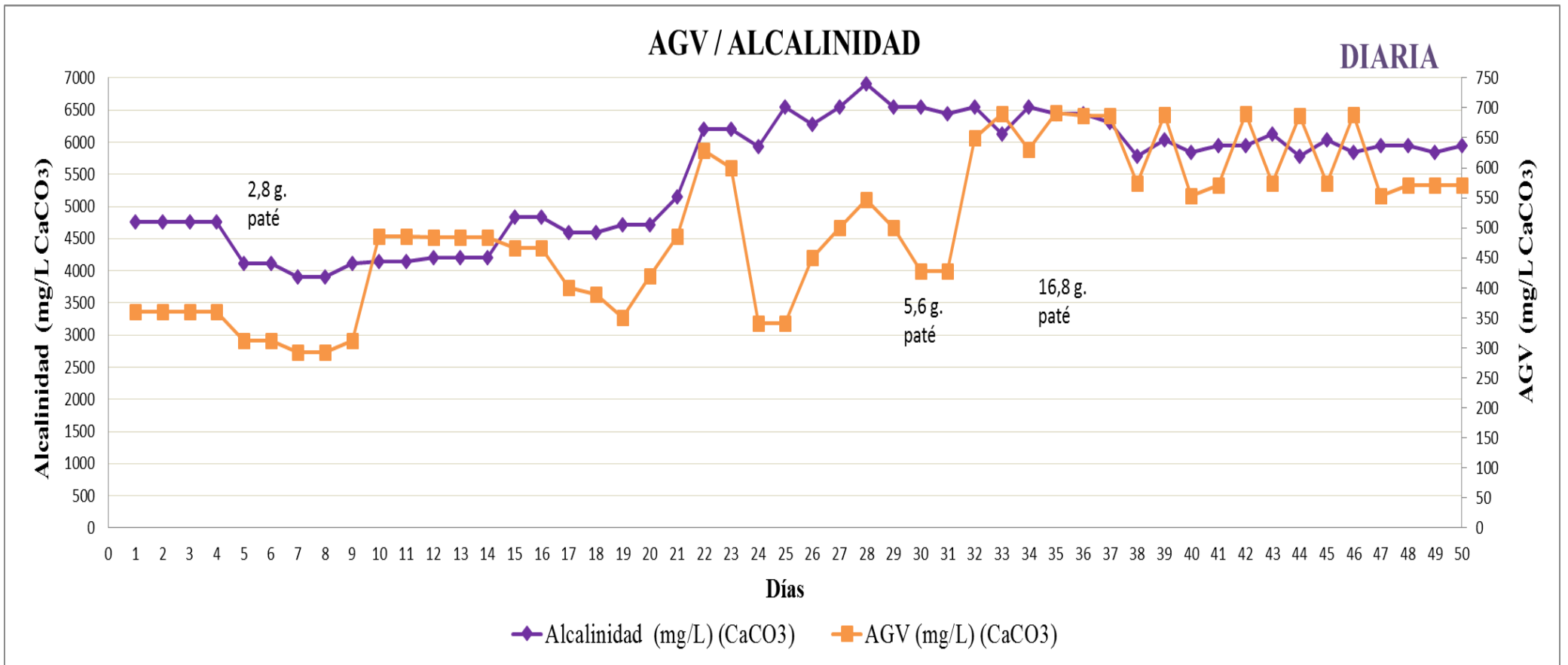


Figura 69: Gráfica de los datos diarios de la alcalinidad y la acidez medida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

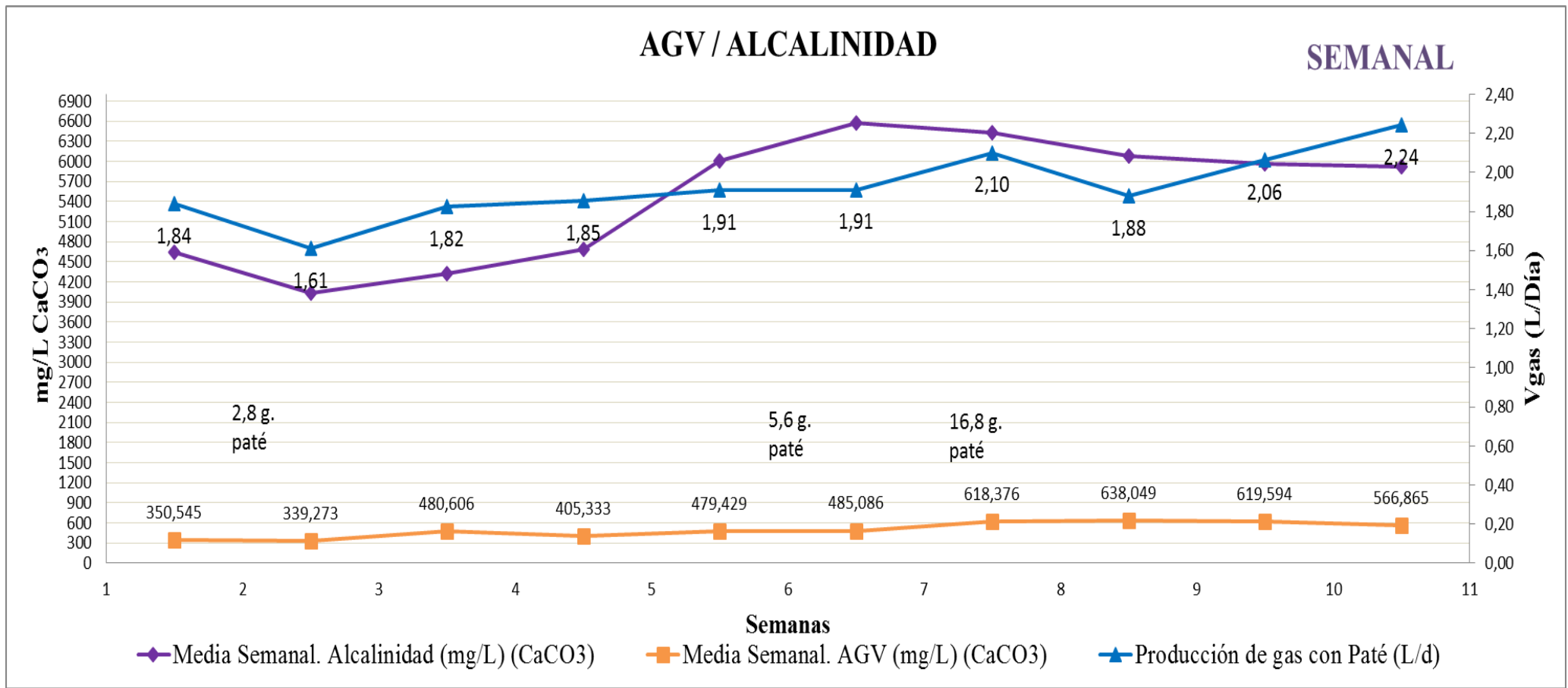


Figura 70: Gráfica de los datos semanales de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

El ratio AGV/ Alcalinidad debe de estar dentro del rango establecido por su relación (0,1-0,4) para asegurar la estabilidad del proceso, cualquier variación en este rango supone un desequilibrio en el sistema. Otro parámetro muy importante para controlar la estabilidad del digestor es el pH. En la figura 71, se presenta la media de los datos de pH semanales junto con los valores de ratio AGV/ Alcalinidad.

Tanto los datos de pH como el ratio AGV/ Alcalinidad se han mantenido muy estables dentro de sus rangos óptimos de funcionamiento, tal y como se observa en la figura XX. En las figuras 72, 73 y 74 pueden verse los trazados de pH y AGV/Alcalinidad junto con el volumen gas producido, no observándose inestabilidad en el Ratio AGV/Alcalinidad y si un pequeño descenso en el pH coincidente con la disminución en la producción de biogás.

Figura 71: Tabla de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Semana	Media Semana. PH (Digestor)	Ratio AGV/ Alcalinidad
1	7,4 ± 0,01	0,08
2	7,7 ± 0,01	0,08
3	7,7 ± 0,01	0,11
4	7,7 ± 0,01	0,08
5	7,8 ± 0,01	0,08
6	7,9 ± 0,01	0,08
7	8 ± 0,01	0,1
8	7,5 ± 0,01	0,1
9	7,8 ± 0,01	0,1
10	7,7 ± 0,01	0,1

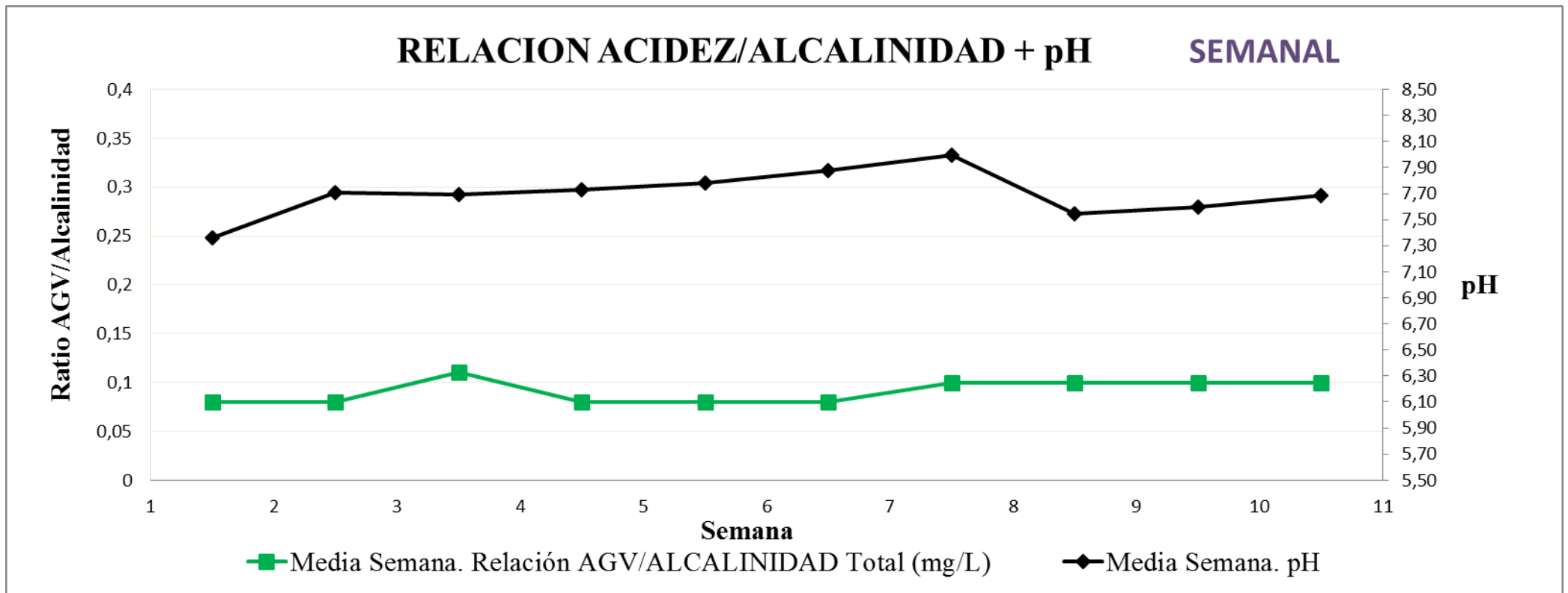


Figura 72: Gráfica de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

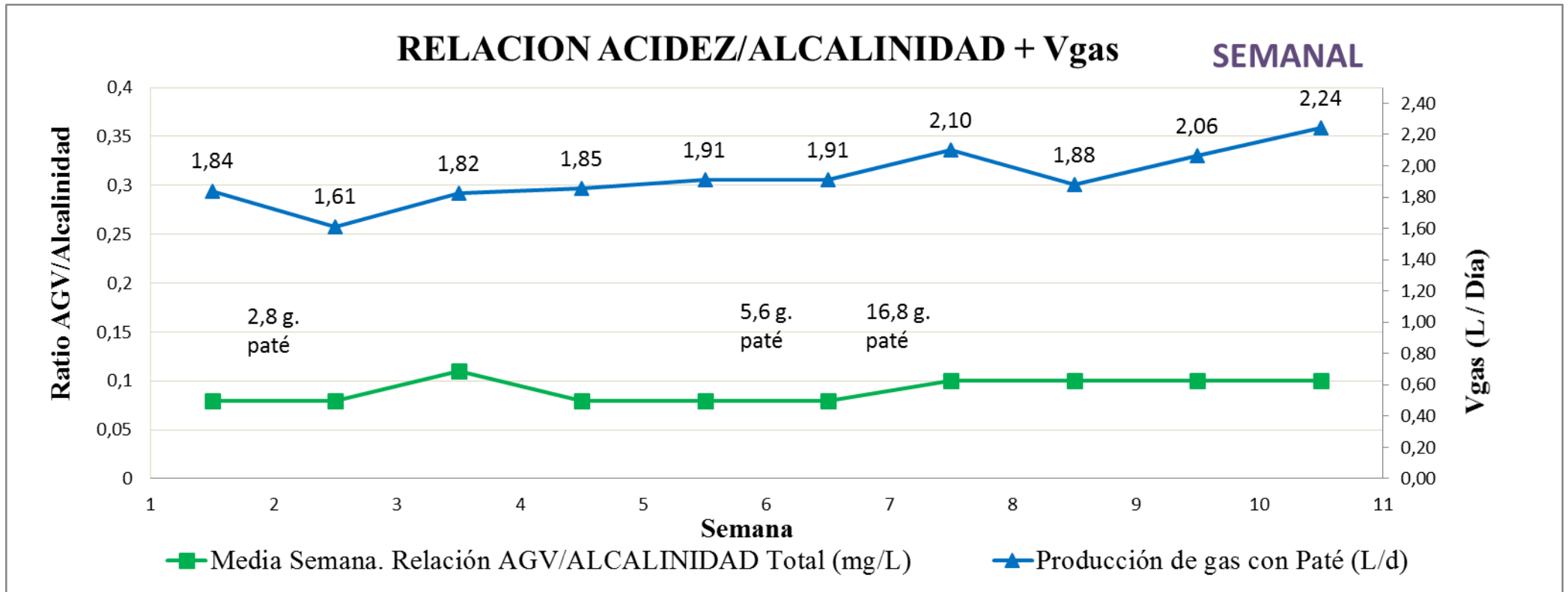


Figura 73: Gráfica de datos semanales de ratio AGV/ Alcalinidad y volumen gas medidos en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

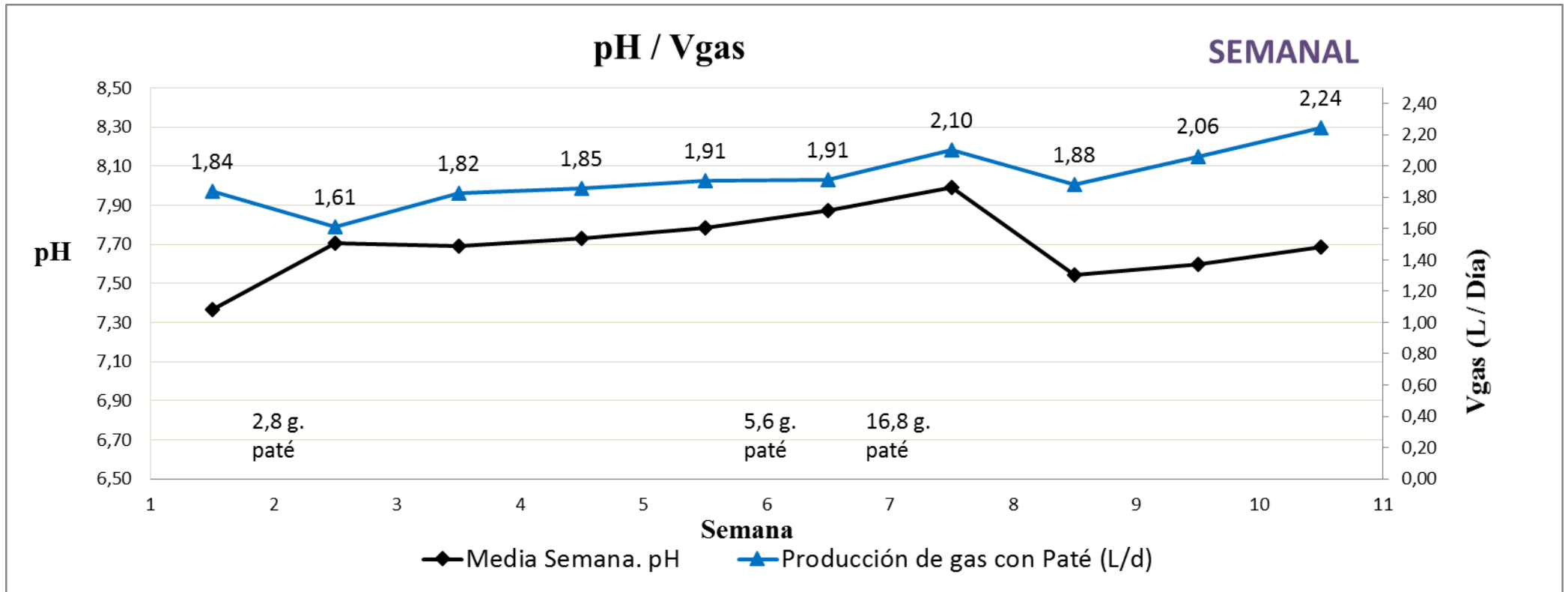


Figura 74: Gráfica de datos semanales de ratio pH y volumen gas medidos en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

- ***Conclusiones.***

En este apartado se presentan las conclusiones obtenidas en base a los resultados y a las consideraciones anteriormente explicadas.

- El proceso es viable con adiciones de 5 g de paté en 0,400 ml de fango mixto. Esto permite aumentar la dosis de alimentación en un futuro ensayo de co-digestión, para ver su viabilidad ante una mayor alimentación, el mantenimiento y la estabilidad del sistema.

- La producción total de gas aumenta conforme se adiciona mayor cantidad de paté, aunque la ganancia en volumen de gas es pequeña. En todo caso el Vgas extra conseguido aumenta con mayores adiciones de paté sin afectar a la estabilidad del reactor.

- En relación a los diferentes parámetros indicadores del funcionamiento del sistema, se concluye que la adicción de un co-sustrato en la digestión anaerobia es viable, manteniendo todos los parámetros dentro del rango de estabilidad del sistema y produciendo un volumen de gas extra.

3.3 Ensayo con Lixiviado.

El segundo de los ensayos se realiza con el lixiviado generado en los residuos de vertedero cuando el agua percola entre ellos. Se introduce en el digestor de forma directa dadas sus características como fluido, que no hacen necesario un tratamiento anterior.

En el inicio como en el caso anterior, se alimenta el digestor con solo fango mixto de depuradora para estabilizar el proceso anaerobio. Tras este periodo de estabilización se comienza a introducir el lixiviado, estudiando su efecto en el desarrollo del proceso ensayado. El objetivo de esta investigación es la incorporación de lixiviados de vertedero como residuo a un tratamiento de co-digestión anaerobia, sin la desestabilización del proceso, aunque la producción de biogás no se incremente de forma significativa.

- Discusión de resultados.

Los primeros datos de la figura 75 representan el potencial de producción de gas que tiene el digestor en el proceso de co-digestión. En diversas columnas se exponen una media de los litros diarios que el digestor produce a la semana sin y con el residuo. En la última columna se representa el incremento o pérdida de biogás producido por el efecto del residuo añadido en el proceso anaerobio.

Los datos expuestos se expresan como la media de litros producidos por el digestor a la semana, para así realizar más fácilmente la comparación entre datos.

En un inicio, tras el período de arranque y estabilización, la producción de gas generada con la adición de 0,023 L de residuo iguala y supera en una proporción casi despreciable a la producida por el digestor con tan solo el fango mixto. Este dato cambia a lo largo de las semanas, disminuyendo su producción de biogás de una manera rápida.

En la semana cinco la producción de gas llega a una pérdida con respecto al producido con el fango mixto del -75 %, cifra más que significativa para concluir la

experiencia y argumentar la no viabilidad del residuo en el proceso anaerobio de co-digestión. De estos resultados puede concluirse que el lixiviado es tóxico para la población bacteriana del digestor y su gestión como residuo en un proceso de co-digestión anaerobia no es posible en este rango de adición. En investigaciones futuras sobre este residuo se propone reducir la dosis de alimentación y estudiar su comportamiento en el proceso ensayado, para encontrar una cantidad óptima de funcionamiento que no desestabilice el proceso anaerobio. El objetivo de su incorporación a la co-digestión anaerobia es encontrar una alternativa que facilite su gestión, dada su peligrosidad como contaminante.

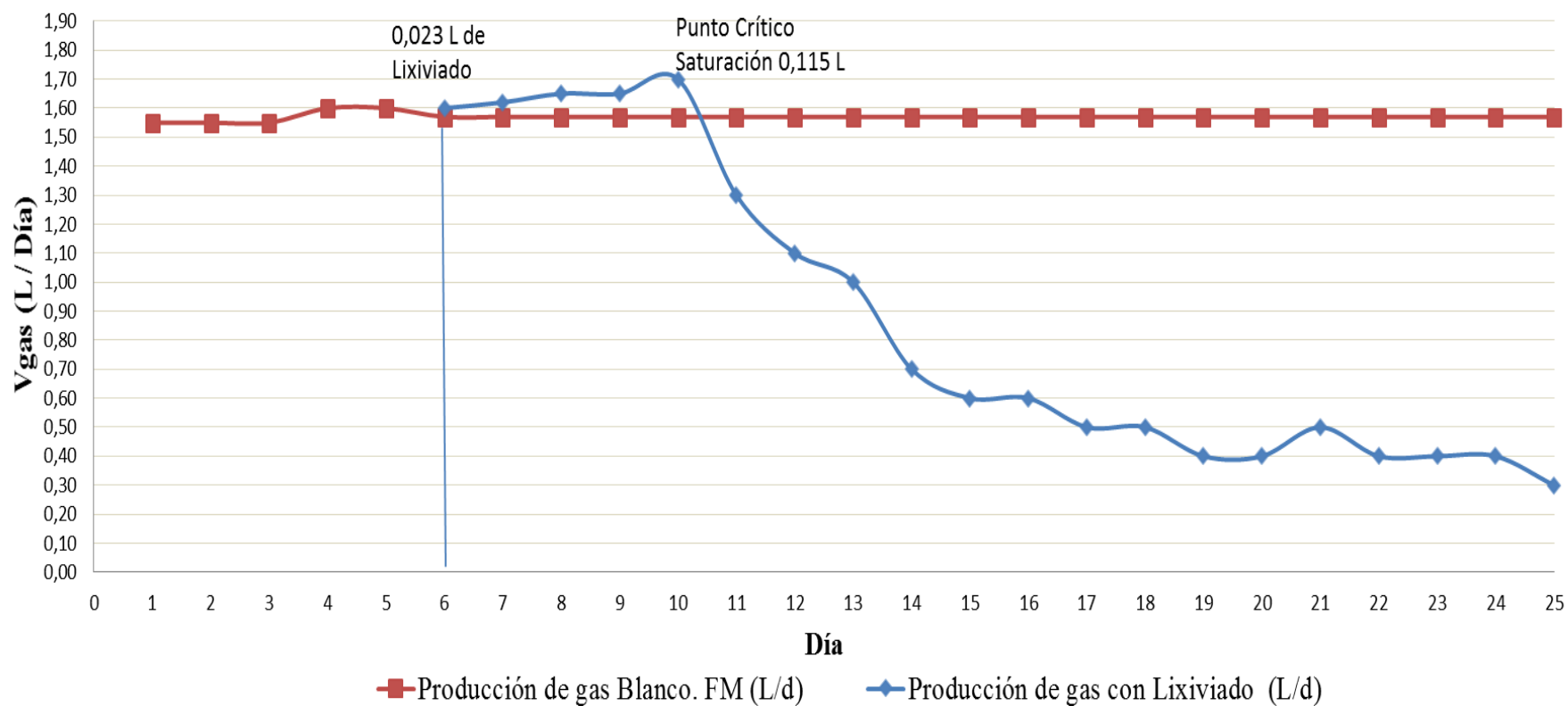
Figura 75: Tabla de datos del volumen de gas obtenido en el proceso con lixiviado.

Volumen medio semanal de gas producido con y sin lixiviado.					
Semanas	Alimentación (L)		Producción media (L) sin lixiviado	Producción media (L) con lixiviado	% de incremento de Biogás
	Fango mixto	Lixiviado			
1	0,400		1,600		
2	0,400	0,023		1,650	3 %
3				1,000	-38 %
4				0,500	-69 %
5				0,400	-75 %

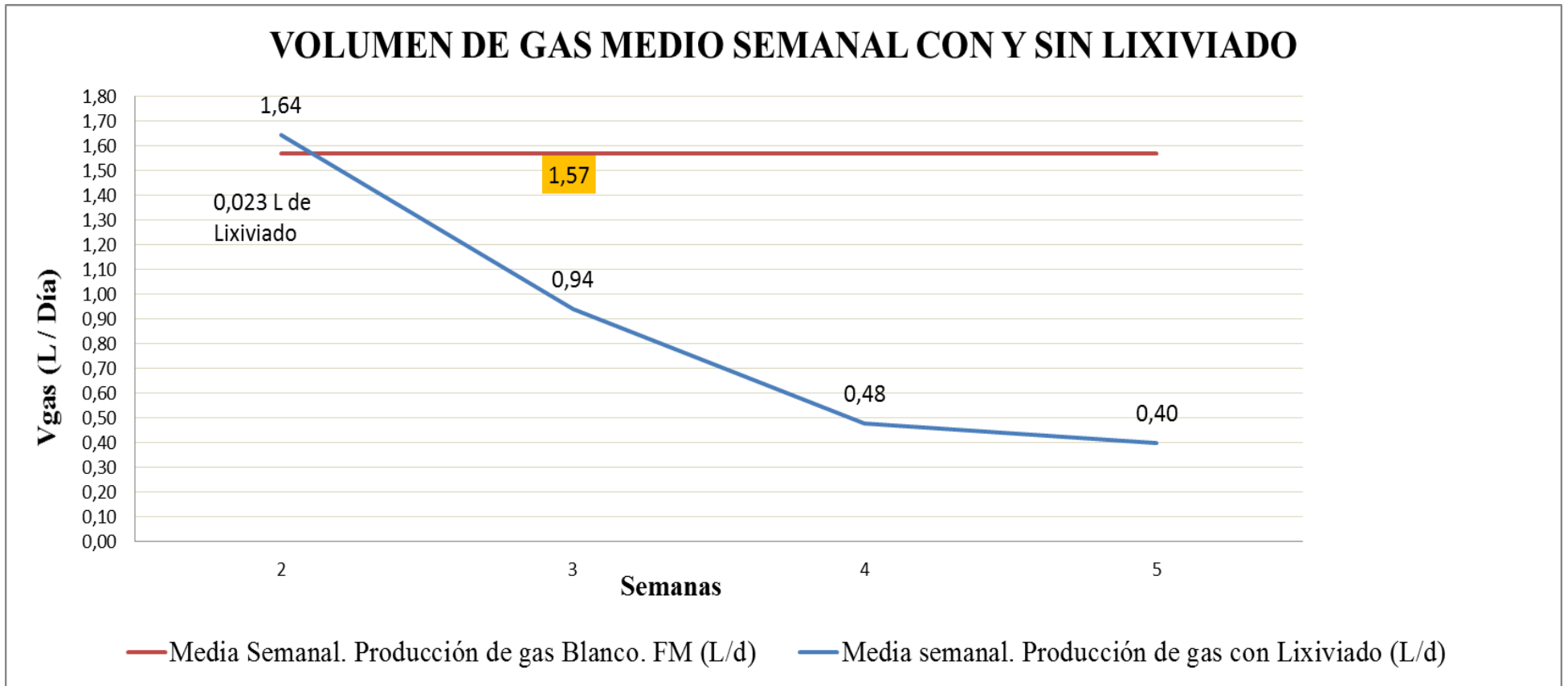
A continuación se representan los datos de la tabla anterior en dos gráficas distintas, la gráfica 76, donde vemos los litros de gas producidos diariamente por el digestor y la gráfica 77, representando los mismos datos pero en este caso a escala semanal. En ambas gráficas se representa con color azul el volumen de gas producido tras la adición del residuo y con color rojo la media de producción de gas sin residuo.

Una vez estabilizado el digestor tras el arranque, a partir del día 5 concretamente, se comienza a alimentar el digestor con el sustrato, y la producción de gas comienza a ser ligeramente superior a la medida con el fango mixto. En la segunda semana de ensayo la producción de gas cae rápidamente, disminuyendo progresivamente hasta llegar a valores de 0,4 L en la última semana de ensayo. Dados estos resultados se para la investigación con la conclusión de la no viabilidad del lixiviado como sustrato de estudio en un proceso de co-digestión anaerobia, en esta dosis de alimentación. Esta situación se ve más claramente en la gráfica 77 que representa el volumen de gas producido por semanas, donde las columnas indican que la producción semanal de biogás queda muy por debajo de la media de 1,57 L conseguida con la alimentación de fango mixto en solitario, representada por la línea de color rojo.

VOLUMEN DE GAS DIARIO CON Y SIN LIXIVIADO



Figuras 76: Gráfica diaria de la producción de gas obtenida en el proceso con lixiviado.



Figuras 77: Gráfica semanal de la producción de gas obtenida en el proceso con lixiviado.

Se analiza ahora el desarrollo del proceso de co-digestión con el lixiviado, para ello se observa la estabilidad de los distintos parámetros analizados. Estos resultados se utilizan como base comparativa de un proceso no satisfactorio, con respecto a otros residuos estudiados de los que si se obtienen buenos resultados.

Con respecto a la DQO, se comparan los datos de entrada, salida y eliminación de materia orgánica. Estos datos son los representados en las figuras 78, 79, 80 y 81. En la tabla 78, se exponen los datos de DQO de la alimentación del digestor y de la muestra sacada para el análisis en mg litro, y el rendimiento de eliminación en porcentaje. El porcentaje de rendimiento de eliminación de materia orgánica se ha calculado por diferencia entre la DQO de entrada y la de salida dividido por la DQO de entrada, todo ello multiplicado por cien.

En las gráficas 79, 80 y 81 se representan los datos de la tabla 78 a escala diaria y semanal. En color rojo puede verse la DQO de la alimentación, con una media de DQO de entrada de 13.900 mg/L. En color azul se representa la DQO de la muestra de digestor analizada, con una media de DQO de salida de 6.900 mg/L. En color verde se presenta el porcentaje de eliminación de DQO en el proceso anaerobio. Los datos obtenidos son buenos, obteniendo un promedio de eficiencia de eliminación de 50 %. A mayor porcentaje de eliminación mayor biodegradabilidad del sustrato y por tanto mayor eficiencia del proceso. La eficiencia del proceso marca la producción de gas, de lo que se concluye que el residuo utilizado es biodegradable, aunque no se vea correspondido en la producción de gas. La población bacteriana si degrada el sustrato pero les resulta tóxico por lo que mueren y no generan el gas esperado. Esta conclusión puede verse en la gráfica 81 donde se comparan los datos de biogás producido y eliminación de DQO obtenida.

Figura 78: Tabla con los datos de DQO obtenidos en el proceso con lixiviado.

Semanas	Media DQO Entrada (mg/l)	Media DQO Salida (mg/l)	% eliminación DQO
1	13.742 ± 0,7	7.006 ± 0,8	49 %
2	14.981 ± 0,7	7.110 ± 0,8	53 %
3	13.494 ± 0,7	6.569 ± 0,8	51 %
4	13.724 ± 0,7	6.940 ± 0,8	49 %
5	13.698 ± 0,7	6.746 ± 0,8	51 %

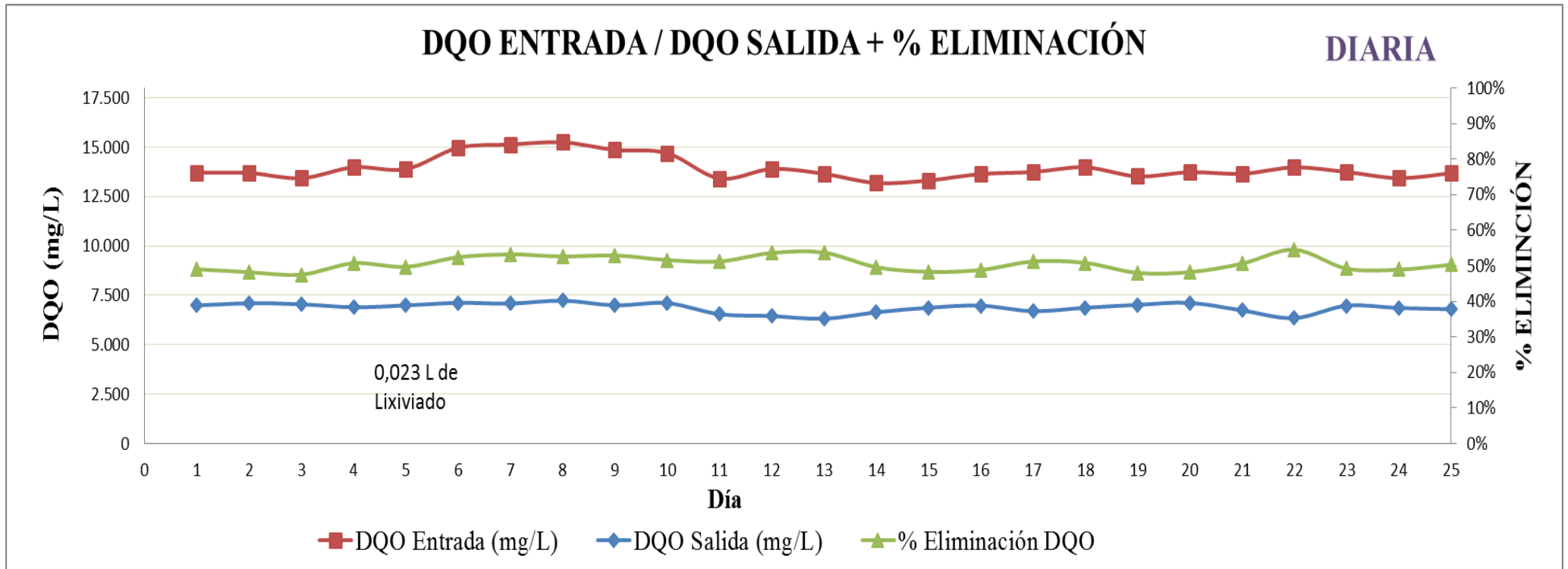


Figura 79: Gráfica de datos diarios de la DQO obtenida en el proceso con lixiviado.

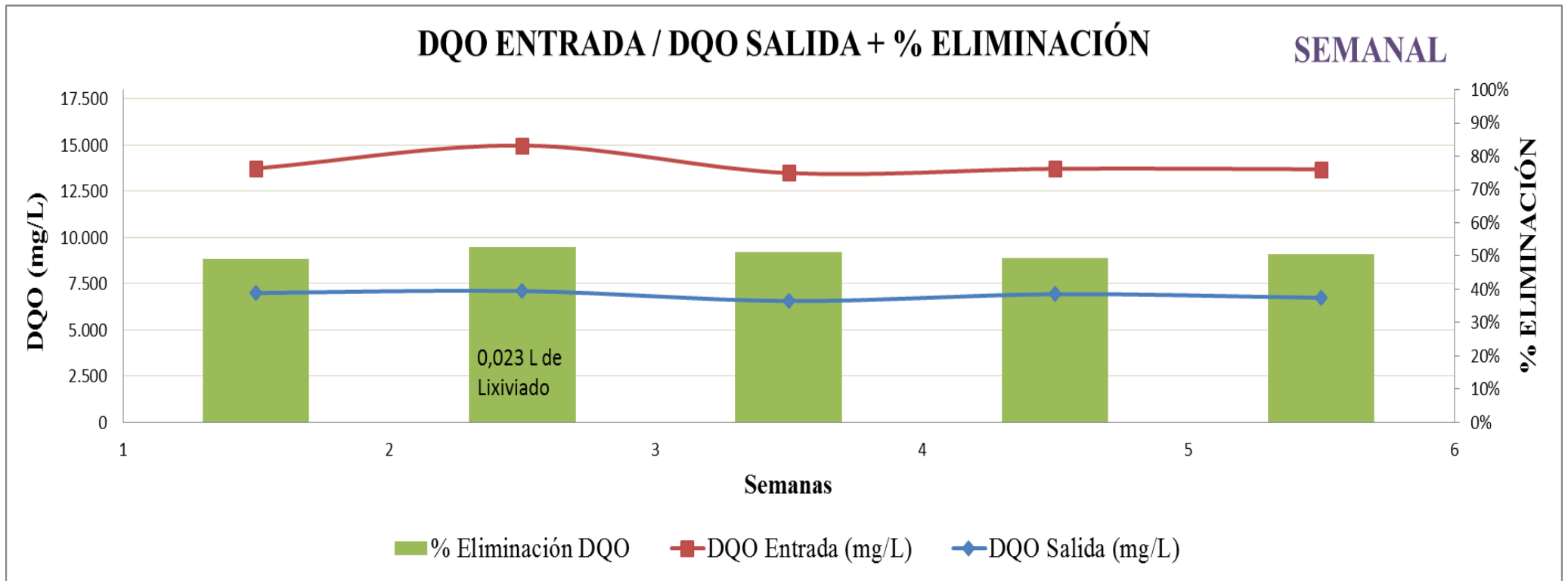


Figura 80: Gráfica de datos semanales de la DQO obtenida en el proceso con lixiviado.

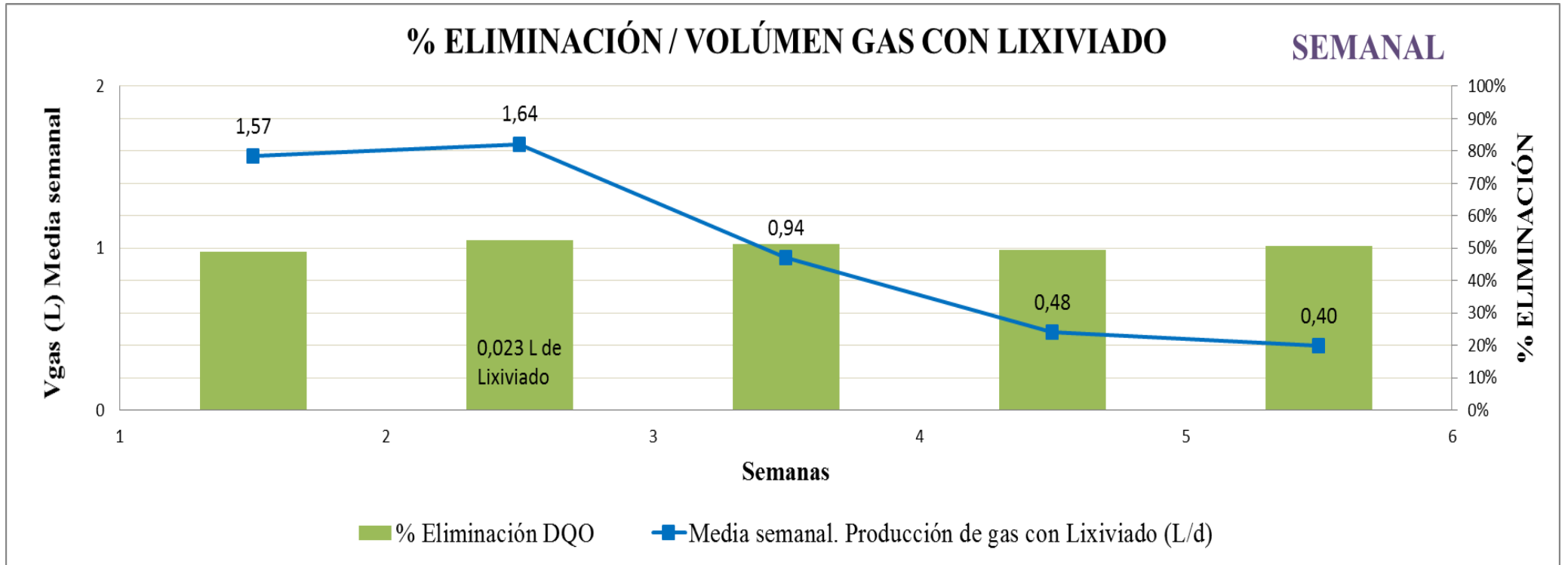


Figura 81: Gráfica de datos semanales de eliminación de la DQO y volumen gas obtenidos en el proceso con lixiviado.

Un parámetro esencial en el proceso de digestión anaerobia es la cantidad de microorganismos que existen en el digestor, representados por el porcentaje de materia volátil medido.

En la figura 82 se exponen los datos de materia volátil (MV) medidos en este ensayo. Se presentan los datos de materia volátil en la alimentación y en la salida del digestor. La diferencia entre ambas dividida entre la materia volátil en la alimentación, multiplicada por cien, indica el porcentaje de materia volátil eliminada.

El porcentaje de materia volátil es calculado por la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos volátiles medidos en las muestras de ensayo, todo ello multiplicado por cien.

En las figuras 83 y 84 pueden verse los datos de la tabla 82 gráficamente, tanto a escala diaria como semanal. En ambas gráficas se presenta en rojo la materia volátil referente a la alimentación, con una media de 73 %. En color azul se presenta la materia volátil correspondiente a la muestra de digestor analizada, con una media de 45 %. En color verde se presenta el porcentaje de eliminación de materia volátil. Con la línea de color azul se representa el biogás producido para obtener una comparación de ambos parámetros. La eliminación de materia volátil con el lixiviado como residuo promedia un valor de eliminación del 38 %. Estos datos indican que una parte de los microorganismos son eliminados en la digestión, pero no de forma comparable con la rapidez con la que disminuye la producción de biogás.

Figura 82: Tabla de datos de materia volátil obtenida en el proceso con lixiviado.

% MV y % de eliminación			
Semanas	MV Entrada	MV Salida	% eliminación MV
1	71 % ± 1	43 % ± 1	40 %
2	77 % ± 1	45 % ± 1	42 %
3	76 % ± 1	43 % ± 1	44 %
4	72 % ± 1	48 % ± 1	33 %
5	71 % ± 1	47 % ± 1	33 %

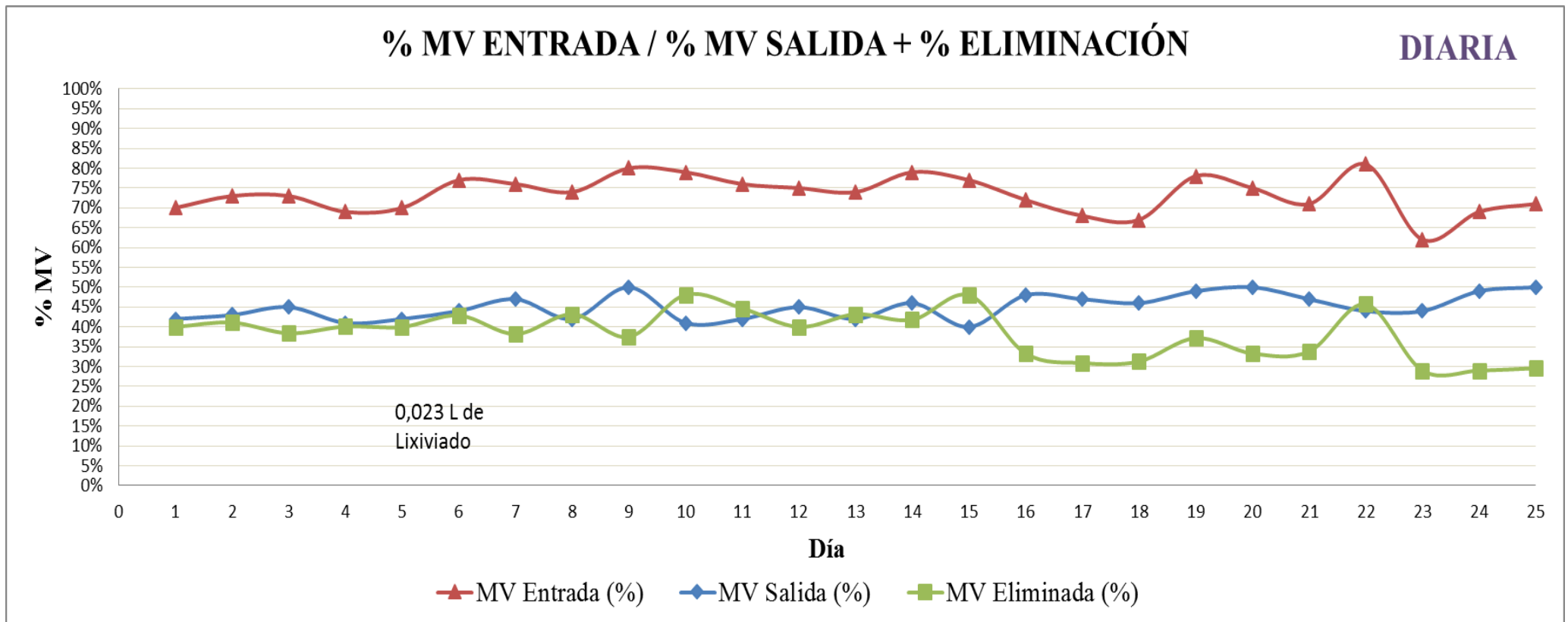


Figura 83: Gráfica de los datos diarios de materia volátil obtenida en el proceso con lixiviado.

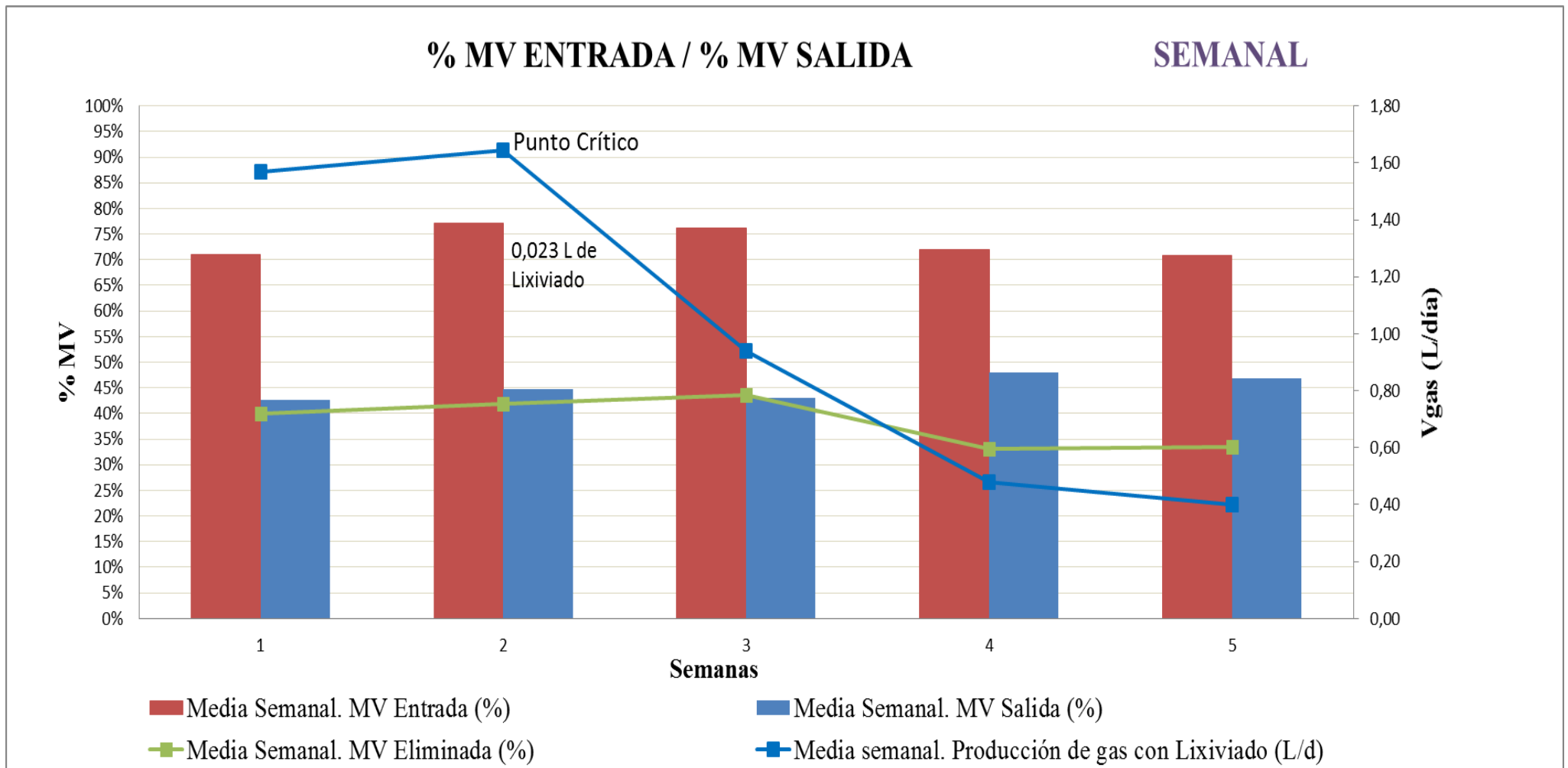


Figura 84: Datos semanales de la materia volátil obtenida en el proceso con lixiviado.

Se describen ahora dos de los parámetros fundamentales para la estabilidad del proceso, la producción de ácidos grasos volátiles y la alcalinidad.

La figura 85 recoge las medias semanales de los datos diarios recogidos en el proceso. En esta tabla se observa que la cantidad de AGV y alcalinidad medida en mg/l de CaCO_3 se mantienen estables durante todo el proceso, en 4.500 mg/L y 400 mg/L respectivamente, disminuyendo progresivamente en el caso de la alcalinidad y aumentando en el caso de los AGV. Este aumento de los AGV confirma la teoría de toxicidad del lixiviado, ya que las bacterias metanogénicas no son capaces de degradar estos ácidos hasta el biogás final, argumentando también la disminución en la producción de gas.

En las figuras 86 y 87 se representan gráficamente los datos de la tabla anterior, tanto a escala diaria como a escala semanal. En ambas gráficas se presentan en morado los datos de alcalinidad y en naranja los de AGV, viéndose un trazado estable desde el inicio hasta llegar a un final donde las diferencias entre ambos parámetros se estrechan. La disminución en el volumen gas representado en la gráfica 87 por la línea azul, coincide con el ligero aumento de los AGV, que no son degradados y se acumulan no generando el biogás esperado.

Figura 85: Tabla de datos de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con lixiviado.

Semanas	Media Semanal. ALCALINIDAD (mg/l) (CaCO₃)	Media Semanal. ACIDEZ (mg/l) (CaCO₃)
1	5.059 ± 1,1	373 ± 0,9
2	4.957 ± 1,1	377 ± 0,9
3	4.824 ± 1,1	372 ± 0,9
4	4.582 ± 1,1	393 ± 0,9
5	4.428 ± 1,1	427 ± 0,9

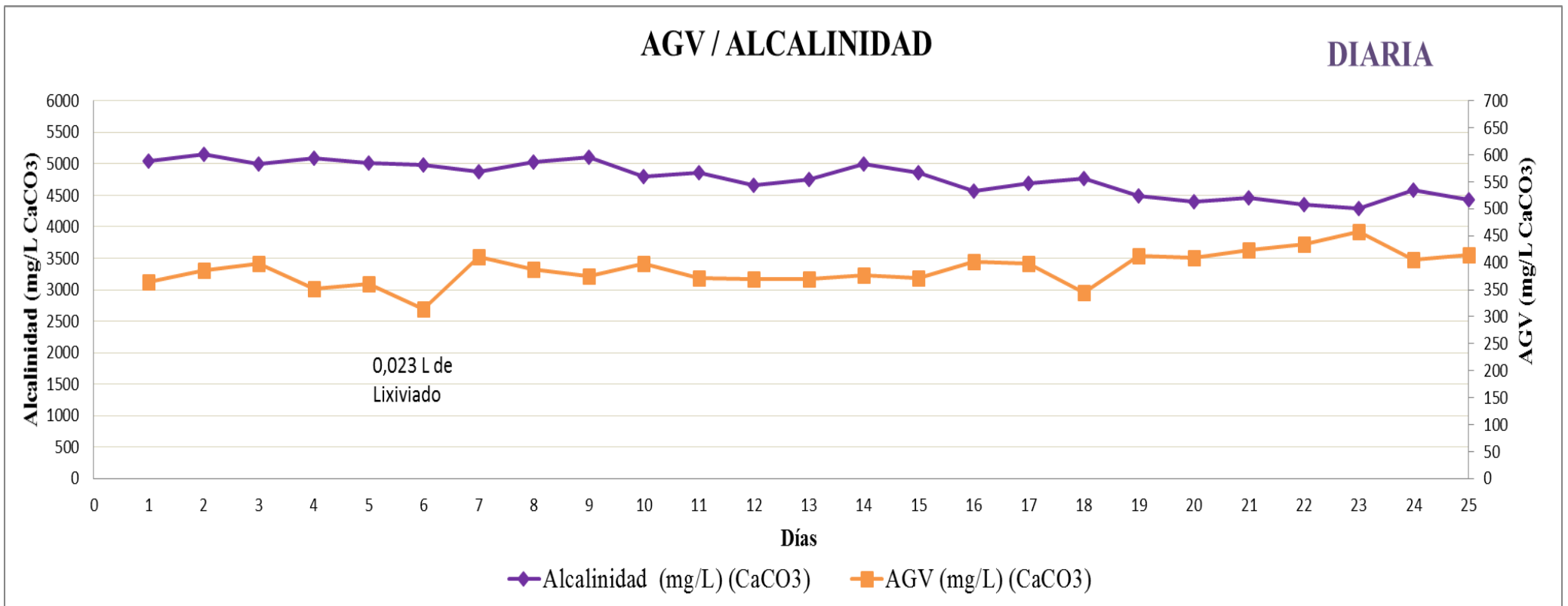


Figura 86: Gráfica de los datos diarios de la alcalinidad y la acidez medida en el proceso con lixiviado.

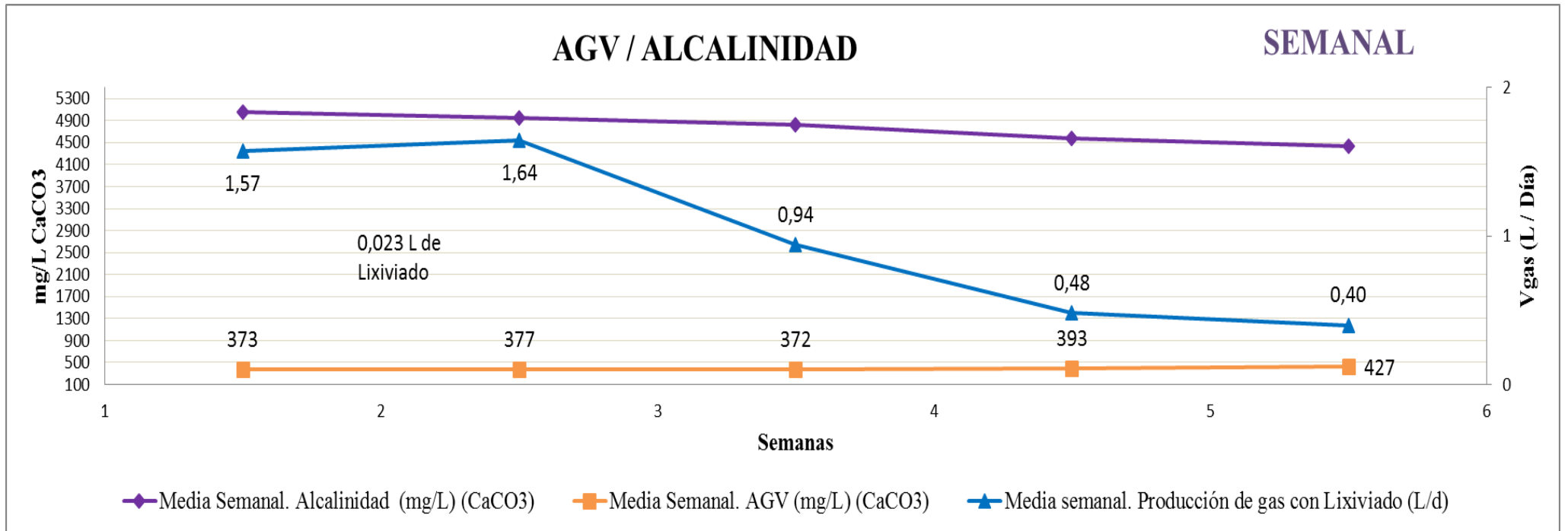


Figura 87: Gráfica de los datos semanales de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con lixiviado.

El ratio AGV/ Alcalinidad debe de estar dentro del rango establecido por su relación (0,1-0,4) para asegurar la estabilidad del proceso, cualquier variación en este rango supone un desequilibrio en el sistema. Otro parámetro muy importante para controlar la estabilidad del digestor es el pH. En la figura 88, se presenta la media de los datos de pH junto con los valores obtenidos en el ratio AGV/ Alcalinidad.

Los datos de pH se han mantenido estables entre 7 y 8 en las tres primeras semanas de ensayo, disminuyendo en las dos últimas hasta valores de 6,7. Esta variación del pH indica una acidificación del medio, que dificulta la actividad de las bacterias metanogénicas, lo que explica la disminución en la producción de biogás.

En las figuras 89, 90 y 91 pueden verse los trazados de pH, AGV/Alcalinidad y biogás producido. Puede verse que el digestor en estudio cuenta con una escasa capacidad tampón, siempre por debajo del límite inferior del rango de estabilidad. Vemos claramente la disminución en los valores de pH, que indican el mal funcionamiento del digestor y del proceso anaerobio, coincidiendo con la disminución del biogás generado, tal y como se ve en la gráfica 91.

Figura 88: Tabla de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con lixiviado.

Semana	Media Semanal. PH (Digestor)	Ratio AGV/ Alcalinidad
1	7,7 ± 0,01	0,07
2	7,5 ± 0,01	0,07
3	7,2 ± 0,01	0,07
4	6,8 ± 0,01	0,08
5	6,7 ± 0,01	0,09

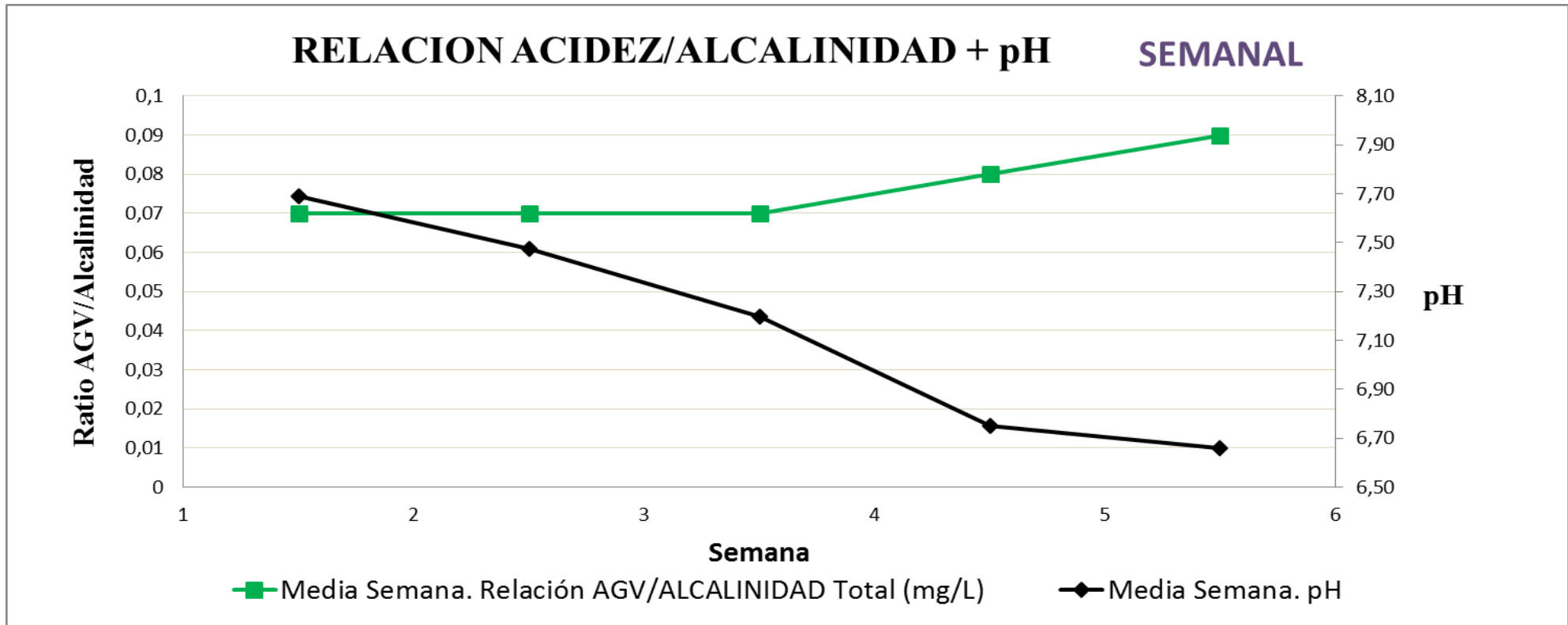


Figura 89: Gráfica de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con lixiviados.

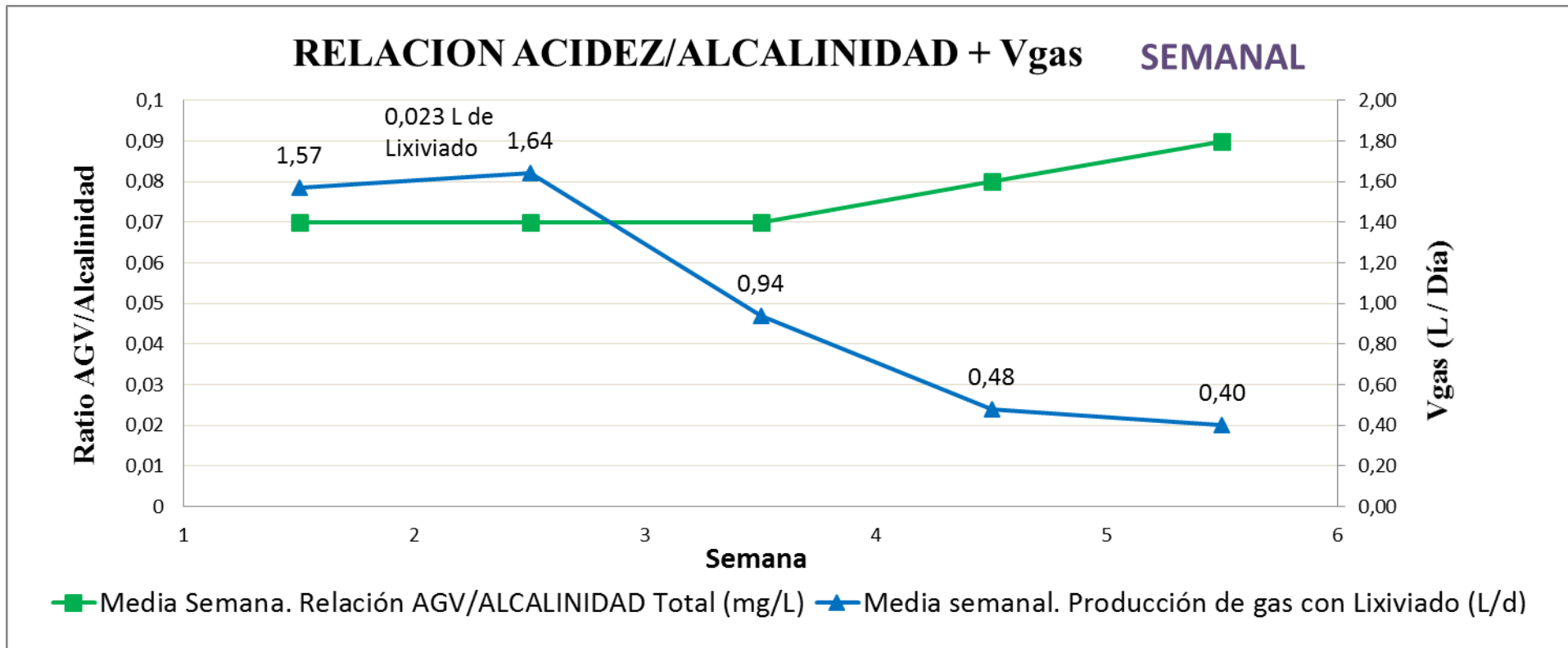


Figura 90: Gráfica de datos semanales de ratio AGV/ Alcalinidad y volumen gas medidos en el proceso con lixiviado.

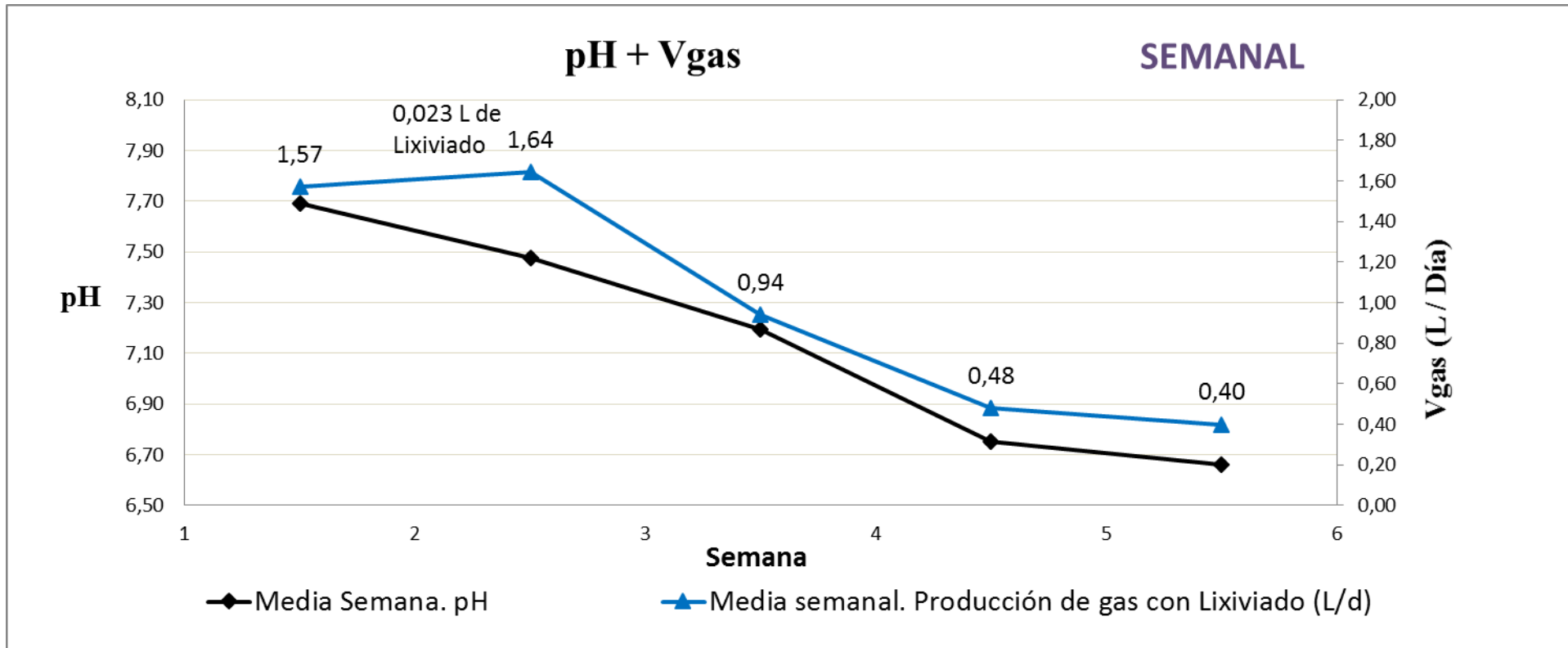


Figura 91: Gráfica de datos semanales de pH y volumen gas medidos en el proceso con lixiviado.

- ***Conclusiones.***

En este apartado se presentan las conclusiones obtenidas en base a los resultados y a las consideraciones anteriormente explicadas.

- El proceso de co-digestión anaerobia con adiciones de lixiviado de 0,023 L no es viable. Se sugiere en investigaciones futuras, un estudio de optimización de la cantidad a adicionar en el digestor para su funcionamiento estable, y así resultar una alternativa de gestión para este residuo, aunque no produzca una cantidad extra de biogás que permita obtener energía del proceso, debido a su gran peligrosidad como contaminante
- La producción de biogás decae durante el proceso anaerobio por lo que los lixiviados no pueden considerarse totalmente biodegradables y pueden ser inhibidores del proceso a partir de cierta cantidad en la alimentación. Se recomienda un estudio en profundidad a las fases del proceso anaerobio y las poblaciones bacterianas participantes.
- En relación a los diferentes parámetros indicadores del funcionamiento del sistema, se concluye que la adicción del lixiviado como co-sustrato en la digestión anaerobia no es viable, desestabilizando las condiciones óptimas de operación del digestor. La población bacteriana es eliminada en gran parte durante el proceso, el ratio AGV/Alcalinidad se encuentra por debajo del rango óptimo establecido y el pH disminuye acidificando el digestor.

3.4 Ensayo con Glicerina.

- Ensayo inicial con glicerina.

El siguiente ensayo se realiza con glicerina, este residuo proviene de la industria de fabricación de biodiesel. El residuo de glicerina se introduce directamente sin ningún tratamiento previo dada sus características de fluido.

El residuo de glicerina se comienza a introducir una vez se considera que el reactor está estable en óptimas condiciones de producción, con una alimentación de fango mixto. Una vez introducido el residuo, se estudia su efecto en el proceso anaerobio y la evolución de los parámetros analizados.

El objetivo de esta investigación es la incorporación de glicerina como residuo a un tratamiento de co-digestión anaerobia, sin la desestabilización del proceso y una producción extra de biogás que permita obtener energía eléctrica, reduciendo los costes energéticos.

- *Discusión de resultados.*

Los primeros datos de la figura 92 representan el potencial de producción de gas que tiene el digestor en el proceso de co-digestión. En diversas columnas se exponen una media de los litros diarios que el digestor produce a la semana sin y con el residuo. En la última columna se representa el incremento o pérdida de biogás producido por el efecto del residuo añadido en el proceso anaerobio.

Los datos expuestos se expresan como la media de litros producidos por el digestor a la semana, para así realizar más fácilmente la comparación entre datos.

En un inicio, tras el período de arranque y estabilización, la producción de gas generada con la adición de 0,040 L de glicerina supera en una proporción del 11 % a la producida por el digestor con tan solo el fango mixto. Este dato cambia a lo largo de las semanas, disminuyendo su producción de biogás de una manera progresiva.

En la semana cuatro la producción de gas disminuye un 20 % con respecto al producido por el fango mixto. Las semanas restantes esta producción se estabiliza en una pérdida de biogás del 20 %, concluyendo la investigación. Dados estos resultados puede concluirse que la adición de glicerina mantiene estable el digestor, disminuyendo sensiblemente su producción de gas. Esta producción de gas puede igualarse y mejorarse con un estudio en detalle de este residuo y su cantidad óptima de alimentación. Datos muy interesantes dada la posibilidad de gestión de sustrato peligroso en co-digestión y el posible beneficio energético con una producción extra de biogás. Con estas conclusiones se procede a una investigación en detalle de este residuo, para confirmar las hipótesis anteriores.

Figura 92: Tabla de datos del volumen de gas obtenido con lixiviado.

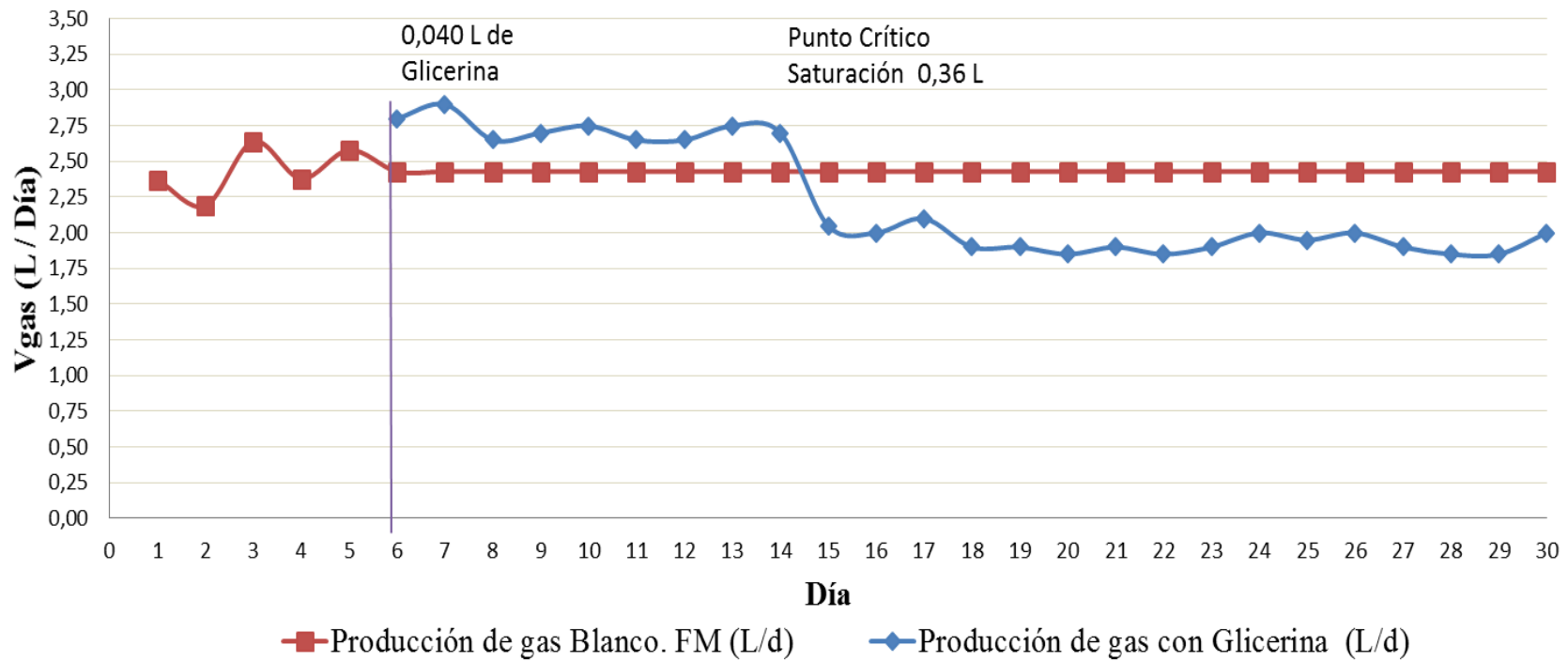
Volumen medio semanal de gas producido con y sin Glicerina					
Semanas	Alimentación (L)		Producción media (L) sin Glicerina	Producción media (L) con Glicerina	% de incremento de Biogás
	Fango mixto	Glicerina			
1	0,400		2,430		
2	0,400	0,040		2,730	11 %
3				2,560	5 %
4				1,950	-20 %
5				1,920	-21 %
6				1,920	-21 %

A continuación se representan los datos de la tabla anterior en dos gráficas distintas, la gráfica 93, donde vemos los litros de gas producidos diariamente por el digestor y la gráfica 94, representando los mismos datos pero en este caso a escala semanal. En ambas gráficas se representa con color azul el volumen de gas producido tras la adición del residuo y con color rojo la media de producción de gas sin residuo.

Una vez estabilizado el digestor tras el arranque, a partir del día 5 concretamente, se comienza a alimentar el digestor con el sustrato. La producción de gas comienza a ser ligeramente superior (11 %) a la medida con el fango mixto durante las dos primeras semanas. En la tercera semana de ensayo la producción de gas cae rápidamente, disminuyendo progresivamente hasta llegar a valores de 1,9 L. De esta semana en adelante la pérdida de biogás se estabiliza rondando un porcentaje del 20 %. Dados estos resultados se para la investigación para realizar un estudio en detalle a este residuo y mejorar el rendimiento en el proceso de digestión anaerobia, ya que la estabilidad en la pérdida de biogás sugiere un potencial energético de este residuo si se alimenta en la dosis adecuada.

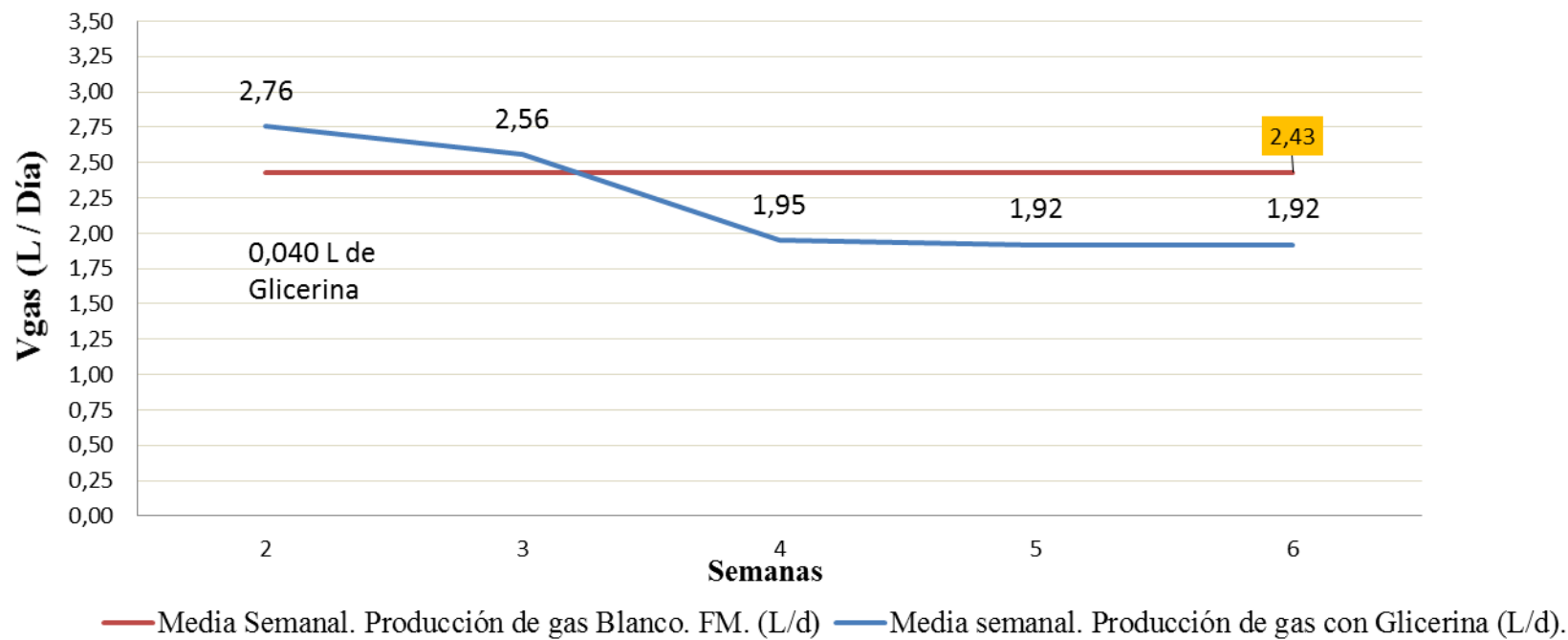
La estabilidad final de la glicerina se ve más claramente en la gráfica 94 que representa el volumen de gas producido por semanas, donde las columnas indican que la producción semanal de biogás queda estable en datos de 1,9 L, con respecto a los 2,4 L del fango mixto en color rojo, pérdida de biogás no demasiado significativa.

VOLUMEN DE GAS DIARIO CON Y SIN GLICERINA



Figuras 93: Gráfica diaria de la producción de gas obtenida en el proceso con Glicerina.

VOLUMEN DE GAS MEDIO SEMANAL CON Y SIN GLICERINA



Figuras 94: Gráfica semanal de la producción de gas obtenida en el proceso con glicerina.

Se analiza ahora el desarrollo del proceso de co-digestión con la glicerina, para ello se observa la estabilidad de los distintos parámetros analizados. Estos resultados se utilizan como base inicial con respecto a los obtenidos posteriormente en el estudio en detalle de este residuo.

Con respecto a la DQO, se comparan los datos de entrada, salida y eliminación de materia orgánica. Estos datos son los representados en las figuras 95, 96, 97 y 98. En la tabla 95, se exponen los datos de DQO de la alimentación del digestor y de la muestra sacada para el análisis en mg litro, y el rendimiento de eliminación en porcentaje. El porcentaje de rendimiento de eliminación de materia orgánica se ha calculado por diferencia entre la DQO de entrada y la de salida dividido por la DQO de entrada, todo ello multiplicado por cien.

En las gráficas 96, 97 y 98 se representan los datos de la tabla 95 a escala diaria y semanal. En color rojo puede verse la DQO de la alimentación, con una media de DQO de entrada de 34.400 mg/L. En color azul se representa la DQO de la muestra de digestor analizada, con una media de DQO de salida de 20.200 mg/L. En color verde se presenta el porcentaje de eliminación de DQO en el proceso anaerobio. Los datos obtenidos indican la dificultad de degradación de este residuo, obteniendo un promedio de eficiencia de eliminación de 40 %. A mayor porcentaje de eliminación mayor biodegradabilidad del sustrato y por tanto mayor eficiencia del proceso. Un dato que sugiere el estudio avanzado de este residuo es el aumento de la eliminación de DQO a lo largo de las semanas, la población bacteriana si degrada el sustrato pero les resulta difícil y deben de adaptarse primero a las condiciones que éste aporta al medio. En la gráfica 98 se representa el porcentaje de eliminación junto con el volumen de gas producido. Se aprecia como la eliminación de DQO decae semanas antes de la disminución en la generación de gas. Tras la estabilización del proceso, el porcentaje de eliminación aumenta nuevamente, aunque no se complementa con el aumento en la producción de biogás.

Figura 95: Tabla con los datos de DQO obtenidos en el proceso con glicerina.

Semanas	DQO Entrada (mg/l)	DQO Salida (mg/l)	% eliminación DQO
1	37.750 ± 0,7	20.684 ± 0,8	44 %
2	33.044 ± 0,7	21.323 ± 0,8	35 %
3	32.733 ± 0,7	20.678 ± 0,8	37 %
4	29.492 ± 0,7	19.139 ± 0,8	35 %
5	34.518 ± 0,7	19.397 ± 0,8	40 %
6	42.370 ± 0,7	20.567 ± 0,8	51 %

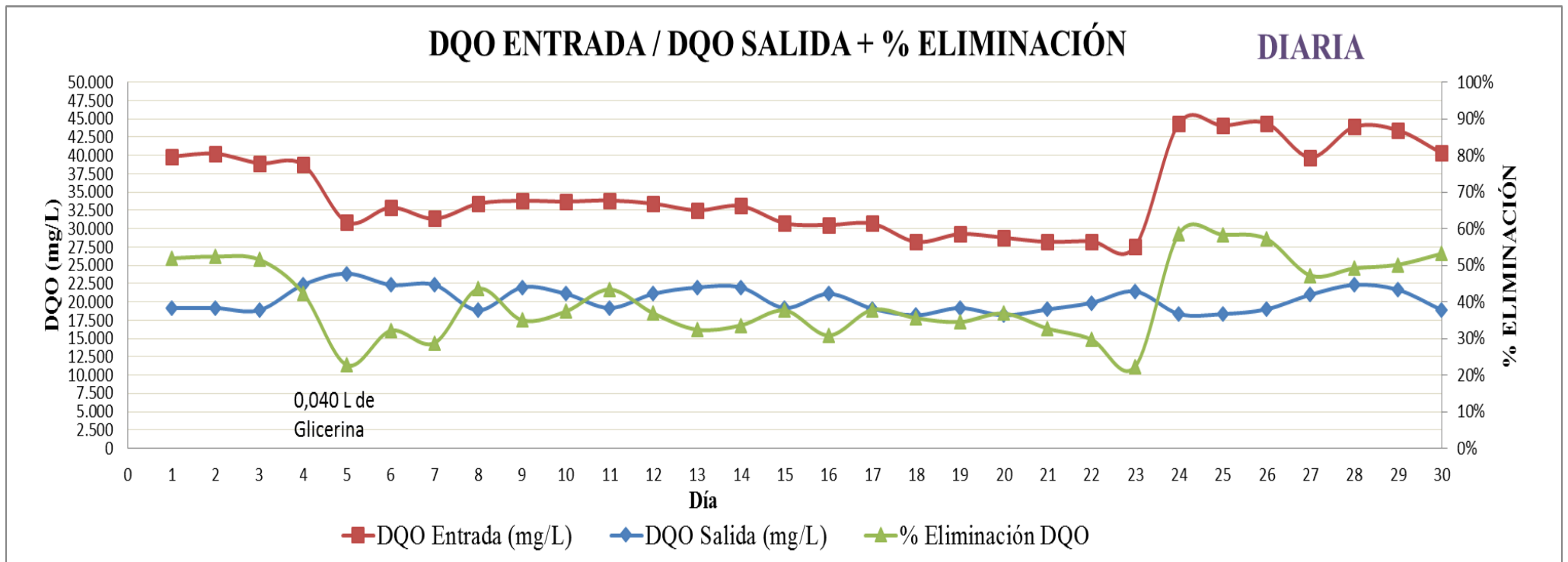


Figura 96: Gráfica de datos diarios de la DQO obtenida en el proceso con glicerina.

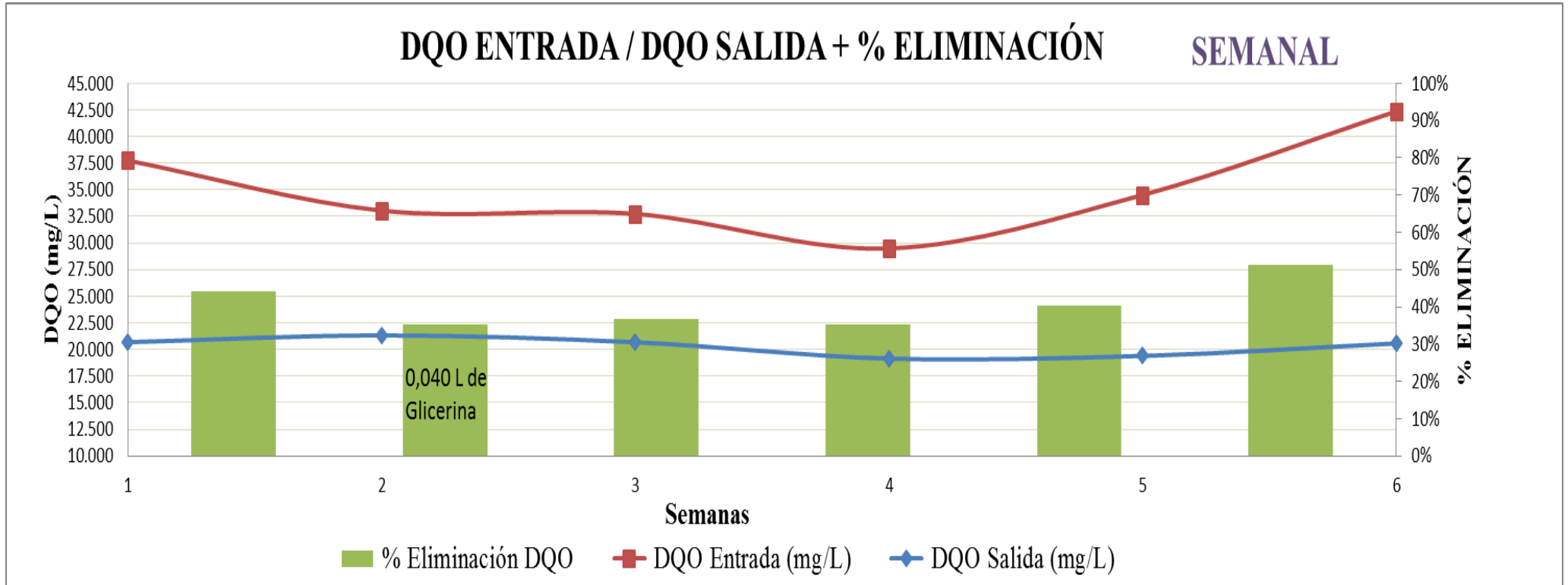


Figura 97: Gráfica de datos semanales de la DQO obtenida en el proceso con glicerina.

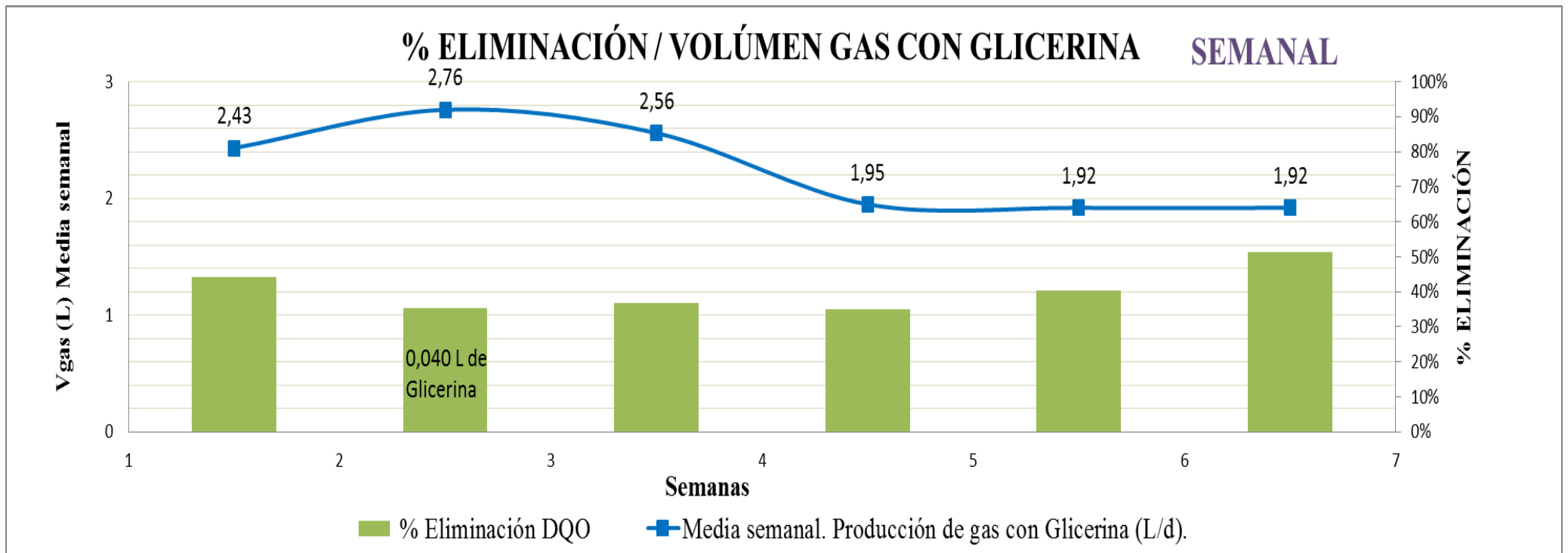


Figura 98: Gráfica de datos semanales de la eliminación de DQO y volumen gas obtenidos en el proceso con glicerina.

Un parámetro esencial en el proceso de digestión anaerobia es la cantidad de microorganismos que existen en el digestor, representados por el porcentaje de materia volátil medido.

En la figura 99 se exponen los datos de materia volátil (MV) medidos en este ensayo. Se presentan los datos de materia volátil en la alimentación y en la salida del digestor. La diferencia entre ambas dividida entre la materia volátil en la alimentación, multiplicada por cien, indica el porcentaje de materia volátil eliminada.

El porcentaje de materia volátil es calculado por la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos volátiles medidos en las muestras de ensayo, todo ello multiplicado por cien.

En las figuras 100 y 101 pueden verse los datos de la tabla 99 gráficamente, tanto a escala diaria como semanal. En ambas gráficas se presenta en rojo la materia volátil referente a la alimentación, con una media de 80 %. En color azul se presenta la materia volátil correspondiente a la muestra de digestor analizada, con una media de 63 %. En color verde se presenta el porcentaje de eliminación de materia volátil. La eliminación de materia volátil con la glicerina como residuo es bajo, con una media de eliminación del 22 %. Estos datos indican que el 80 % de la población bacteriana se mantiene en el digestor en el proceso de alimentación y muestra. En la gráfica 101 se representa el volumen de gas producido con la línea azul. Dado que la población bacteriana se mantiene se concluye que la disminución en la producción de gas no está asociada al porcentaje de población existente, sino a la capacidad de degradación del residuo tratado.

Figura 99: Tabla de datos de materia volátil obtenida en el proceso con glicerina.

% MV y % de eliminación			
Semanas	MV Entrada	MV Salida	% eliminación MV
1	75 % ± 1	64 % ± 1	14 %
2	78 % ± 1	62 % ± 1	21 %
3	83 % ± 1	62 % ± 1	25 %
4	82 % ± 1	63 % ± 1	23 %
5	82 % ± 1	64 % ± 1	22 %
6	79 % ± 1	64 % ± 1	19 %

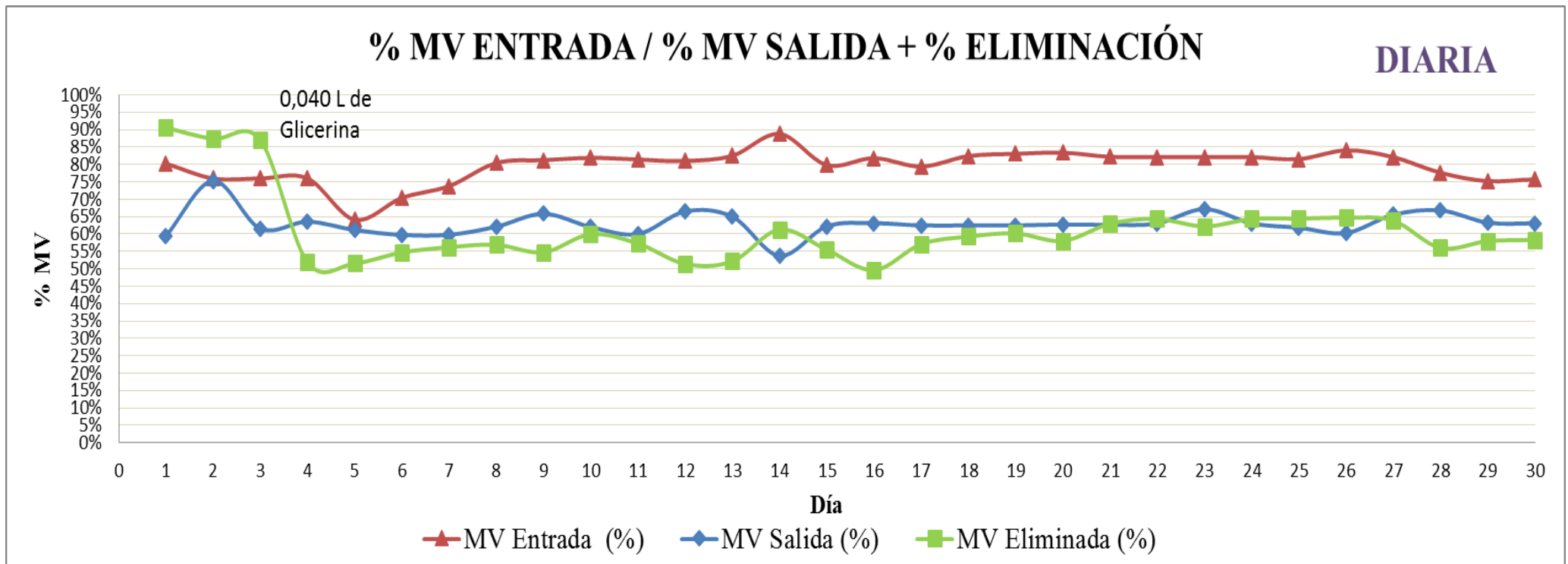


Figura 100: Gráfica de los datos diarios de materia volátil obtenida en el proceso con glicerina.

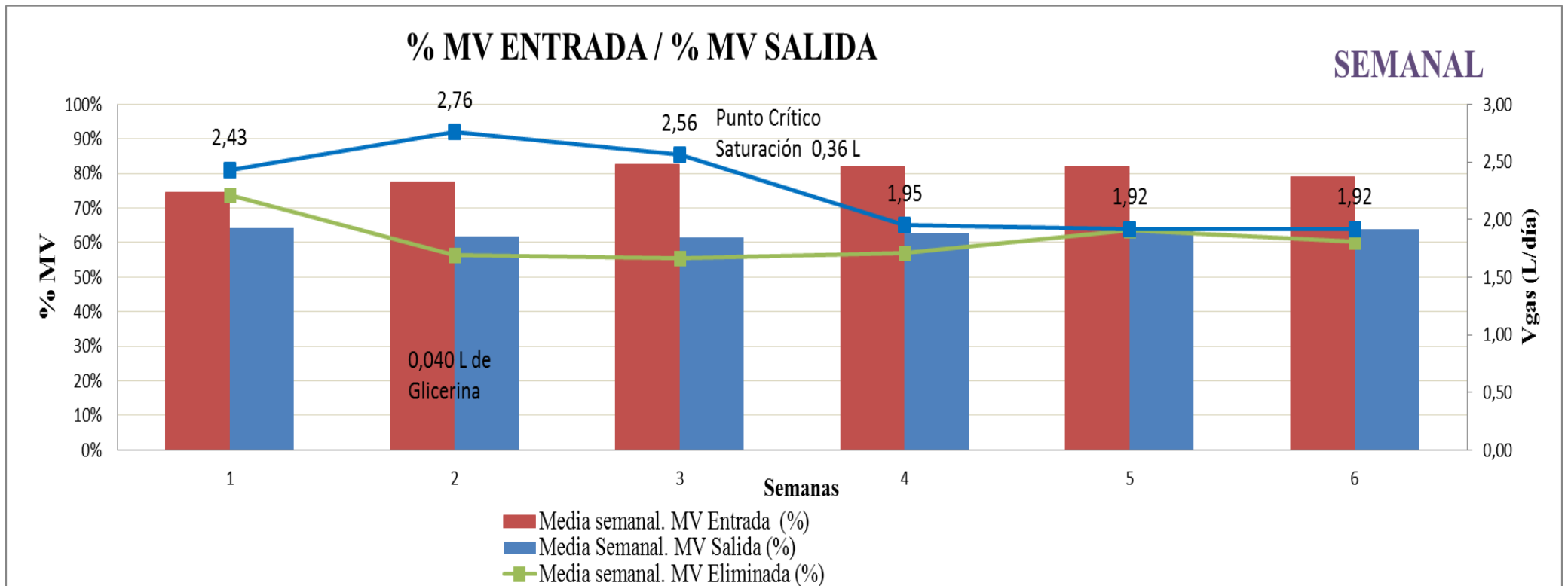


Figura 101: Datos semanales de la materia volátil obtenida en el proceso con glicerina.

Se describen ahora dos de los parámetros fundamentales para la estabilidad del proceso, la producción de ácidos grasos volátiles y la alcalinidad.

La figura 102 recoge las medias semanales de los datos diarios recogidos en el proceso, donde puede verse que el digester en estudio cuenta con una buena capacidad tampón, siempre por dentro del rango de estabilidad marcado. En esta tabla se observa que la cantidad de AGV y alcalinidad medida en mg/l de CaCO₃ se mantienen estables durante todo el proceso, en 4.600 mg/L y 600 mg/L respectivamente.

En las figuras 103 y 104 se representan gráficamente los datos de la tabla anterior, tanto a escala diaria como a escala semanal. En ambas gráficas se presentan en morado los datos de alcalinidad, en naranja los de AGV y en azul el biogás generado, viéndose un trazado estable desde el inicio hasta llegar a un final donde los datos de alcalinidad y AGV caen un poco, coincidiendo con la disminución del gas generado.

Figura 102: Tabla de datos de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con glicerina.

Semanas	Media Semanal. ALCALINIDAD (mg/l) (CaCO₃)	Media Semanal. ACIDEZ (mg/l) (CaCO₃)
1	4.789 ± 1,1	634 ± 0,9
2	4.685 ± 1,1	614 ± 0,9
3	4.812 ± 1,1	671 ± 0,9
4	4.840 ± 1,1	617 ± 0,9
5	4.232 ± 1,1	518 ± 0,9
6	4.475 ± 1,1	611 ± 0,9

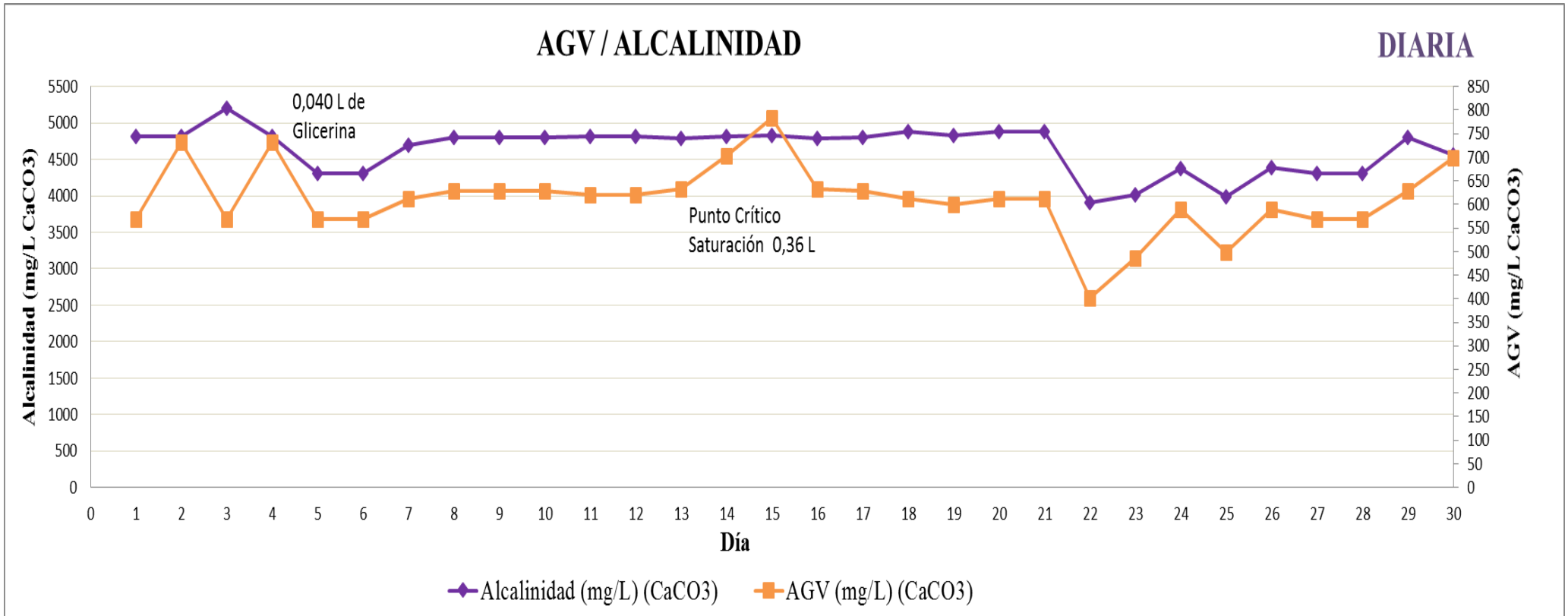


Figura 103: Gráfica de los datos diarios de la alcalinidad y la acidez medida en el proceso con glicerina.

RELACIÓN AGV / ALCALINIDAD

SEMANAL

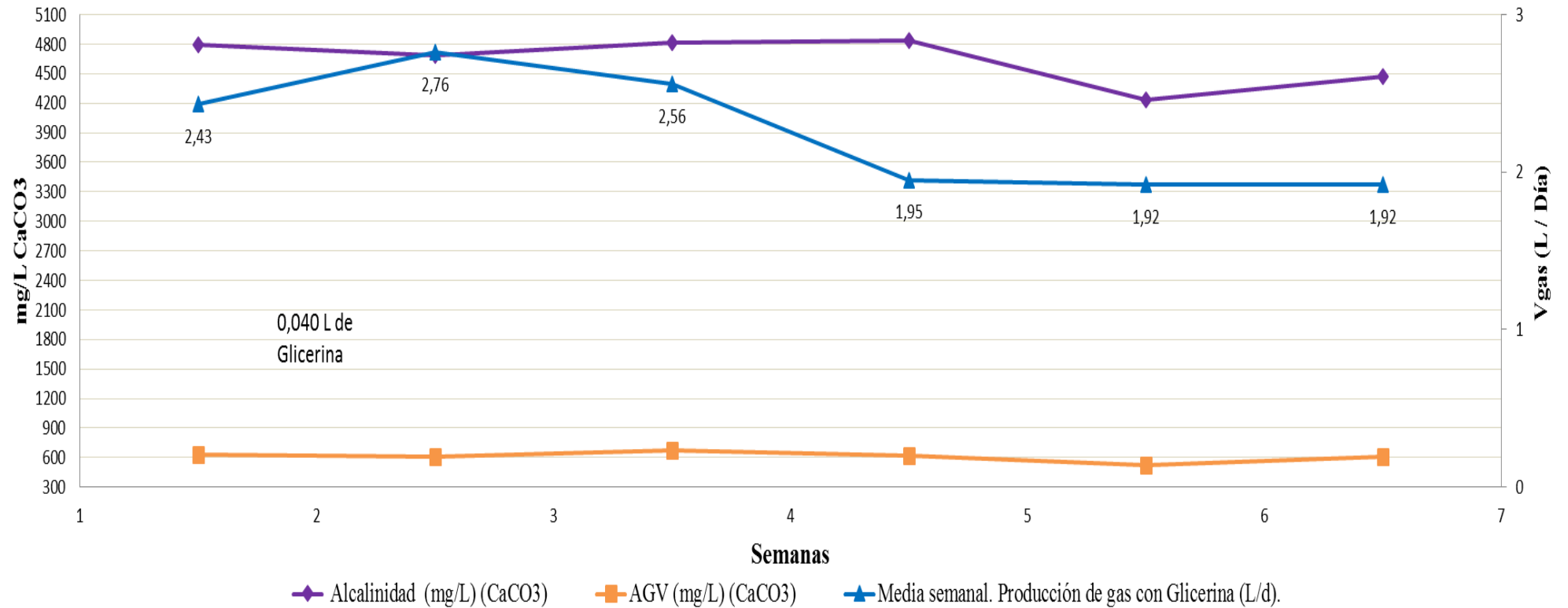


Figura 104: Gráfica de los datos semanales de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con glicerina.

El ratio AGV/ Alcalinidad debe de estar dentro del rango establecido por su relación (0,1-0,4) para asegurar la estabilidad del proceso, cualquier variación en este rango supone un desequilibrio en el sistema. Otro parámetro muy importante para controlar la estabilidad del digestor es el pH. En la figura 105, se presenta la media de los datos de pH semanales junto con los datos del ratio de relación AGV/ Alcalinidad.

Los datos de pH se han mantenido estables superando el pH 8 en la mayoría de las semanas de ensayo. Esta estabilidad del pH indica un desarrollo exitoso del proceso anaerobio, que con una optimización en la alimentación puede generar una producción extra de biogás. Los datos de AGV/ Alcalinidad se mantienen en todo momento dentro del rango establecido.

En las figuras 106, 107 y 108 pueden verse los trazados de pH, AGV/ Alcalinidad y volumen gas producido. Vemos claramente la estabilidad en los valores de pH y relación AGV/ Alcalinidad que indican el buen funcionamiento del digestor pese a la disminución en la cantidad de gas producido.

Figura 105: Tabla de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con glicerina.

Semana	Media Semana. PH (Digestor)	Ratio AGV/ Alcalinidad
1	7,9 ± 0,01	0,13
2	8,4 ± 0,01	0,13
3	8,3 ± 0,01	0,14
4	8,1 ± 0,01	0,13
5	8 ± 0,01	0,12
6	8,1 ± 0,01	0,14

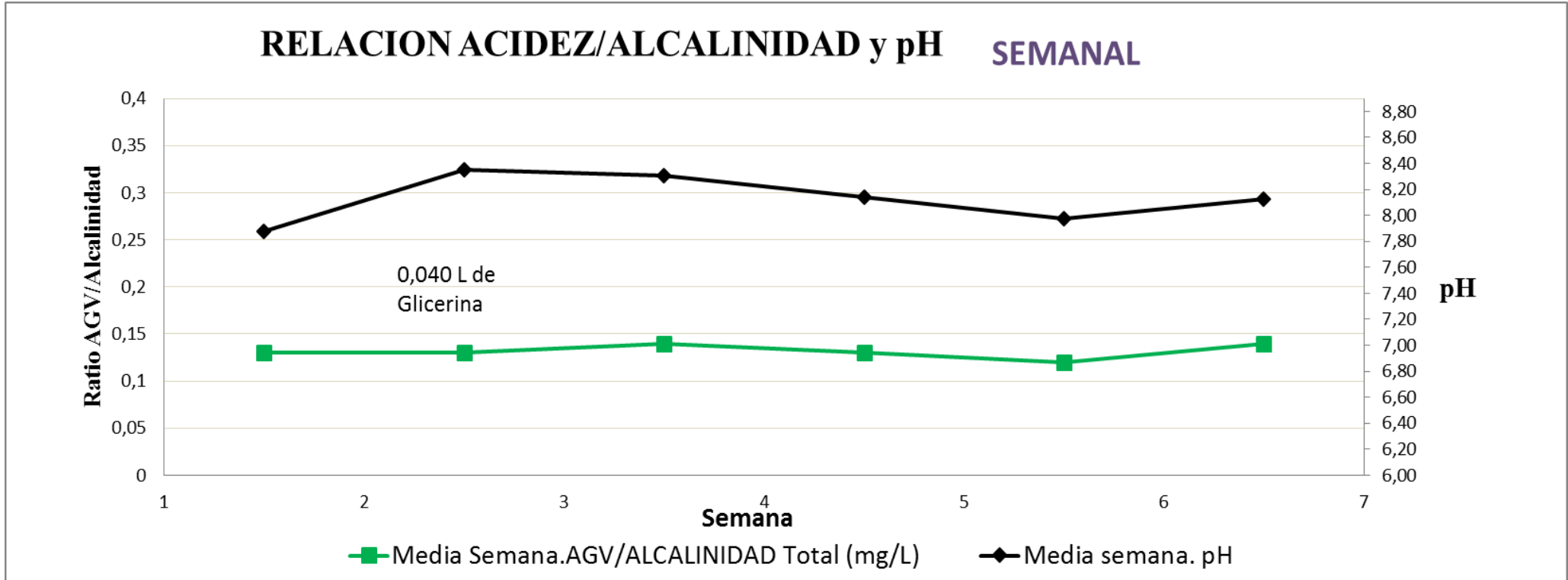


Figura 106: Gráfica de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con glicerina.

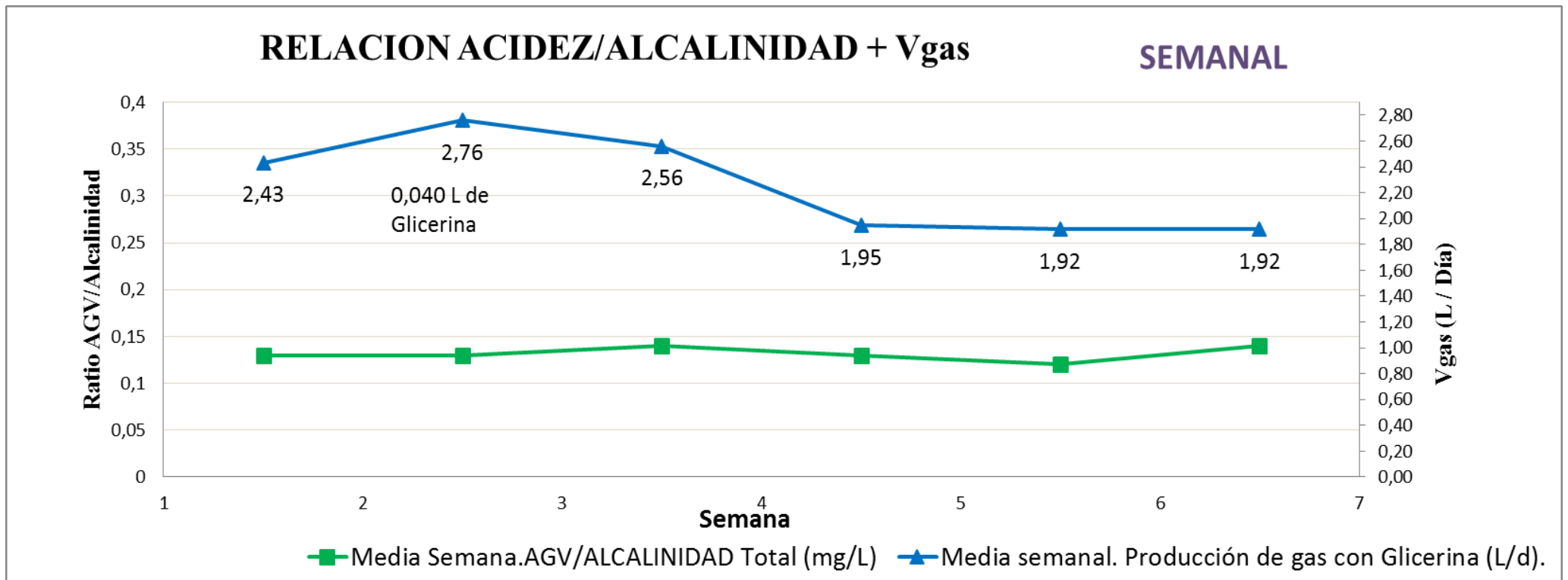


Figura 107: Gráfica de datos de ratio AGV/ Alcalinidad y volumen gas medidos en el proceso con glicerina.

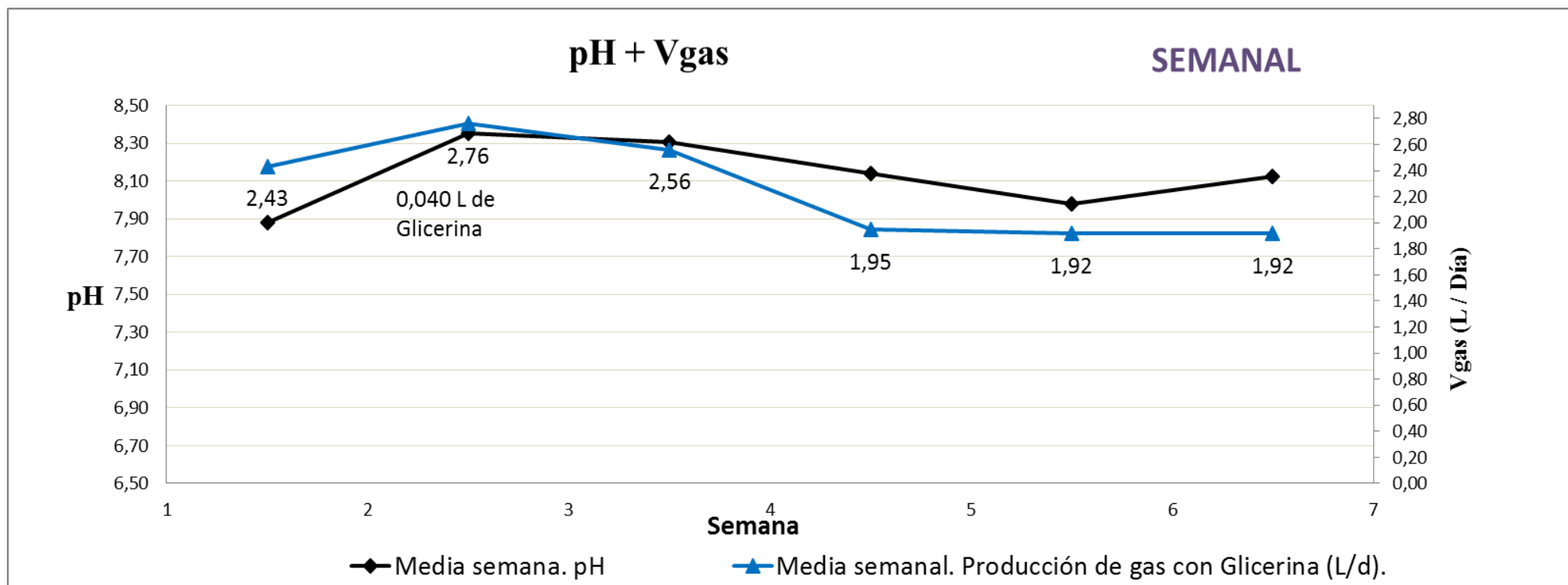


Figura 108: Gráfica de datos de pH y volumen gas medidos en el proceso con glicerina.

- ***Conclusiones.***

En este apartado se presentan las conclusiones obtenidas en base a los resultados y a las consideraciones anteriormente explicadas.

- El proceso de co-digestión anaerobia con adiciones de glicerina de 0,040 L no es viable, pero los datos obtenidos sugieren un potencial energético de este residuo adicionado en cantidades adecuadas. Por ello, se propone un estudio en detalle de este residuo para conseguir su viabilidad en el proceso anaerobio y genere beneficios energéticos, resultando una alternativa para su gestión como residuo peligroso.
- La producción de biogás decae durante el proceso anaerobio, pero la pérdida no es demasiado significativa, por lo que se deduce que la población bacteriana si degrada el residuo, pero de forma lenta, y es necesario un periodo de adaptación para degradarlo.
- En relación a los diferentes parámetros indicadores del funcionamiento del sistema, se concluye que la adicción de glicerina como co-sustrato en la digestión anaerobia puede ser viable en concentraciones adecuadas, puesto que los datos obtenidos indican que la estabilidad de la población bacteriana es buena y el digestor se mantiene dentro de los rangos de AGV/Alcalinidad y pH establecidos.

- *Estudio en detalle a la Glicerina.*

En la gráfica 109 se comparan los tres residuos estudiados inicialmente, encontrando resultados bastante dispares. El paté es estable en el proceso, aumentando la producción extra de biogás en una pequeña cantidad. El lixiviado no produce un aumento sino que disminuye la producción de biogás hasta unos valores muy por debajo del generado en un proceso normal con fango mixto como alimentación. La glicerina no produce un aumento de biogás pero no desestabiliza el digester, disminuyendo la producción de gas a niveles iguales o un poco por debajo del generado por el fango mixto. Dadas las características y vistas las conclusiones para cada residuo, se dedica una investigación en detalle a la glicerina, residuo muy contaminante que posee unas características moldeables para su utilización en el proceso de digestión anaerobia de una EDAR. En el estudio de optimización se busca encontrar la cantidad máxima de glicerina que se puede añadir junto al fango mixto al proceso de digestión, sin desestabilizar dicho proceso y generando al menos el mínimo de biogás que produce el fango mixto por sí solo. Otro de los objetivos es aumentar esta producción de biogás encontrando la cantidad adecuada de glicerina añadida a la alimentación. Si estos objetivos son cumplidos, el residuo es viable para su implementación en un proceso de co-digestión en una EDAR.

Con este sistema la EDAR se convierte en gestora de un residuo muy peligroso de difícil gestión, sin desestabilizar el proceso anaerobio y posiblemente generando una pequeña cantidad de biogás extra que le permita generar energía eléctrica para su autoconsumo, ahorrando en los costes energéticos de la planta.

El estudio avanzado de la glicerina consiste en un ensayo con la tecnología BMP, explicada en el apartado de materiales y método, utilizando reactores tipo batch de una sola etapa, para encontrar la cantidad optima de adición al digester piloto. Una vez adquiridos estos datos se comienza la segunda etapa de investigación, adicionando glicerina en un digester semicontinuo de 7 litros de volumen, para estudiar su comportamiento y alcanzar los objetivos marcados anteriormente (estabilidad en el proceso y producción extra de biogás).

VOLUMEN DE GAS MEDIO SEMANAL

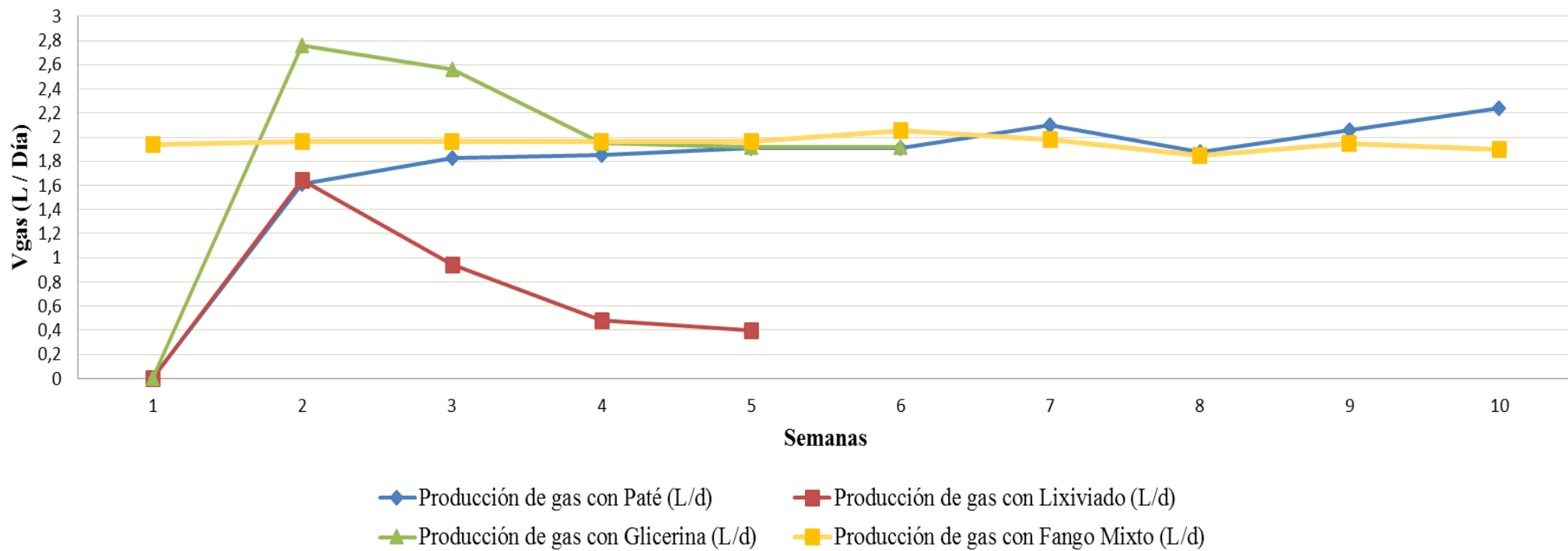


Figura 109: Grafica comparativa de los residuos estudiados anteriormente.

- ***Ensayo BMP con Glicerina.***

Aplicar la técnica BMP permite obtener resultados en un periodo corto de tiempo, con un porcentaje de viabilidad muy alto. Con el fin de encontrar una cantidad óptima de funcionamiento del residuo estudiado, se ensaya en digestores de una sola etapa con diferentes cantidades de glicerina. El BMP está compuesto por 0,150 L de la mezcla ensayada. Se realizan dos BMP bases para tener una referencia que sirva como comparativa con el resto de los BMP que incluyen el residuo. Un BMP formado únicamente por inóculo (Biomasa anaerobia adaptada) y otro BMP que contiene junto al inóculo fango mixto de depuradora. Partiendo de esta base se preparan las siguientes mezclas:

- 1- BMP con 0,150 L de inóculo. (D)
- 2- BMP con 0,100 L de inóculo + 0,050 L de fango mixto de depuradora. (FM)
- 3- BMP con 0,100 L de inóculo + 0,048 L de fango mixto de depuradora + 0,0025 L de Glicerina. (FM+GLI 1)
- 4- BMP con 0,100 L de inóculo + 0,045 L de fango mixto de depuradora + 0,005 L de Glicerina. (FM+GLI 2)
- 5- BMP con 0,100 L de inóculo + 0,040 L de fango mixto de depuradora + 0,010 L de Glicerina. (FM+GLI 3)
- 6- BMP con 0,100 L de inóculo + 0,035 L de fango mixto de depuradora + 0,015 L de Glicerina. (FM+GLI 4)

La tabla 110 representa el volumen diario medido en cada una de las mezclas de glicerina ensayadas:

Figura 110: Tabla de volumen diario producido en BMP con glicerina como residuo.

Volumen de Biogás producido en BMP (mL)						
Días	D	FM	FM+GLI 1	FM+GLI 2	FM+GLI 3	FM+GLI 4
1	19	49	33	35	64	39
2	39	99	94	135	102	104
3	58	139	169	167	121	198
4	77	170	184	175	148	196
5	96	193	198	181	142	193
6	111	203	222	193	141	186
7	123	217	244	199	141	181
8	131	229	271	199	148	185
9	140	240	287	212	151	187
10	148	252	303	216	154	187
11	155	259	325	220	159	187
12	163	262	346	221	167	185
13	172	266	358	220	176	179
14	180	270	371	217	184	172
15	184	272	388	218	197	168
16	188	274	405	221	209	164
17	192	276	422	226	222	160
18	195	276	440	230	236	157
19	198	276	453	234	247	154
20	201	275	465	232	259	151
21	204	275	476	230	265	148

Figura 111: Tabla de volumen de gas total acumulado en la experiencia.

V Acumulado (mL) en 21 días de ensayo						
Días	D	FM	FM+GLI 1	FM+GLI 2	FM+GLI 3	FM+GLI 4
21 días	204	275	476	230	265	148

Tal y como puede verse en la tabla 111, la mezcla FM+GLI 1 es la que mayor volumen acumula en total, por tanto puede ser la más adecuada para su adición a reactores piloto a mayor escala. Sin embargo se debe observar la tendencia que tiene la producción de gas en los 21 días de ensayo, pues es posible que la mayor parte del volumen medido sea generado en las primeras fases del ensayo y posteriormente el residuo haya resultado tóxico o inestable y la producción de gas haya decaído.

En la gráfica 112 se observan las tendencias de producción de biogás de cada una de las mezclas en los 21 días de ensayo:

Volumen de biogás diario medido en las distintas mezclas de Glicerina

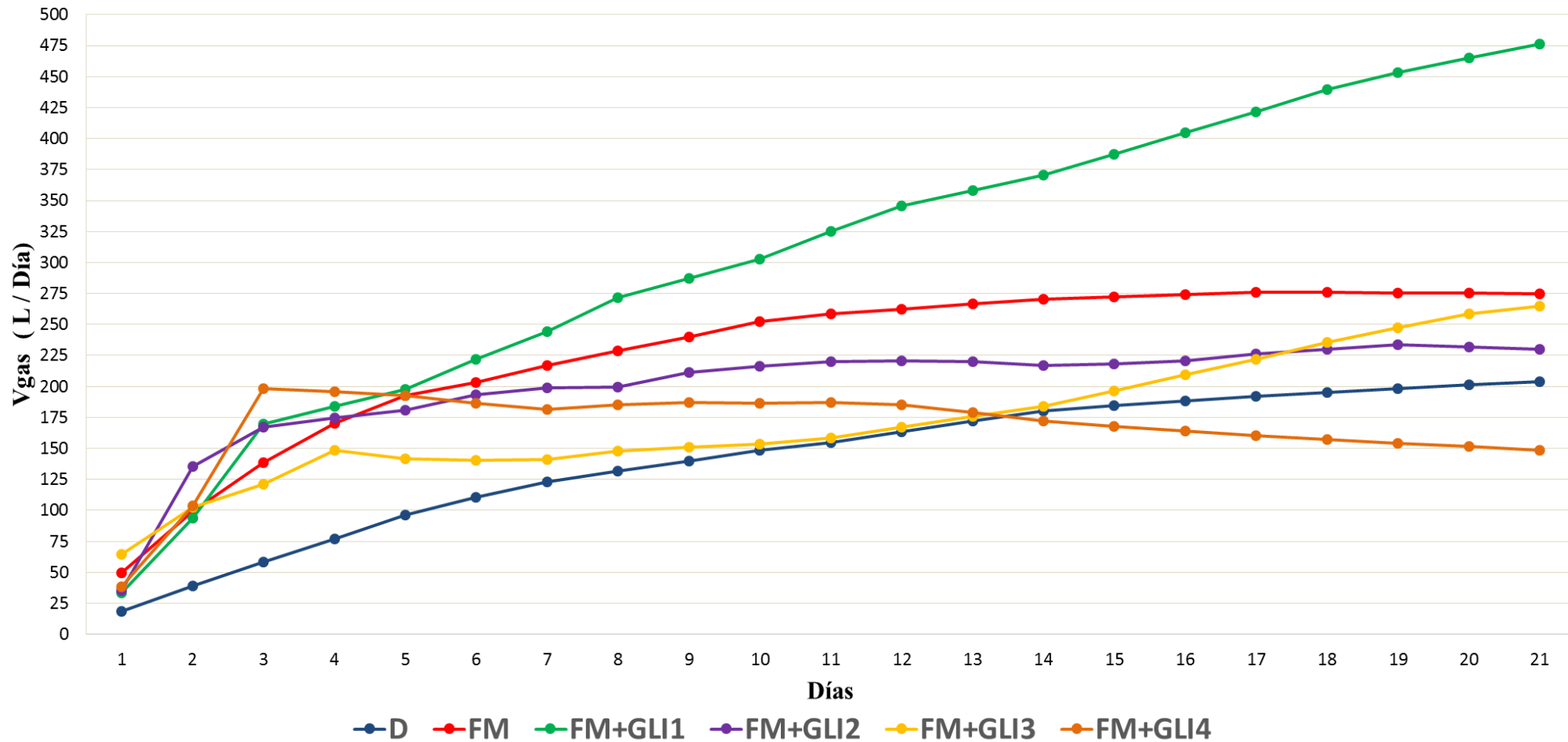


Figura 112: Gráfica de volumen diario de gas producido en las distintas mezclas estudiadas.

Una vez estudiada la gráfica 112, se puede concluir que solo la mezcla FM+GLI 1 genera una cantidad de biogás superior a la producida por el fango mixto de depuradora junto con el inóculo. El resto de las mezclas son inadecuadas para la estabilidad del proceso, resultando tóxicas para la biomasa bacteriana y generando una cantidad de biogás por debajo incluso de la producida por el inóculo en solitario.

Otro de los datos a tener en cuenta es la composición del gas generado. El biogás producido en el proceso anaerobio está formado en su mayoría por CO₂ y CH₄, pero puede estar formado por compuestos no deseados si no se desarrolla con normalidad. El biogás que se quiere obtener para aprovecharse como fuente de obtención de energía debe de estar formado por un 60% de metano y un 40% de dióxido de carbono aproximadamente. Para ver si el proceso se desarrolla con éxito y el biogás generado es el que se espera, se mide la composición del biogás durante el ensayo BMP.

La siguiente tabla muestra una media de la composición del gas producido por las distintas muestras analizadas durante los 21 días de ensayo.

Figura 113: Tabla de composición del gas medido.

	Composición en % del biogás medido	
	CH₄	CO₂
FM+ GLI 1	50	50
FM+ GLI 2	44	56
FM+ GLI 3	42	58
FM+ GLI 4	43	57

Tal y como puede verse en la tabla 113 los porcentajes de metano y dióxido de carbono mantienen una media buena en su composición, por lo que el biogás generado es el esperado y el proceso anaerobio se realiza correctamente.

Para finalizar se presenta en la tabla 114 otro de los parámetros relevantes en el control de la estabilidad del proceso anaerobio, el pH.

Figura 114: Tabla de medidas de pH.

	pH			
	FM+GLI 1	FM+GLI 2	FM+GLI 3	FM+GLI 4
Entrada BMP	7,8	7,6	7,8	7,2
Salida BMP	7,8	7,5	7	6,3

Se presentan los resultados a inicio de los análisis y a final de ellos, ya que este tipo de técnica no permite la apertura de los botes durante el análisis para la toma de datos. Este parámetro se mantiene dentro del rango esperado para el correcto funcionamiento del proceso anaerobio. En los casos donde la producción de gas decae se puede ver como el pH desciende del mismo modo, aunque no de forma apreciable, exceptuando la mezcla FM+GLI 4.

- ***Conclusión.***

Comparando los distintos resultados de los parámetros analizados en las distintas mezclas de glicerina, se concluye que la cantidad adecuada para adicionar en el digestor piloto semicontinuo de 7 litros es la proporcional a la mezcla FM+GLI 1, con 2,5 mL de glicerina por cada 48 mL de fango mixto de depuradora.

- ***Ensayo con glicerina final.***

Tras el estudio de la glicerina en BMP, se procede a estudiar su comportamiento en un digestor piloto de laboratorio de 7 litros de volumen. El residuo de glicerina se introduce directamente sin ningún tratamiento previo dada sus características de fluido. La cantidad para la alimentación viene definida por el estudio anterior de este residuo en la tecnología BMP.

El residuo de glicerina se comienza a introducir una vez se considera que el reactor está estable en óptimas condiciones de producción, con una alimentación de fango mixto. Una vez introducido el residuo, se estudia su efecto en el proceso anaerobio y la evolución de los parámetros analizados.

El objetivo de esta investigación es la incorporación de glicerina como residuo a un tratamiento de co-digestión anaerobia, sin la desestabilización del proceso y una producción extra de biogás que permita obtener energía eléctrica, reduciendo los costes energéticos.

- ***Discusión de resultados.***

Los primeros datos de la figura 115 representan el potencial de producción de gas que tiene el digestor en el proceso de co-digestión. En diversas columnas se exponen una media de los litros diarios que el digestor produce a la semana sin y con el residuo. En la última columna se representa el incremento o pérdida de biogás producido por el efecto del residuo añadido en el proceso anaerobio.

Los datos expuestos se expresan como la media de litros producidos por el digestor a la semana, para así realizar más fácilmente la comparación entre datos.

En un inicio tras el período de arranque y estabilización, la producción de gas generada con la adición de 0,020 L de glicerina supera en una proporción amplia, 31 % a la producida por el fango mixto en solitario. Este dato cambia a lo largo de las semanas, disminuyendo su producción de biogás de una manera rápida y progresiva.

En la semana tres la producción de gas comienza a situarse por debajo de la generada por el fango mixto, las semanas siguientes esta disminución en el gas generado se acentúa llegando a niveles de pérdida de casi el 80 %. Dados estos resultados puede concluirse que la adición de glicerina en este rango de alimentación resulta tóxica para el digester, no correspondiendo a los resultados obtenidos en el estudio BMP.

Figura 115: Tabla de datos del volumen de gas obtenido con glicerina.

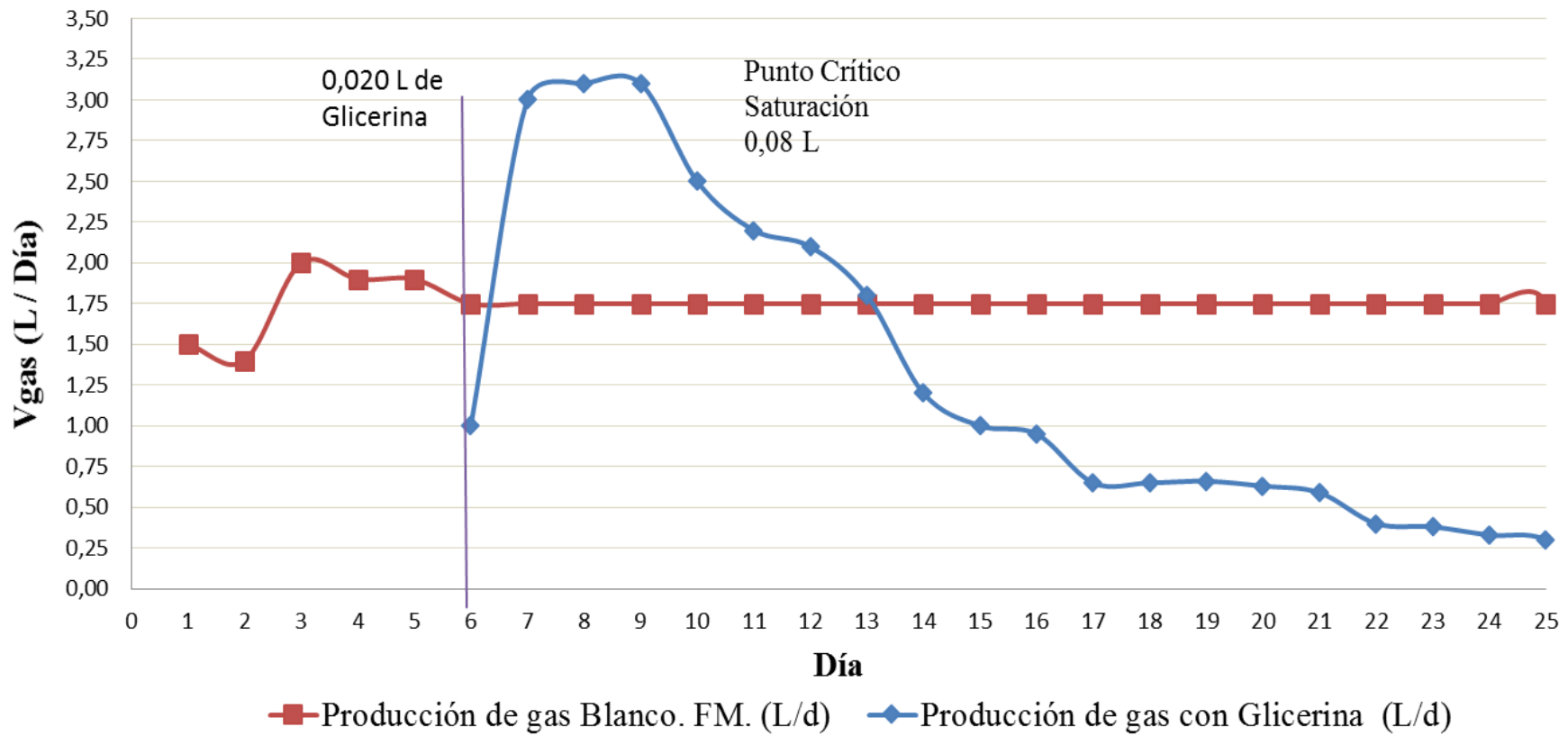
Volumen medio semanal de gas producido con y sin Glicerina					
Semanas	Alimentación (L)		Producción media (L) sin Glicerina	Producción media (L) con Glicerina	% de incremento de Biogás
	Fango mixto	Glicerina			
1	0,400		1,750		
2	0,400	0,020		2,540	31 %
3				1,660	-5 %
4				0,710	-59 %
5				0,400	-77 %

A continuación se representan los datos de la tabla anterior en dos gráficas distintas, la gráfica 116, donde vemos los litros de gas producidos diariamente por el digestor y la gráfica 117, representando los mismos datos pero en este caso a escala semanal. En ambas gráficas se representa con color azul el volumen de gas producido tras la adición del residuo y con color rojo la media de producción de gas sin residuo.

Una vez estabilizado el digestor tras el arranque, a partir del día 5 concretamente, se comienza a alimentar el digestor con el sustrato. La producción de gas comienza a ser superior a la medida con el fango mixto con un margen amplio del 31 %. En la tercera semana de ensayo la producción de gas cae rápidamente, disminuyendo progresivamente hasta llegar a valores de 0,4 L. Dados estos resultados se para la investigación, concluyendo la no viabilidad de la glicerina en el proceso anaerobio con este régimen de alimentación.

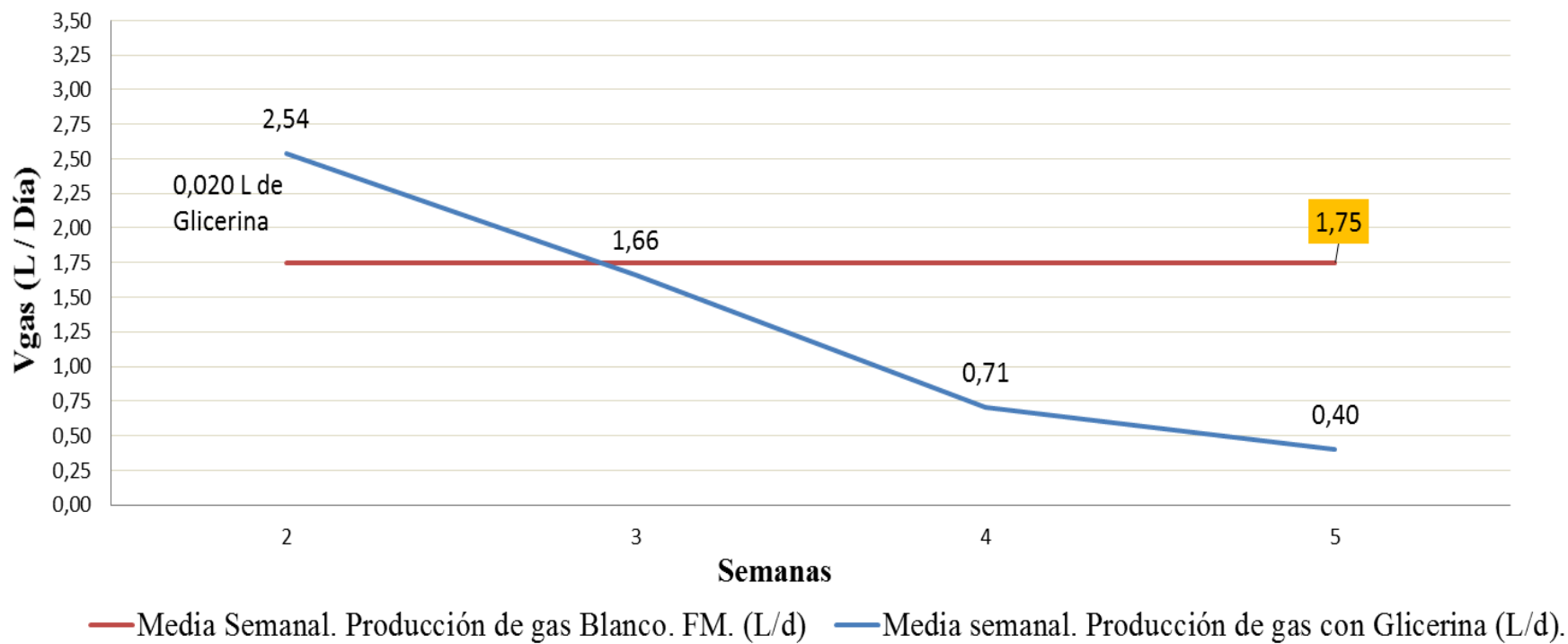
La rápida disminución en la producción de biogás puede verse más claramente en la gráfica 117, que representa el volumen de gas producido por semanas, donde las columnas indican que la producción semanal de biogás, con respecto al biogás producido por el fango mixto representado por la línea roja, es muy superior en la primera semana, pero muy inferior en las restantes.

VOLUMEN DE GAS DIARIO CON Y SIN GLICERINA



Figuras 116: Gráfica diaria de la producción de gas obtenida en el proceso con glicerina.

VOLUMEN DE GAS MEDIO SEMANAL CON Y SIN GLICERINA



Figuras 117: Gráfica semanal de la producción de gas obtenida en el proceso con glicerina.

Se analiza ahora el desarrollo del proceso anaerobio con la glicerina, para ello se observa la estabilidad de los distintos parámetros analizados. El análisis de estos parámetros indica si el residuo es tóxico o no degradable para la población bacteriana, lo que sugiere un estudio posterior.

Con respecto a la DQO, se comparan los datos de entrada, salida y eliminación de materia orgánica. Estos datos son los representados en las figuras 118, 119, 120 y 121. En la tabla 118, se exponen los datos de DQO de la alimentación del digestor y de la muestra sacada para el análisis en mg litro, y el rendimiento de eliminación en porcentaje. El porcentaje de rendimiento de eliminación de materia orgánica se ha calculado por diferencia entre la DQO de entrada y la de salida dividido por la DQO de entrada, todo ello multiplicado por cien.

En las gráficas 119, 120 y 121 se representan los datos de la tabla 118 a escala diaria y semanal. En color rojo puede verse la DQO de la alimentación, con una media de DQO de entrada de 30.500 mg/L. En color azul se representa la DQO de la muestra de digestor analizada, con una media de DQO de salida de 17.500 mg/L. En color verde se presenta el porcentaje de eliminación de DQO en el proceso anaerobio. Los datos obtenidos indican la dificultad de degradación de este residuo, obteniendo un promedio de eficiencia de eliminación de 45 %. A mayor porcentaje de eliminación mayor biodegradabilidad del sustrato y por tanto mayor eficiencia del proceso. Un dato que sugiere continuar estudiando este residuo es el aumento de la eliminación de DQO a lo largo de las semanas, la población bacteriana si degrada el sustrato pero les resulta difícil y deben de adaptarse primero a las condiciones que éste aporta al medio. En la gráfica 121 vemos el biogás producido junto con el porcentaje de eliminación de DQO, mientras el biogás producido disminuye el porcentaje de eliminación de DQO aumenta, las bacterias si degradan el residuo pero no lo transforman en biogás.

Figura 118: Tabla con los datos de DQO obtenidos en el proceso con glicerina.

Semanas	DQO Salida (mg/L)	DQO Entrada (mg/L)	% Eliminación DQO
1	20.684 ± 0,7	37.750 ± 0,8	45 %
2	18.044 ± 0,7	27.181 ± 0,8	34 %
3	20.520 ± 0,7	30.659 ± 0,8	33 %
4	19.941 ± 0,7	32.420 ± 0,8	39 %
5	15.847 ± 0,7	31.950 ± 0,8	50 %
6	10.349 ± 0,7	30.201 ± 0,8	67 %

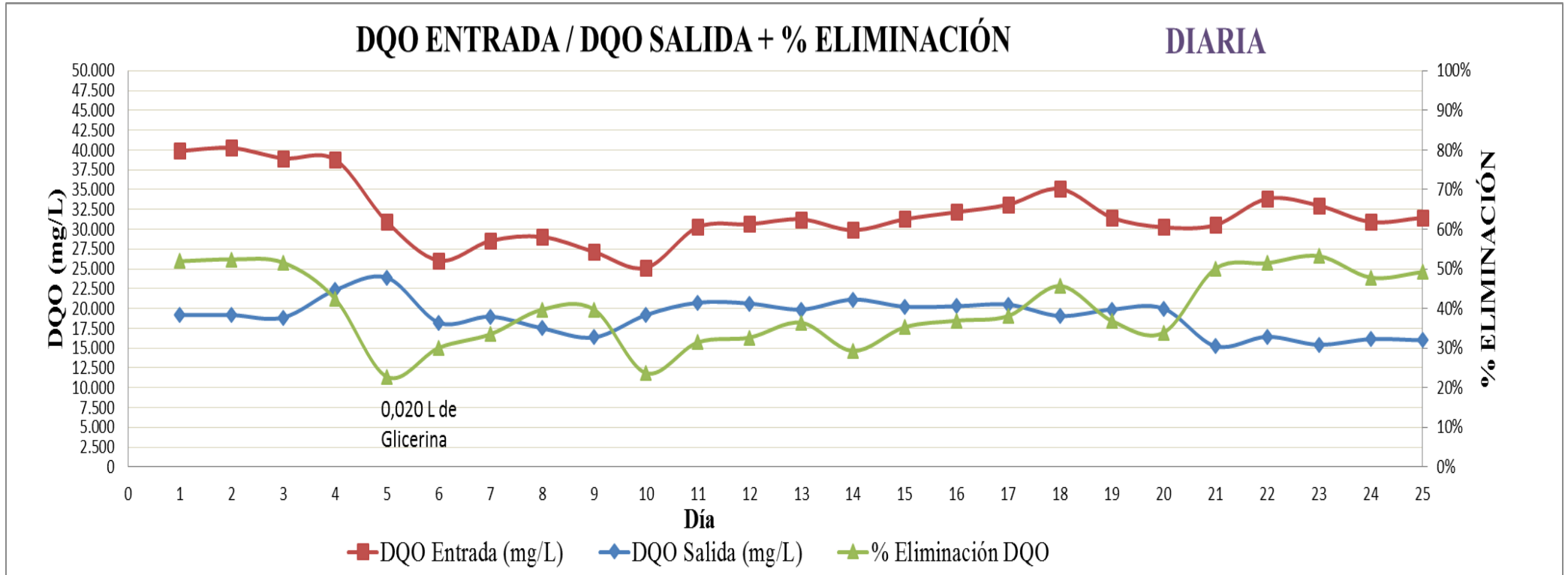


Figura 119: Gráfica de datos diarios de la DQO obtenida en el proceso con glicerina.

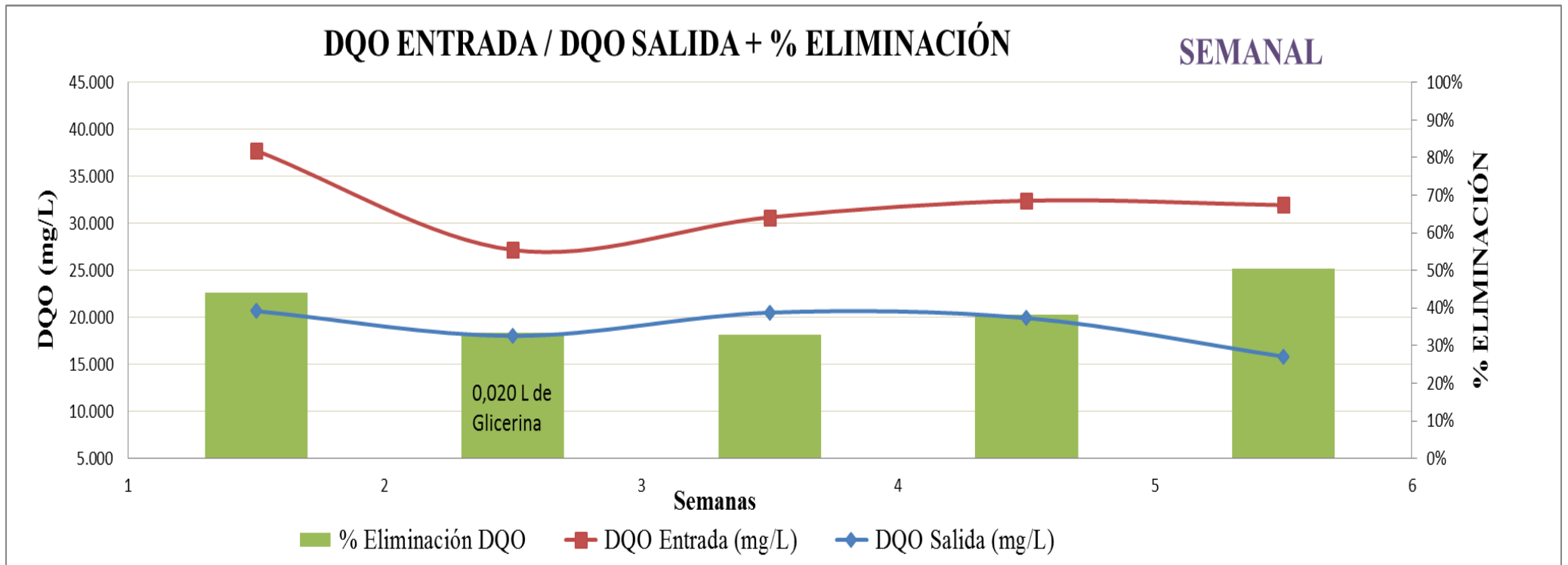


Figura 120: Gráfica de datos semanales de la DQO obtenida en el proceso con glicerina.

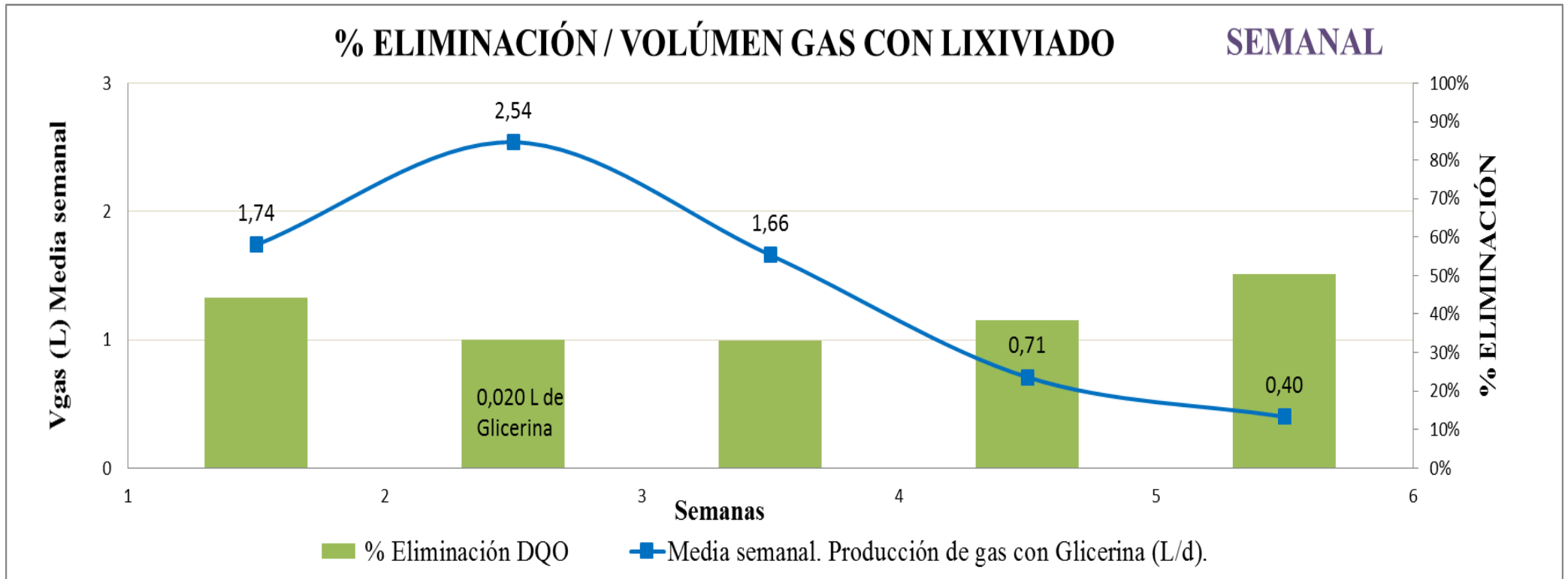


Figura 121: Gráfica de datos semanales de la eliminación de DQO y volumen gas obtenidos en el proceso con glicerina.

Un parámetro esencial en el proceso de digestión anaerobia es la cantidad de microorganismos que existen en el digestor, representados por el porcentaje de materia volátil medido.

En la figura 122 se exponen los datos de materia volátil (MV) medidos en este ensayo. Se presentan los datos de materia volátil en la alimentación y en la salida del digestor. La diferencia entre ambas dividida entre la materia volátil en la alimentación, multiplicada por cien, indica el porcentaje de materia volátil eliminada.

El porcentaje de materia volátil es calculado por la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos volátiles medidos en las muestras de ensayo, todo ello multiplicado por cien.

En las figuras 123 y 124 pueden verse los datos de la tabla 122 gráficamente, tanto a escala diaria como semanal. En ambas gráficas se presenta en rojo la materia volátil referente a la alimentación, con una media de 58 %. En color azul se presenta la materia volátil correspondiente a la muestra de digestor analizada, con una media de 45 %. En color verde se presenta el porcentaje de eliminación de materia volátil. En la gráfica 124 se representa el biogás generado con una línea azul. La eliminación de materia volátil con la glicerina como residuo varía en el transcurso del ensayo. En las cuatro primeras semanas de ensayo la eliminación de materia volátil va aumentando progresivamente acorde se va alimentando el digestor con glicerina. En las primeras semanas cuando la producción de gas es positiva, la eliminación de materia es menor, 20 %, a diferencia de la semana cuatro donde aumenta considerablemente, 32 % junto con la caída en la producción de biogás. Las semanas cinco y seis la materia volátil eliminada baja muy significativamente, 18 %, aunque la producción de gas no aumenta. Estos resultados sugieren que el residuo si es degradable, pero la población bacteriana necesita un periodo de adaptación al sustrato de alimentación.

Figura 122: Tabla de datos de materia volátil obtenida en el proceso con glicerina.

% MV y % de eliminación MV			
Semanas	MV Entrada	MV Salida	% eliminación MV
1	75 % ± 1	60 % ± 1	19 %
2	65 % ± 1	50 % ± 1	23 %
3	63 % ± 1	47 % ± 1	25 %
4	54 % ± 1	37 % ± 1	32 %
5	54 % ± 1	44 % ± 1	18 %
6	54 % ± 1	45 % ± 1	17 %

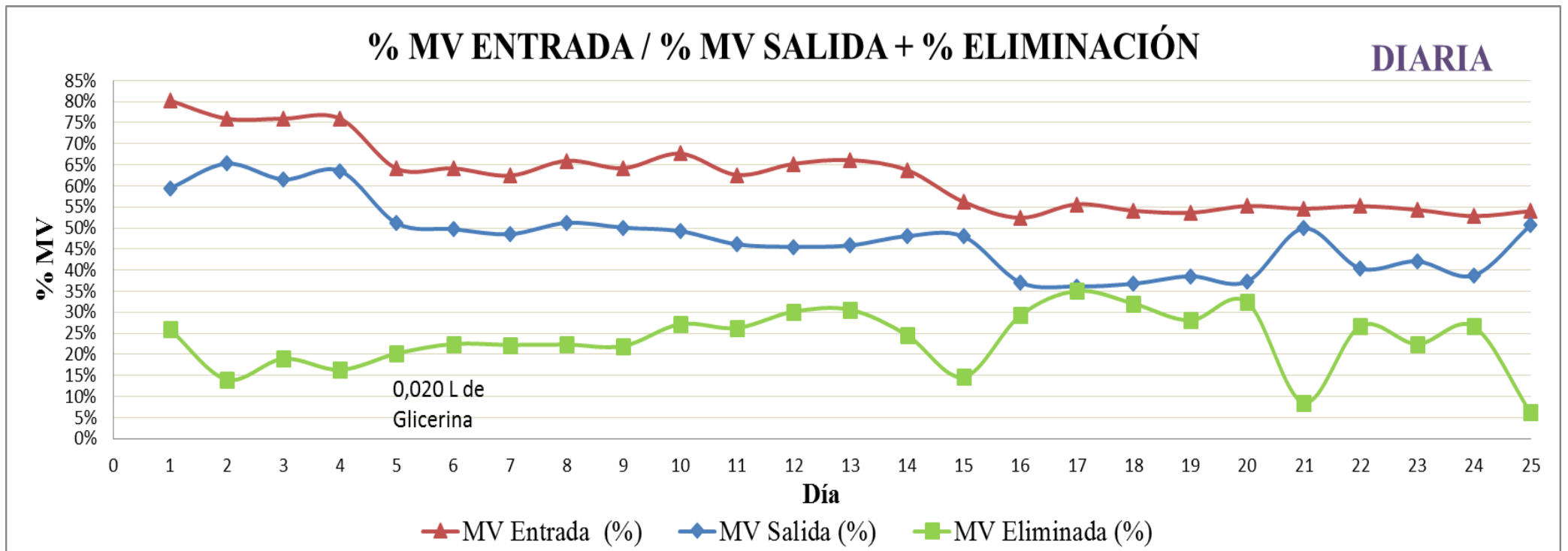


Figura 123: Gráfica de los datos diarios de materia volátil obtenida en el proceso con glicerina.

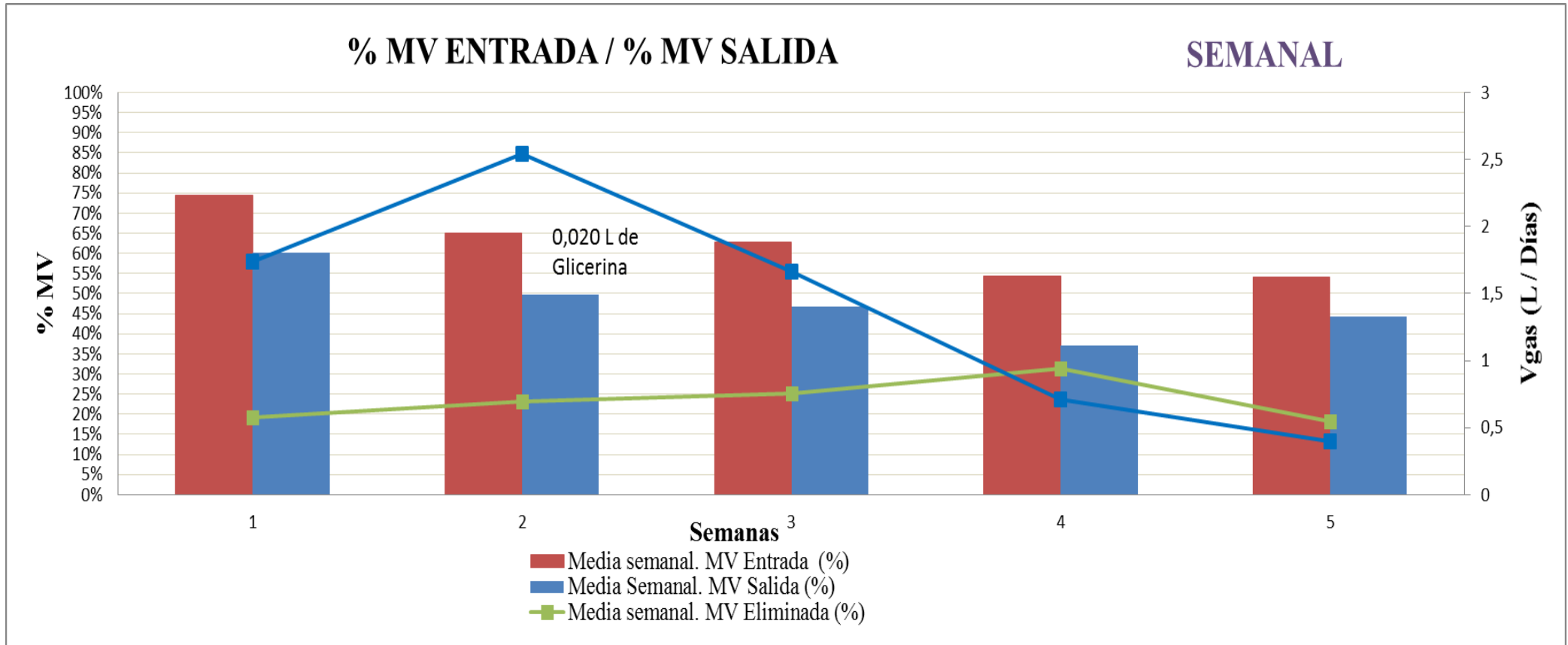


Figura 124: Datos semanales de la materia volátil obtenida en el proceso con glicerina.

Se describen ahora dos de los parámetros fundamentales para la estabilidad del proceso, la producción de ácidos grasos volátiles y la alcalinidad.

La figura 125 recoge las medias semanales de los datos diarios recogidos en el proceso, donde puede verse que el digestor en estudio cuenta con una buena capacidad tampón, siempre por dentro del rango de estabilidad marcado. En esta tabla se observa que la cantidad de AGV y alcalinidad medida en mg/l de CaCo₃ se mantienen estables durante todo el proceso, en 2.200 mg/L y 600 mg/L respectivamente.

En las figuras 126 y 127 se representan gráficamente los datos de la tabla anterior, tanto a escala diaria como a escala semanal. En ambas gráficas se presentan en morado los datos de alcalinidad y en naranja los de AGV. En la gráfica 127 se representa el volumen de biogás generado con una línea azul. En estas gráficas se observa la tendencia seguida por el digestor con parámetros anteriores, en un inicio los AGV acumulados son degradados hasta metano y dióxido de carbono, posteriormente éstos aumentan al no poder ser degradados por la población bacteriana y en el final del ensayo vuelven a disminuir, indicando de nuevo su degradación hasta el biogás final. El trazado visto en las gráficas es un poco inestable, pero se mantiene en todo momento dentro del rango de estabilidad marcado.

Figura 125: Tabla de datos de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con glicerina.

Semanas	Media Semanal. ALCALINIDAD (mg/l)	Media Semanal. ACIDEZ (mg/l) (CaCO₃)
1	4.789 ± 1,1	634 ± 0,9
2	2.612 ± 1,1	298 ± 0,9
3	2.509 ± 1,1	296 ± 0,9
4	2.444 ± 1,1	485 ± 0,9
5	2.070 ± 1,1	240 ± 0,9
6	1.936 ± 1,1	253 ± 0,9

AGV / ALCALINIDAD

DIARIA

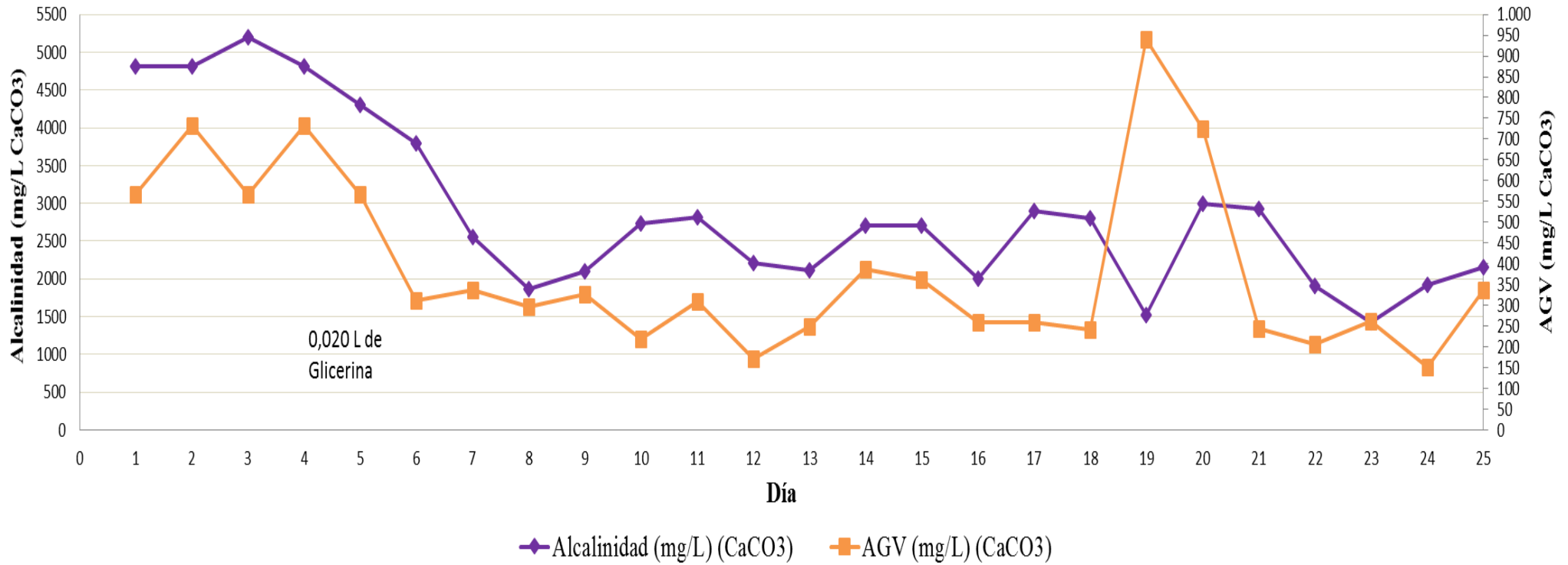


Figura 126: Gráfica de los datos diarios de la alcalinidad y la acidez medida en el proceso con glicerina.

RELACIÓN AGV / ALCALINIDAD

SEMANAL

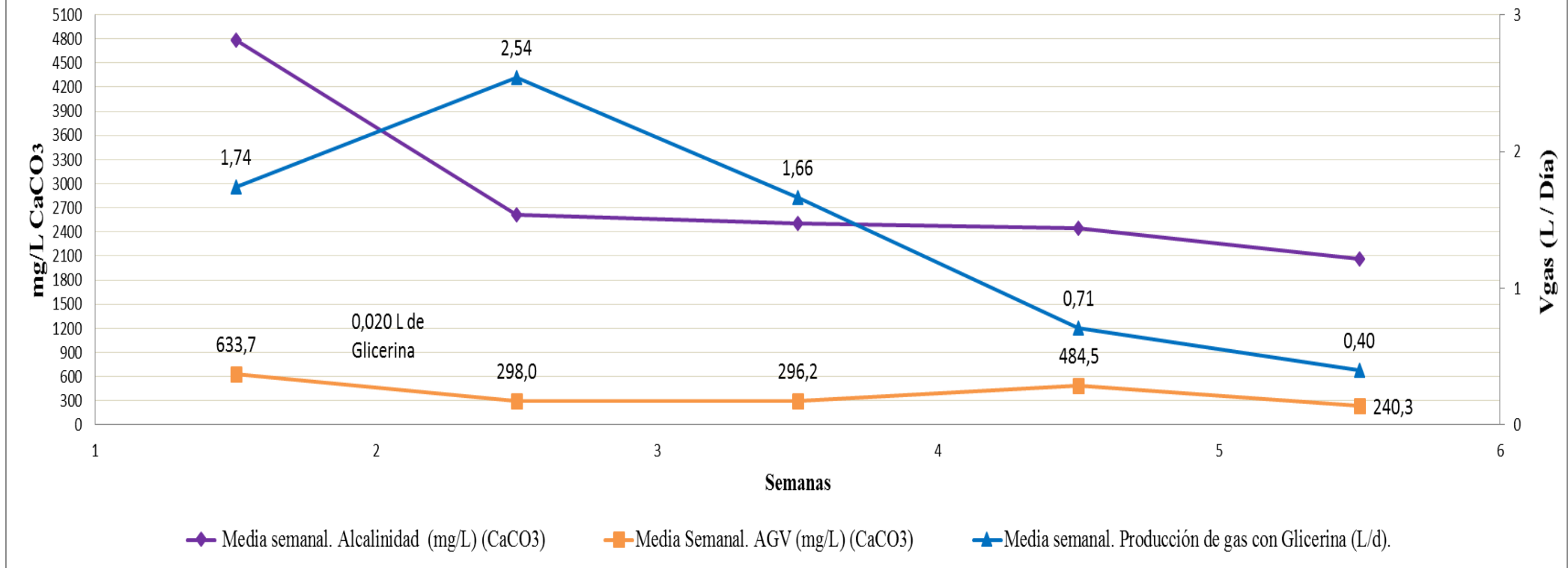


Figura 127: Gráfica de los datos semanales de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con glicerina.

El ratio AGV/ Alcalinidad debe de estar dentro del rango establecido por su relación (0,1-0,4) para asegurar la estabilidad del proceso, cualquier variación en este rango supone un desequilibrio en el sistema. Otro parámetro muy importante para controlar la estabilidad del digestor es el pH. En la figura 128, se presenta la media de los datos de pH semanales junto con el ratio AGV/ Alcalinidad.

Los datos de pH y el ratio AGV/ Alcalinidad se han mantenido estables, esta estabilidad indica un desarrollo exitoso del proceso anaerobio, que con una optimización en la alimentación puede generar una producción extra de biogás.

En las figuras 129, 130 y 131 pueden verse los trazados de pH, ratio AGV/ Alcalinidad y biogás generado. Puede verse claramente la estabilidad en los valores de pH y ratio AGV/ Alcalinidad que indican el buen funcionamiento del digestor y del proceso anaerobio.

Figura 128: Tabla de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con glicerina.

Semana	Media Semana. PH (Digestor)	Ratio
1	7,9 ± 0,01	0,13
2	7,8 ± 0,01	0,11
3	8,1 ± 0,01	0,12
4	7,3 ± 0,01	0,19
5	8,5 ± 0,01	0,11
6	7,3 ± 0,01	0,13

RELACION ACIDEZ/ALCALINIDAD + pH

SEMANAL

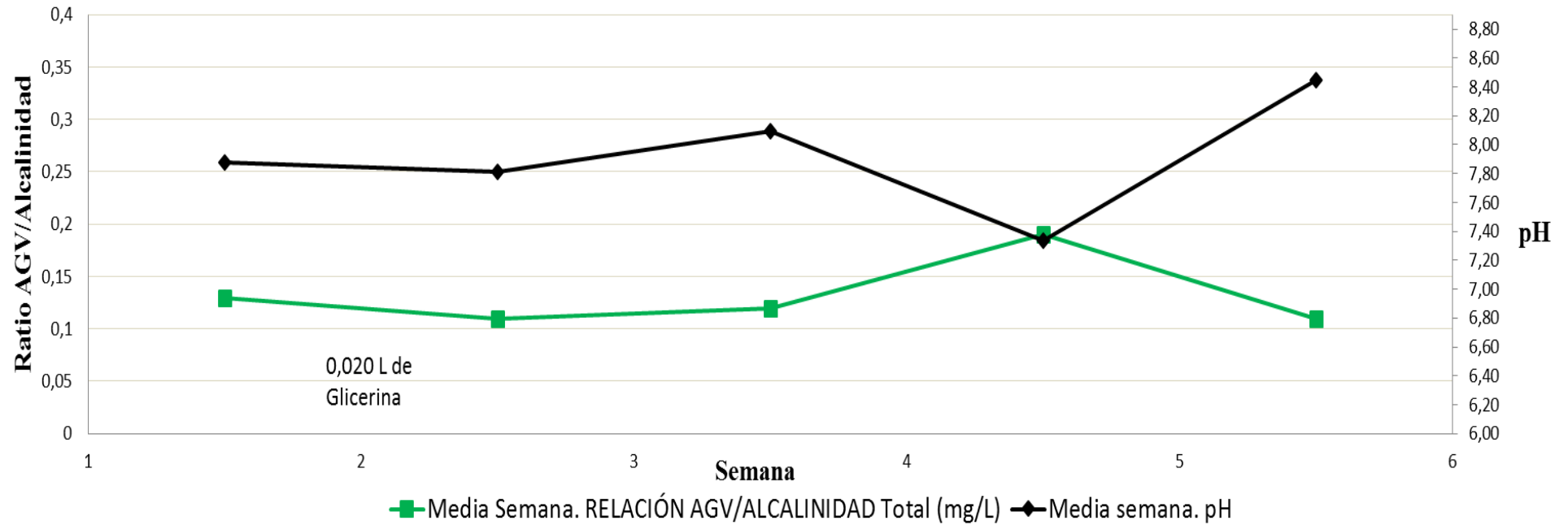


Figura 129: Gráfica de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con glicerina.

RELACION ACIDEZ/ALCALINIDAD + Vgas

SEMANAL

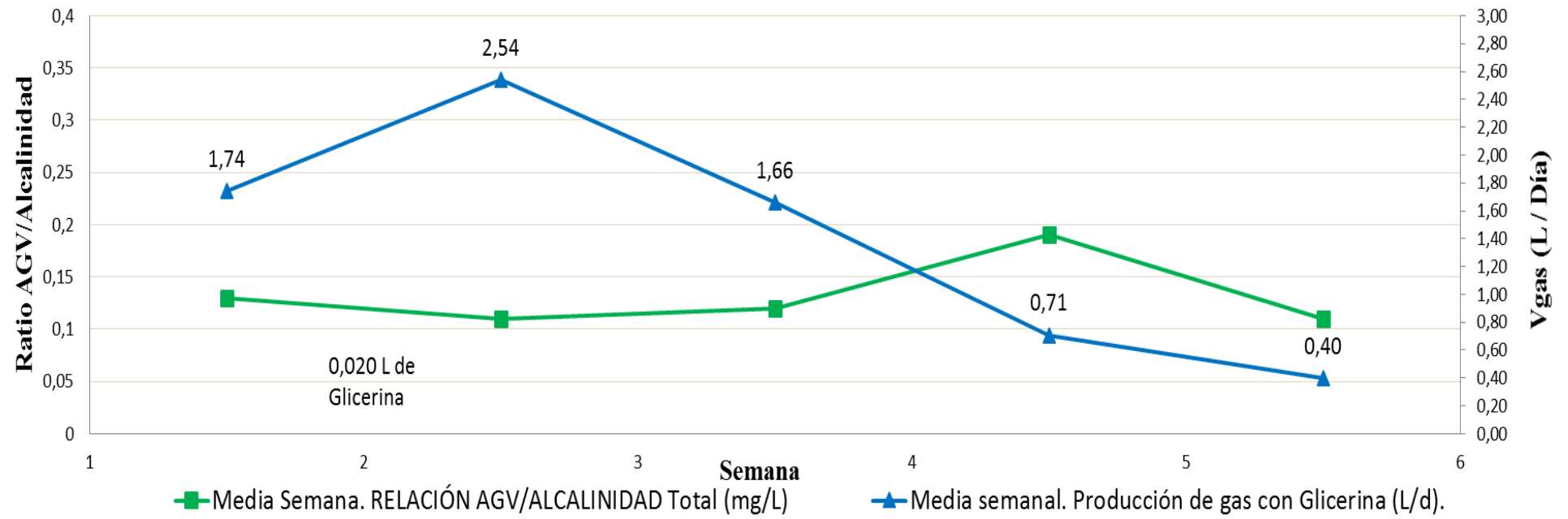


Figura 130: Gráfica de datos semanales de ratio AGV/ Alcalinidad y volumen gas medidos en el proceso con glicerina.

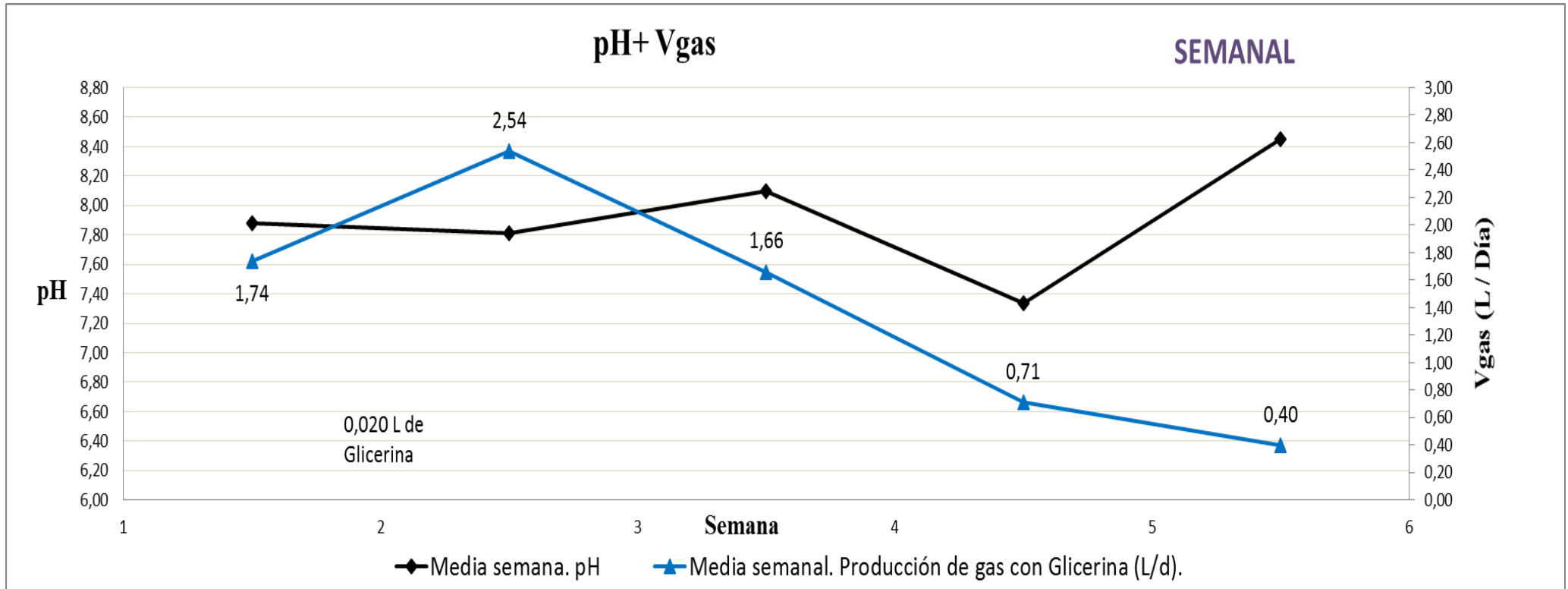


Figura 131: Gráfica de datos semanales de ratio pH y volumen gas medidos en el proceso con glicerina.

- ***Conclusiones.***

En este apartado se presentan las conclusiones obtenidas en base a los resultados y a las consideraciones anteriormente explicadas.

- El proceso de co-digestión anaerobia con adiciones de glicerina de 0,020 L no es viable, pero los datos obtenidos sugieren un potencial energético de este residuo adicionado en cantidades adecuadas. Por ello, se propone una investigación con otras alimentaciones de este residuo que consigan su viabilidad en el proceso anaerobio y genere beneficios energéticos, resultando una alternativa para su gestión como residuo peligroso.

- La producción de biogás decae durante el proceso anaerobio, pero los diferentes parámetros indicadores del funcionamiento del sistema, se mantienen dentro de los rangos de actividad exigidos. Además la eliminación de materia volátil disminuye considerablemente en las semanas finales de ensayo, esto junto a la mejoría en la capacidad de eliminación de DQO concluye que la adición de glicerina como co-sustrato en la digestión anaerobia puede ser viable en concentraciones adecuadas, ya que la población bacteriana si degrada el residuo, pero de forma lenta, y con un periodo de adaptación necesario para degradarlo.

3.5 Ensayo con Lactosuero.

Tras los resultados obtenidos con la glicerina como residuo para el proceso de co-digestión anaerobia, que sugieren seguir investigando con el residuo hasta encontrar la cantidad óptima en su alimentación que proporcione una estabilidad en el proceso, la investigación da un giro en sus objetivos. Con el digestor en condiciones ácidas, una producción de gas casi nula e inestable en sus parámetros de control, se estudia su recuperación a condiciones normales de proceso a través de la alimentación con otro residuo. Los datos mostrados en la tesis de Carlos Benito (2016), indican que una mezcla de residuos puede funcionar de forma conjunta neutralizando los inconvenientes que tienen algunos de ellos y potenciando los beneficios existentes. Este estudio en digestores de una sola etapa quiere demostrarse en digestores piloto de laboratorio a escala mayor. El residuo seleccionado para el ensayo es el lactosuero. Un residuo procedente de la industria láctea, el cual posee unas características ácidas que lo hacen difícil de gestionar como residuo. Su potencial como residuo viable en una codigestión anaerobia reside en un tiempo de adaptación a las condiciones anaerobias casi inexistente. Esta cualidad hace a este residuo idóneo para recuperar y estabilizar digestores en mal funcionamiento, evitando así su acidificación y vaciado, con el ahorro económico que supone estos costes. Esta es la hipótesis que se quiere confirmar con este ensayo, por lo que se aprovecha el estado no funcional en el que se encuentra el digestor para comenzar directamente la investigación.

El residuo de lactosuero se introduce directamente sin ningún tratamiento previo dada sus características de fluido. Una vez introducido el residuo, se estudia su efecto en el proceso anaerobio y la evolución de los parámetros analizados.

- ***Discusión de resultados.***

Es necesario saber el estado en el que se encuentra el digestor, por ello, se incluye en las distintas tablas los datos finales con los que el digestor acaba el ensayo realizado con la glicerina como residuo.

Los primeros datos de la figura 132 representan el potencial de producción de gas que tiene el digestor en el proceso de co-digestión. En diversas columnas se exponen una media de los litros diarios que el digestor produce a la semana sin y con el residuo. En la última columna se representa el incremento o pérdida de biogás producido por el efecto del residuo añadido en el proceso anaerobio.

Los datos expuestos se expresan como la media de litros producidos por el digestor a la semana, para así realizar más fácilmente la comparación entre datos.

Se incluye en la tabla la producción media de biogás producida por el fango mixto en solitario en ensayos anteriores, como base comparativa de este estudio. Las semanas uno y dos corresponden a las semanas finales del digestor en el estudio de la glicerina como residuo, las semanas tres, cuatro y cinco el digestor es alimentado con una mezcla con 0,240 L de lactosuero. Con la alimentación de lactosuero el digestor recupera progresivamente la producción de biogás llegando a producir un extra de gas del 58 % en la semana cinco.

Dados estos resultados puede concluirse que la adición de lactosuero en este rango de alimentación resulta muy positiva para el digestor, recuperando su estabilidad y generando una producción extra de biogás, demostrando así la capacidad de este residuo como estabilizador del proceso anaerobio, tal y como se preveía en otros estudios.

Figura 132: Tabla de datos del volumen de gas obtenido con lactosuero.

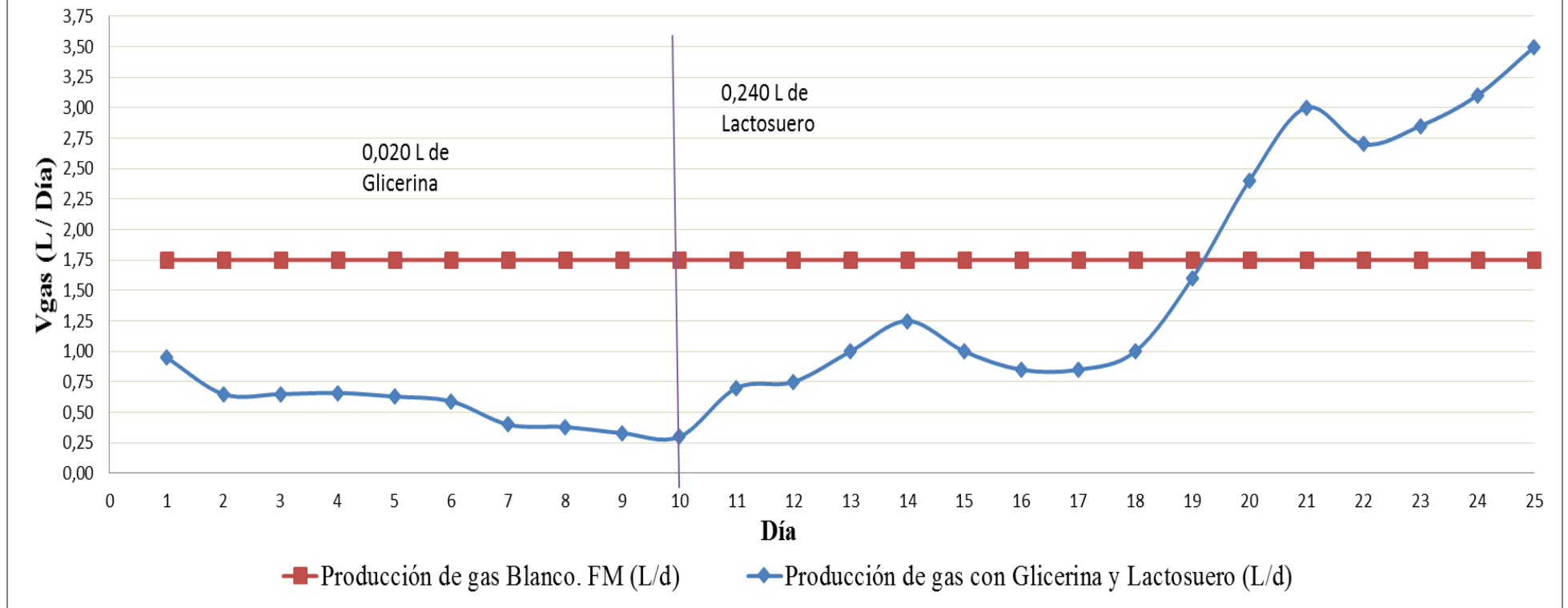
Volumen medio semanal de gas producido con y sin Lactosuero						
Semanas	Alimentación (L)			Producción media (L) sin Glicerina	Producción media (L) con Glicerina	% de incremento de Biogás
	Fango mixto	Glicerina	Lactosuero			
0	0,400			1,750		
1	0,400	0,020			0,71	-50 %
2					0,4	-77 %
3	0,400		0,240		0,94	-46 %
4					1,35	-23 %
5					3	58 %

A continuación se representan los datos de la tabla anterior en dos gráficas distintas, la gráfica 133 donde vemos los litros de gas producidos diariamente por el digestor y la gráfica 134, representando los mismos datos pero en este caso a escala semanal. En ambas gráficas se representa con color azul el volumen de gas producido tras la adición del residuo y con color rojo la media de producción de gas sin residuo.

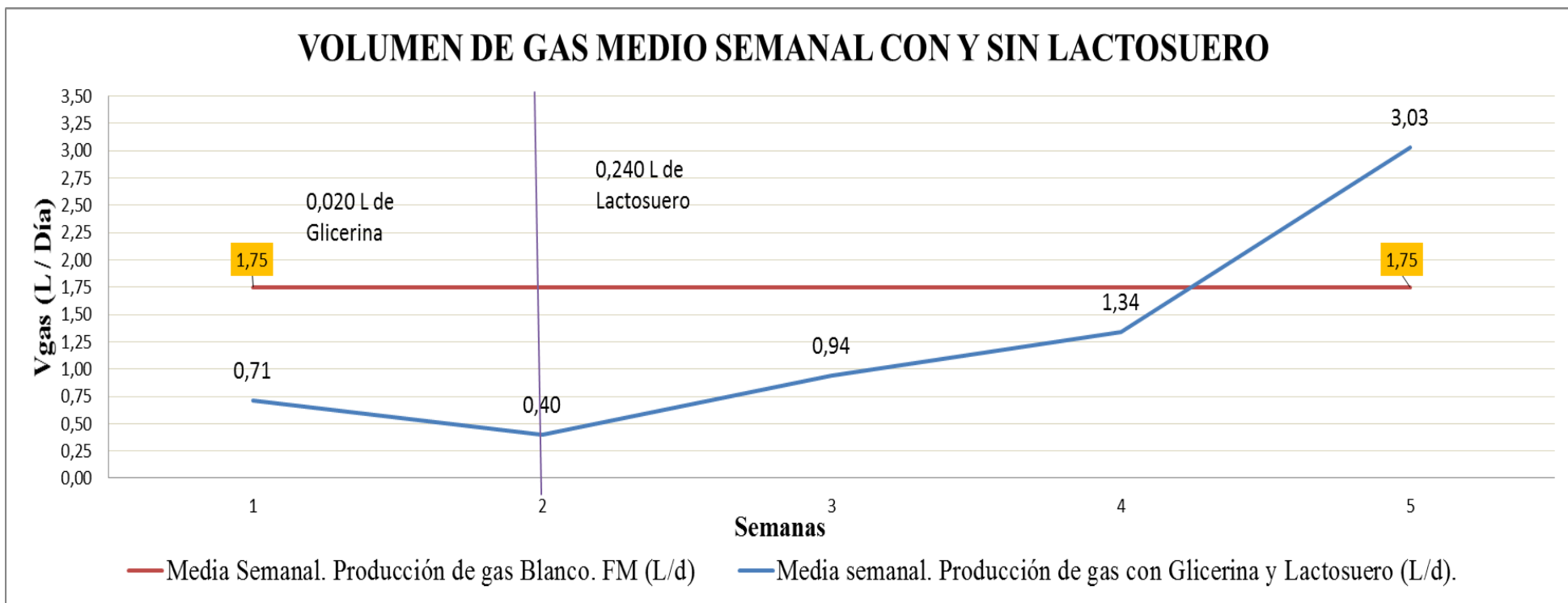
Partiendo de las malas condiciones de funcionamiento en las que la glicerina deja el digestor, se comienza a añadir el lactosuero, concretamente a partir del día 10. La producción de gas comienza a aumentar progresivamente, con ciertos altibajos hasta igualar el biogás producido por el fango mixto en condiciones óptimas de operación en el día 20 de ensayo. A partir de este día la producción de gas aumenta hasta valores cercanos al 60 % de producción extra de biogás. Dados estos resultados se para la investigación, concluyendo la viabilidad del lactosuero como residuo estabilizador de digestores no operativos.

La gráfica 134 representa el volumen de gas producido por semanas, donde las columnas indican la producción semanal de biogás, mostrando la gran diferencia existente entre el volumen generado por una alimentación de glicerina y una alimentación de lactosuero. Como base comparativa se expone el biogás producido por el fango mixto en solitario, representado por la línea roja.

VOLUMEN DE GAS DIARIO CON Y SIN LACTOSUERO



Figuras 133: Gráfica diaria de la producción de gas obtenida en el proceso lactosuero.



Figuras 134: Gráfica semanal de la producción de gas obtenida en el proceso con lactosuero.

Se analiza ahora el desarrollo del proceso anaerobio con el lactosuero, para ello se observa el comportamiento de los distintos parámetros analizados. El análisis de estos parámetros confirma el buen funcionamiento del digestor y por tanto del proceso anaerobio.

Con respecto a la DQO, se comparan los datos de entrada, salida y eliminación de materia orgánica. Estos datos son los representados en las figuras 135, 136, 137 y 138. En la tabla 135, se exponen los datos de DQO de la alimentación del digestor y de la muestra sacada para el análisis en mg litro, y el rendimiento de eliminación en porcentaje. El porcentaje de rendimiento de eliminación de materia orgánica se ha calculado por diferencia entre la DQO de entrada y la de salida dividido por la DQO de entrada, todo ello multiplicado por cien.

En las gráficas 136 y 137 se representan los datos de la tabla 135 a escala diaria y semanal. En color rojo puede verse la DQO de la alimentación, con una media de DQO de entrada de 31.200 mg/L. En color azul se representa la DQO de la muestra de digestor analizada, con una media de DQO de salida de 13.700 mg/L. En color verde se presenta el porcentaje de eliminación de DQO en el proceso anaerobio. Los datos obtenidos indican la estabilidad en la degradación de este residuo, obteniendo un promedio de eficiencia de eliminación de 56 %. A mayor porcentaje de eliminación mayor biodegradabilidad del sustrato y por tanto mayor eficiencia del proceso. La adición del lactosuero mejora el porcentaje de eliminación de DQO con respecto al obtenido anteriormente con la glicerina. En la gráfica 138 se comparan los datos eliminación de DQO junto con el biogás producido. Se puede ver como el lactosuero aumenta la producción de biogás y estabiliza la eliminación de DQO.

Figura 135: Tabla con los datos de DQO obtenidos en el proceso con lactosuero.

Semanas	DQO Entrada (mg/l)	DQO Salida (mg/l)	% eliminación DQO
1	31.950 ± 0,7	15.847 ± 0,8	50 %
2	30.201 ± 0,7	10.349 ± 0,8	66 %
3	30.987 ± 0,7	13.995 ± 0,8	55 %
4	31.970 ± 0,7	14.390 ± 0,8	55 %
5	30.778 ± 0,7	13.845 ± 0,8	55 %

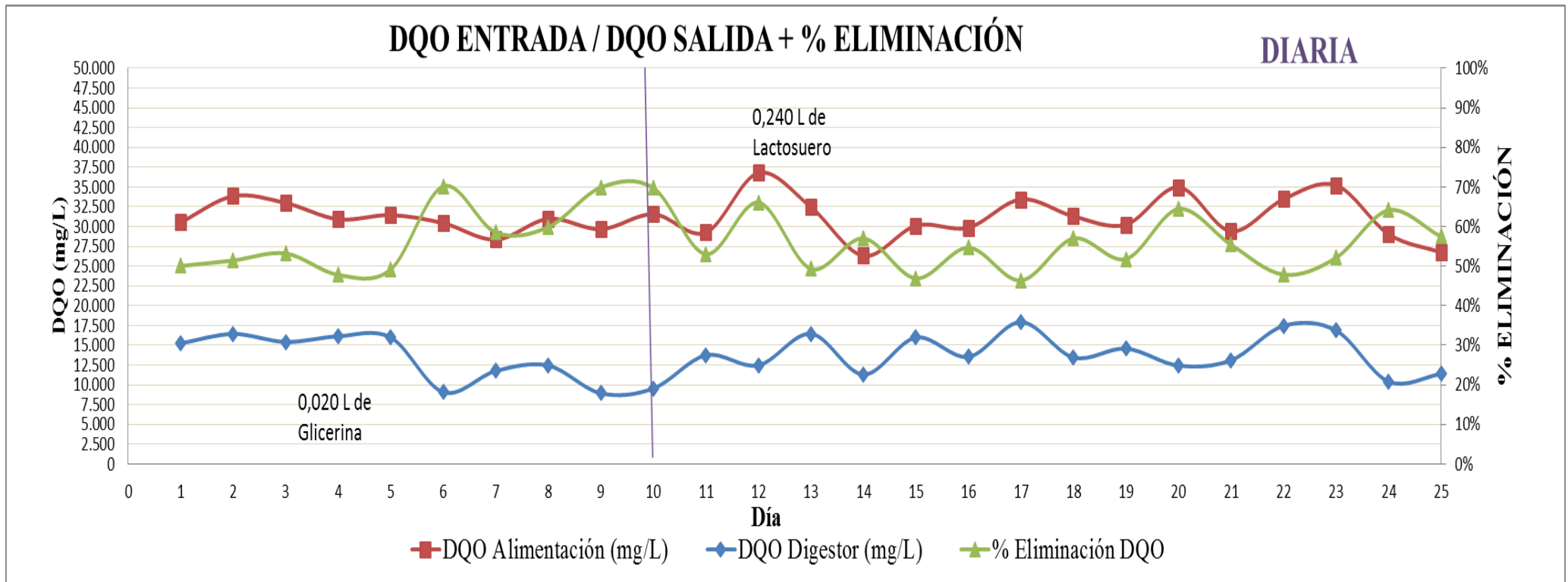


Figura 136: Gráfica de datos diarios de la DQO obtenida en el proceso con lactosuero.

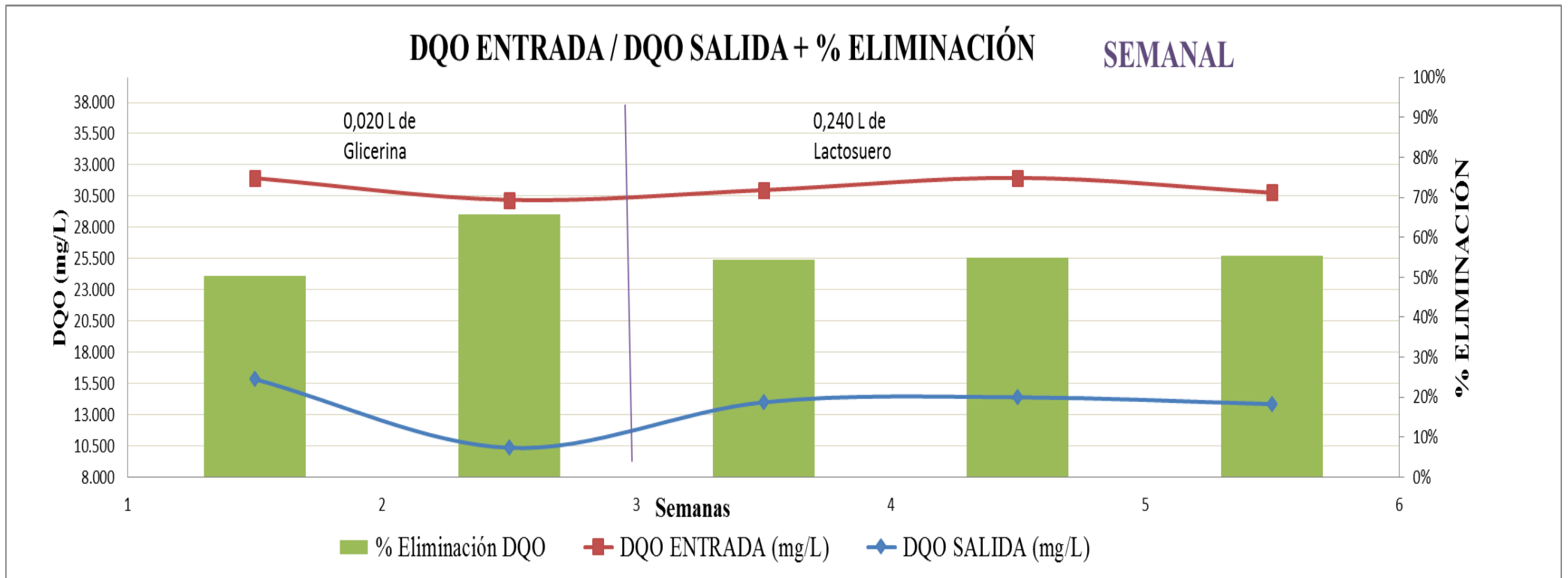


Figura 137: Gráfica de datos semanales de la DQO obtenida en el proceso con lactosuero.

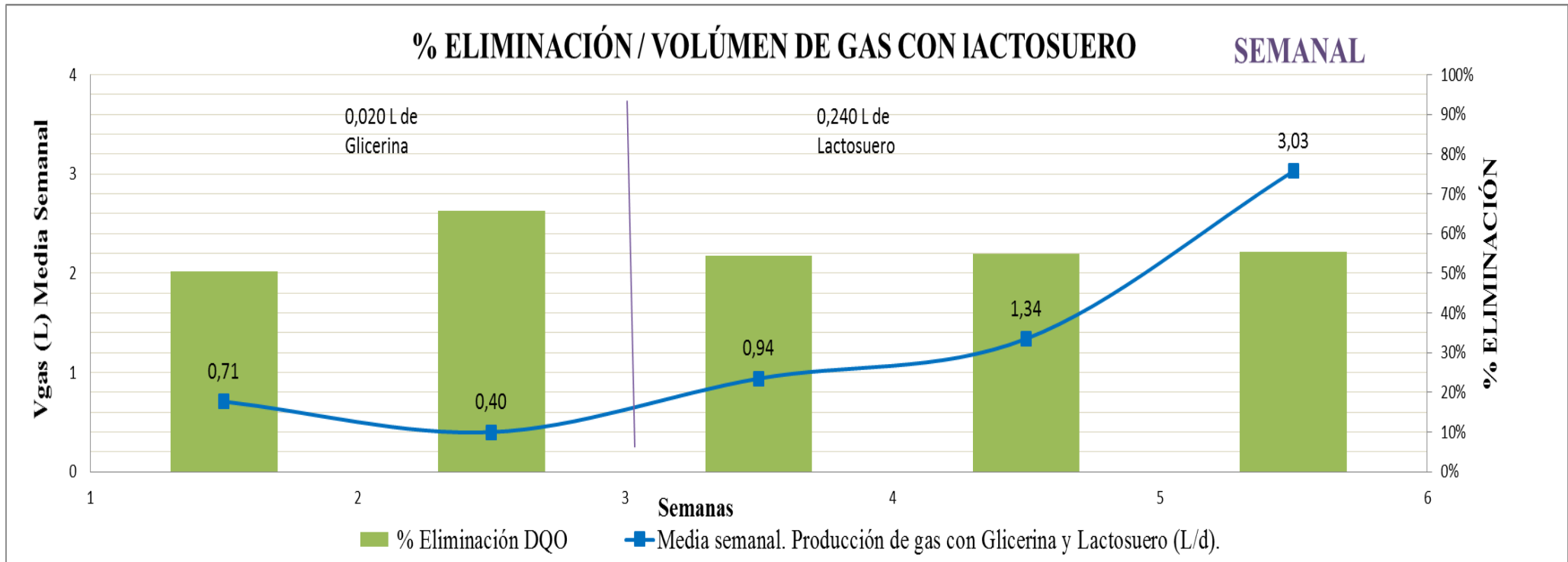


Figura 138: Gráfica de datos semanales de la eliminación de DQO y volumen gas obtenidos en el proceso con lactosuero.

Un parámetro esencial en el proceso de digestión anaerobia es la cantidad de microorganismos que existen en el digestor, representados por el porcentaje de materia volátil medido.

En la figura 139 se exponen los datos de materia volátil (MV) medidos en este ensayo. Se presentan los datos de materia volátil en la alimentación y en la salida del digestor. La diferencia entre ambas dividida entre la materia volátil en la alimentación, multiplicada por cien, indica el porcentaje de materia volátil eliminada.

El porcentaje de materia volátil es calculado por la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos volátiles medidos en las muestras de ensayo, todo ello multiplicado por cien.

En las figuras 140 y 141 pueden verse los datos de la tabla 139 gráficamente, tanto a escala diaria como semanal. En ambas gráficas se presenta en rojo la materia volátil referente a la alimentación, con una media de 55 %. En color azul se presenta la materia volátil correspondiente a la muestra de digestor analizada, con una media de 44 %. En color verde se presenta el porcentaje de eliminación de materia volátil. La eliminación de materia volátil con lactosuero como residuo se mantiene estable en el transcurso del ensayo. Tanto en las semanas de ensayo con glicerina como en las de ensayo con lactosuero la eliminación de la materia volátil se estabiliza en torno a un 19 %. Estos resultados son bastante buenos, conservando en el digestor alrededor de un 80 % de materia activa. En la gráfica 141 se representa con una línea azul el biogás generado durante el estudio, aumentando durante la estabilización de la población bacteriana.

Figura 139: Tabla de datos de materia volátil obtenida en el proceso con lactosuero.

% MV y % de eliminación MV			
Semanas	MV Entrada	MV Salida	% eliminación MV
1	54 % ± 1	44 % ± 1	18 %
2	54 % ± 1	45 % ± 1	17 %
3	56 % ± 1	45 % ± 1	19 %
4	55 % ± 1	44 % ± 1	20 %
5	54 % ± 1	43 % ± 1	20 %

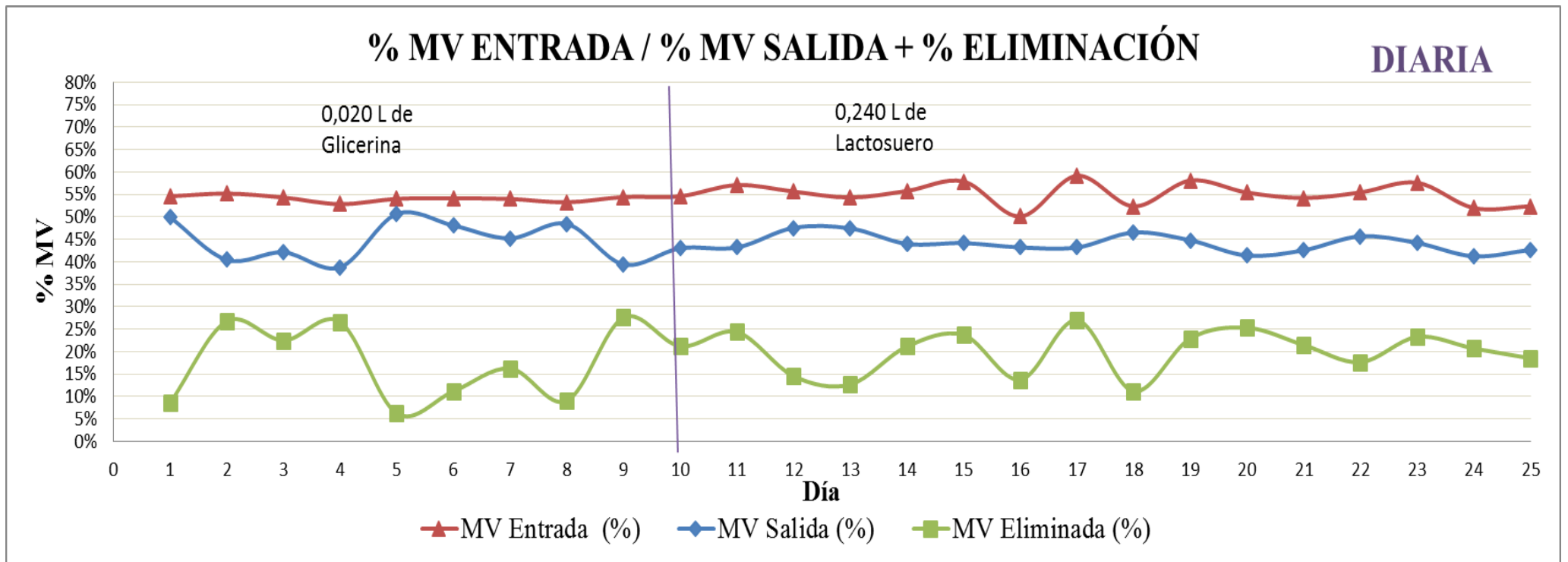


Figura 140: Gráfica de los datos diarios de materia volátil obtenida en el proceso con lactosuero.

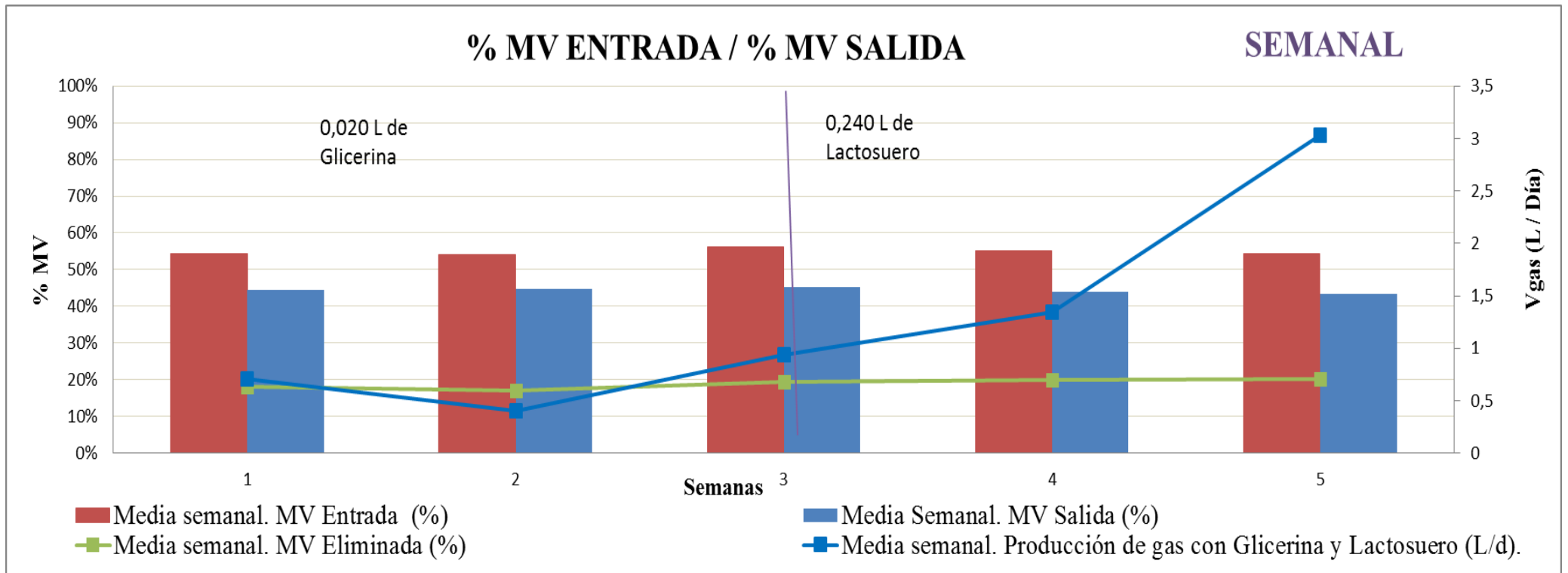


Figura 141: Datos semanales de la materia volátil obtenida en el proceso con lactosuero.

Se describen ahora dos de los parámetros fundamentales para la estabilidad del proceso, la producción de ácidos grasos volátiles y la alcalinidad.

La figura 142 recoge las medias semanales de los datos diarios recogidos en el proceso, donde puede verse que el digestor en estudio cuenta con una alta capacidad tampón, siempre dentro del rango de estabilidad marcado. En esta tabla se observa que la cantidad de AGV y alcalinidad medida en mg/l de CaCO₃ se mantienen estables durante todo el proceso, aumentando con el cambio de alimentación a lactosuero, en torno a 2.500 mg/L y 500 mg/L respectivamente.

En las figuras 143 y 144 se representan gráficamente los datos de la tabla anterior, tanto a escala diaria como a escala semanal. En ambas gráficas se presentan en morado los datos de alcalinidad y en naranja los de AGV. En la gráfica 144 se representa el biogás generado en color azul. En estas gráficas se observan las oscilaciones de alcalinidad y AGV debido al cambio de alimentación a lactosuero. Con el lactosuero estos parámetros aumentan manteniendo su relación siempre dentro del rango óptimo de operación, coincidiendo con el aumento del biogás generado.

Figura 142: Tabla de datos de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con lactosuero.

Semanas	Media Semanal. ALCALINIDAD (mg/l)	Media Semanal. ACIDEZ (mg/l) (CaCO₃)
1	2.070 ± 1,1	240 ± 0,9
2	1.936 ± 1,1	253 ± 0,9
3	2.296 ± 1,1	525 ± 0,9
4	3.188 ± 1,1	466 ± 0,9
5	1.914 ± 1,1	431 ± 0,9

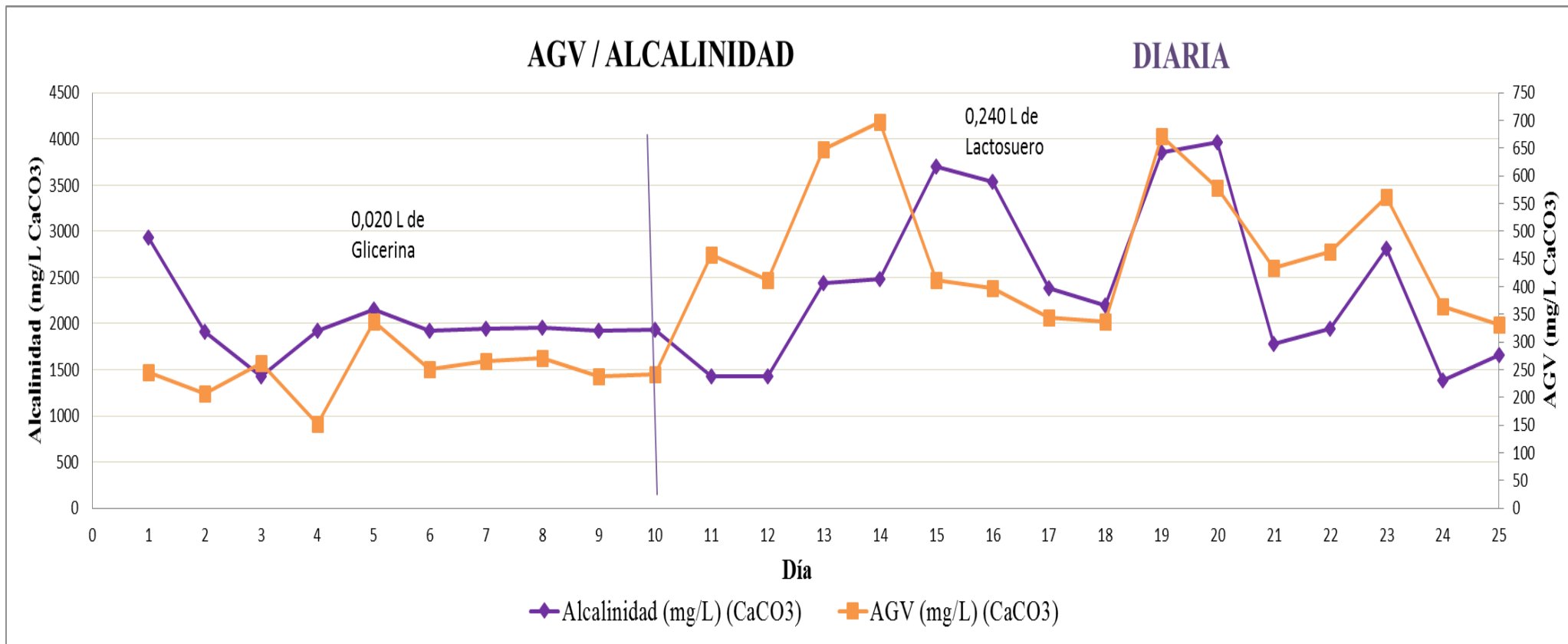


Figura 143: Gráfica de los datos diarios de la alcalinidad y la acidez medida en el proceso con lactosuero.

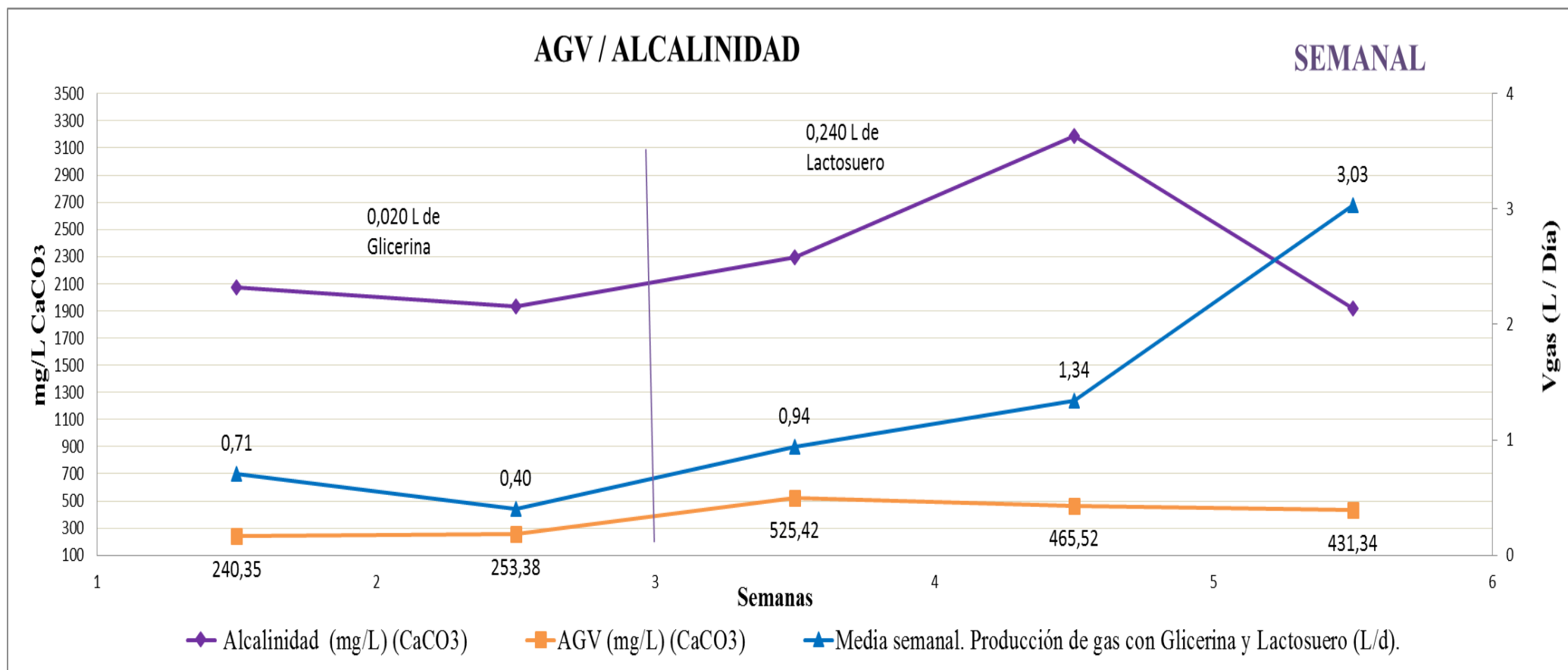


Figura 144: Gráfica de los datos semanales de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con lactosuero.

El ratio AGV/ Alcalinidad debe de estar dentro del rango establecido por su relación (0,1-0,4) para asegurar la estabilidad del proceso, cualquier variación en este rango supone un desequilibrio en el sistema. Otro parámetro muy importante para controlar la estabilidad del digestor es el pH. En la figura 145, se presenta la media de los datos de pH semanales junto con los valores del ratio AGV/ Alcalinidad.

Pese a la acidez de los residuos utilizados, los datos de pH y AGV/ Alcalinidad se han mantenido estables, observando una mayor regularidad tras la adición del lactosuero y el aumento correspondiente del biogás generado. Esta estabilidad del pH indica un buen funcionamiento del digestor y el desarrollo exitoso del proceso anaerobio.

En las figuras 146, 147 y 148 pueden verse los trazados de pH, ratio AGV/ Alcalinidad y volumen gas generado. En ellas se aprecia la estabilidad en los valores tras la adición del lactosuero

Figura 145: Tabla de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con lactosuero.

Semanas	Media Semana. PH (Digestor)	Ratio AGV/ Alcalinidad
1	8,5 ± 0,01	0,12
2	7,3 ± 0,01	0,13
3	7,4 ± 0,01	0,23
4	7,1 ± 0,01	0,15
5	7,4 ± 0,01	0,22

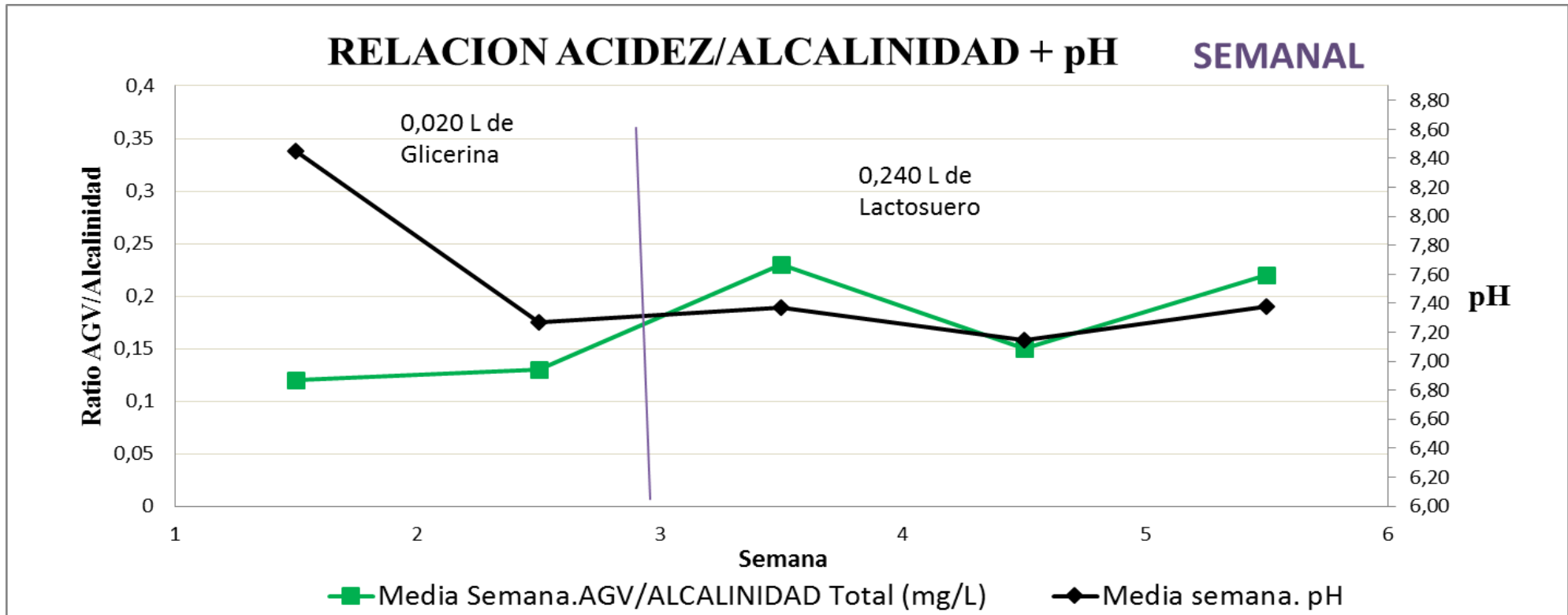


Figura 146: Gráfica de datos diarios de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con lactosuero.

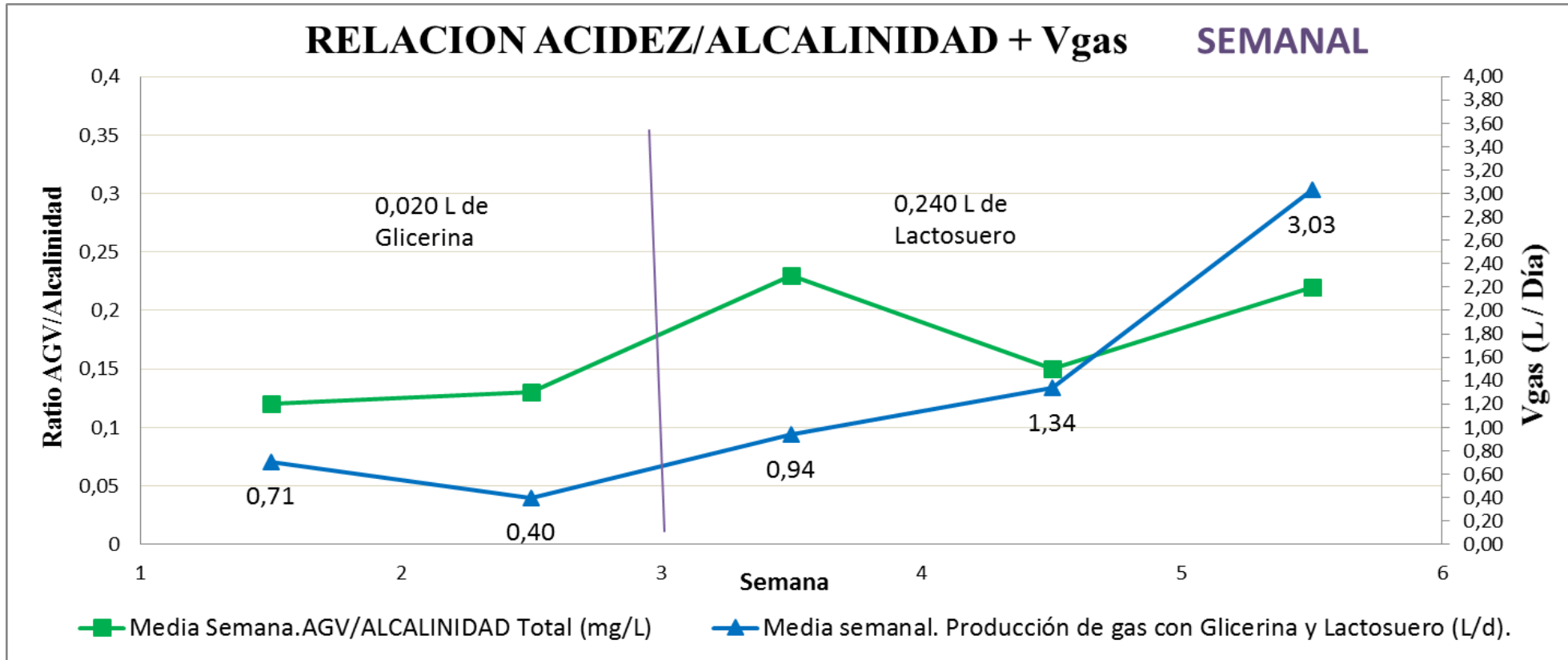


Figura 147: Gráfica de datos semanales de ratio AGV/ Alcalinidad y volumen gas medidos en el proceso.

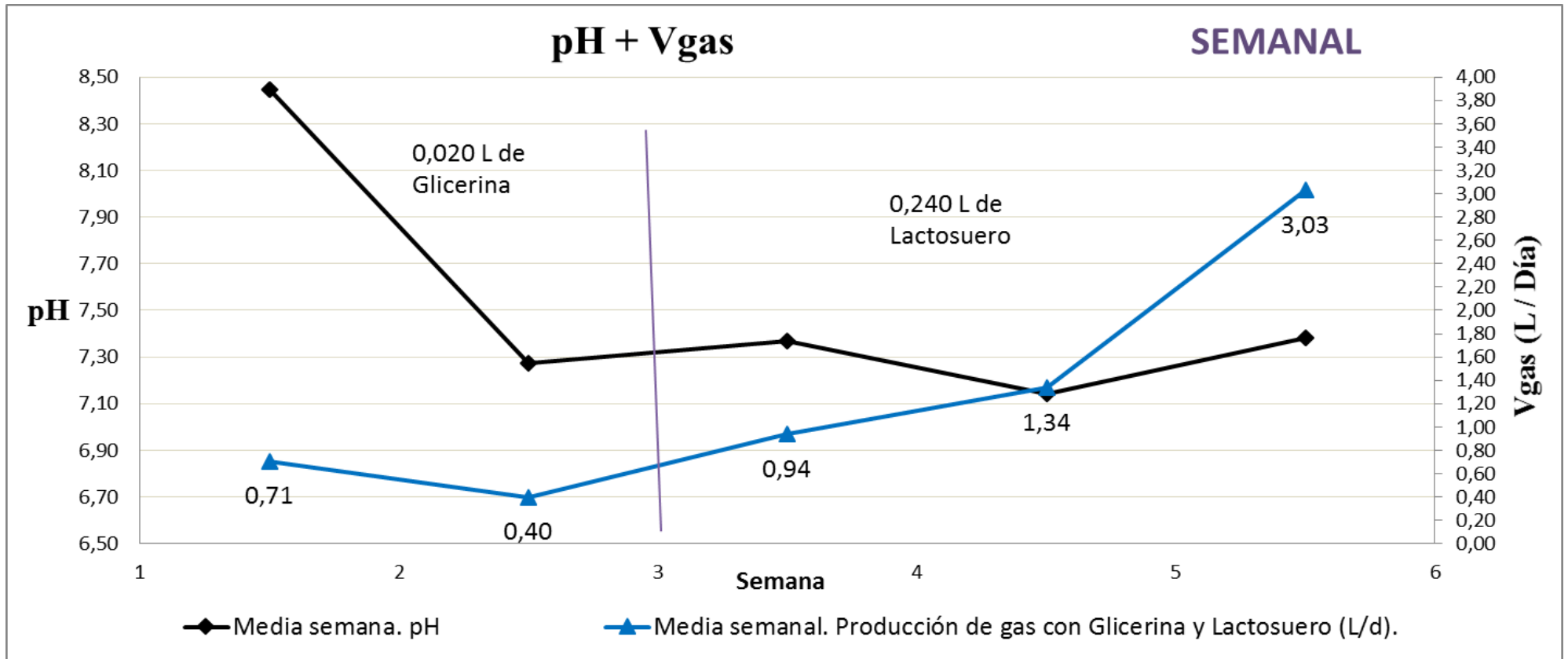


Figura 148: Gráfica de datos semanales de pH y volumen gas medidos en el proceso.

- ***Conclusiones.***

En este apartado se presentan las conclusiones obtenidas en base a los resultados y a las consideraciones anteriormente explicadas.

- El proceso de co-digestión anaerobia con adiciones de lactosuero de 0,240 L es viable, estabilizando el digestor en estudio y generando una producción extra de biogás muy considerable. Se confirma el potencial del lactosuero como residuo estabilizador de digestores con capacidad de generar además una gran cantidad de biogás extra que genere beneficios energéticos, resultando la co-digestión una alternativa para su gestión como residuo peligroso.

- Los diferentes parámetros indicadores del funcionamiento del sistema, se mantienen estables dentro de los rangos de actividad exigidos. Además la eliminación de materia volátil se mantiene estable de números bajos y la capacidad de eliminación de DQO se estabiliza en números que superan el 50 %.

3.6 Ensayo Mezcla de Lactosuero y Glicerina.

Tras los resultados obtenidos con el lactosuero como residuo para el proceso de co-digestión anaerobia, se pretende introducir el residuo de glicerina en el proceso, de manera que la mezcla de residuos no desestabilice el digester y las propiedades de ambos se vean incrementadas, generando una mayor producción de biogás. La utilización de una mezcla de sustratos en co-digestión anaerobia con resultados positivos abre una nueva alternativa para la gestión de residuos peligrosos. Los residuos que en solitario no funcionan en el proceso anaerobio, pueden mezclarse con otros generando una mezcla de alimentación estable que si funciona en el proceso, siendo viable su gestión como residuo en un proceso de co-digestión.

Para estudiar si la mezcla de lactosuero y glicerina es viable en un proceso de digestión anaerobia, se ensaya en el digester de laboratorio, aprovechando su estado actual estable con la alimentación de lactosuero.

La mezcla de residuos es homogeneizada antes de ser alimentada por medio de una varilla agitadora. Se mantiene la mezcla de alimentación estudiada para el lactosuero añadiendo distintas cantidades de glicerina para ver cuál es la más idónea para el funcionamiento del proceso.

. Una vez introducido el residuo, se estudia su efecto en el proceso anaerobio y la evolución de los parámetros analizados.

- ***Discusión de resultados.***

Los primeros datos de la figura 149 representan el potencial de producción de gas que tiene el digestor en el proceso de co-digestión. En diversas columnas se exponen una media de los litros diarios que el digestor produce a la semana sin y con el residuo. En la última columna se representa el incremento o pérdida de biogás producido por el efecto del residuo añadido en el proceso anaerobio.

Los datos expuestos se expresan como la media de litros producidos por el digestor a la semana, para así realizar más fácilmente la comparación entre datos.

Se incluye en la tabla la producción media de biogás producida por el fango mixto en solitario en ensayos anteriores, como base comparativa de este estudio. Las semana uno corresponde a las semana final del digestor en el estudio con lactosuero como residuo. En la semana dos, el digestor es alimentado con una mezcla con 0,240 L de lactosuero y 0,020 L de glicerina. En las semanas tres y cuatro, se aumenta la dosis de glicerina a 0,040 L, con la intención de utilizar el máximo residuo posible sin desestabilizar el digestor, agilizando su gestión. Por último, se añaden 0,030 L de glicerina en las semanas restantes, regulando la actividad del digestor y encontrando la cantidad óptima de mezcla para el mejor funcionamiento del proceso anaerobio. Alimentando el digestor con 0,020 L de glicerina se obtiene un 21 % extra de biogás. Con la alimentación de 0,040 L de glicerina el biogás obtenido aumenta a un 33 %. Y con la adición de 0,030 L de glicerina la producción de biogás se estabiliza en un extra de 35 %.

Figura 149: Tabla de datos del volumen de gas obtenido la mezcla de residuos.

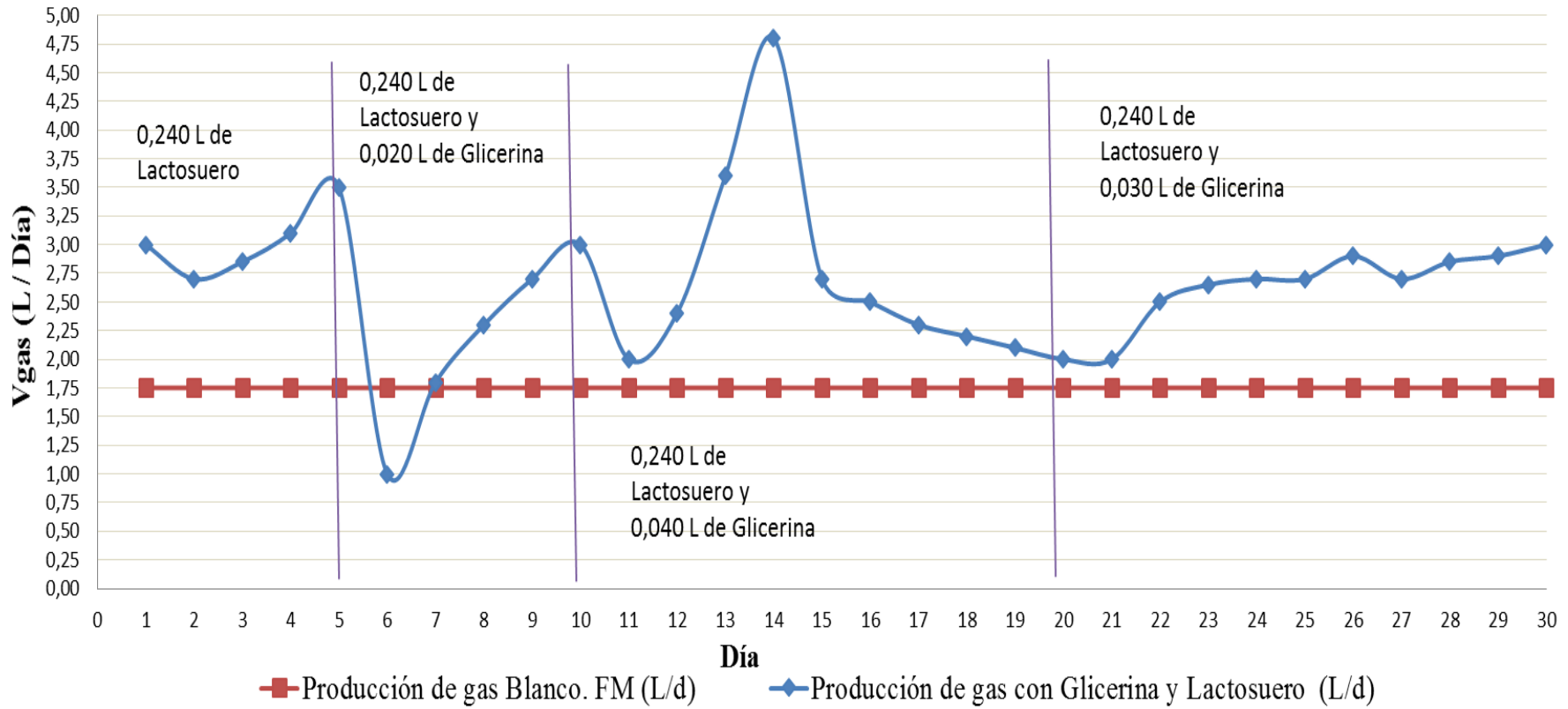
Volumen medio semanal de gas producido con la mezcla de Lactosuero y Glicerina						
Semanas	Alimentación (L)			Producción media (L) sin Glicerina	Producción media (L) con Glicerina	% de incremento de Biogás
	Fango mixto	Lactosuero	Glicerina			
0	0,400			1,750		
1	0,400	0,240			3	42 %
2	0,400	0,240	0,020		2,2	21 %
3	0,400	0,240	0,040		3,1	44 %
4					2,2	21 %
5	0,400	0,240	0,030		2,5	30 %
6					2,9	40 %

A continuación se representan los datos de la tabla anterior en dos gráficas distintas, la gráfica 150 donde vemos los litros de gas producidos diariamente por el digestor y la gráfica 151, representando los mismos datos pero en este caso a escala semanal. En ambas gráficas se representa con color azul el volumen de gas producido tras la adición del residuo y con color rojo la media de producción de gas sin residuo.

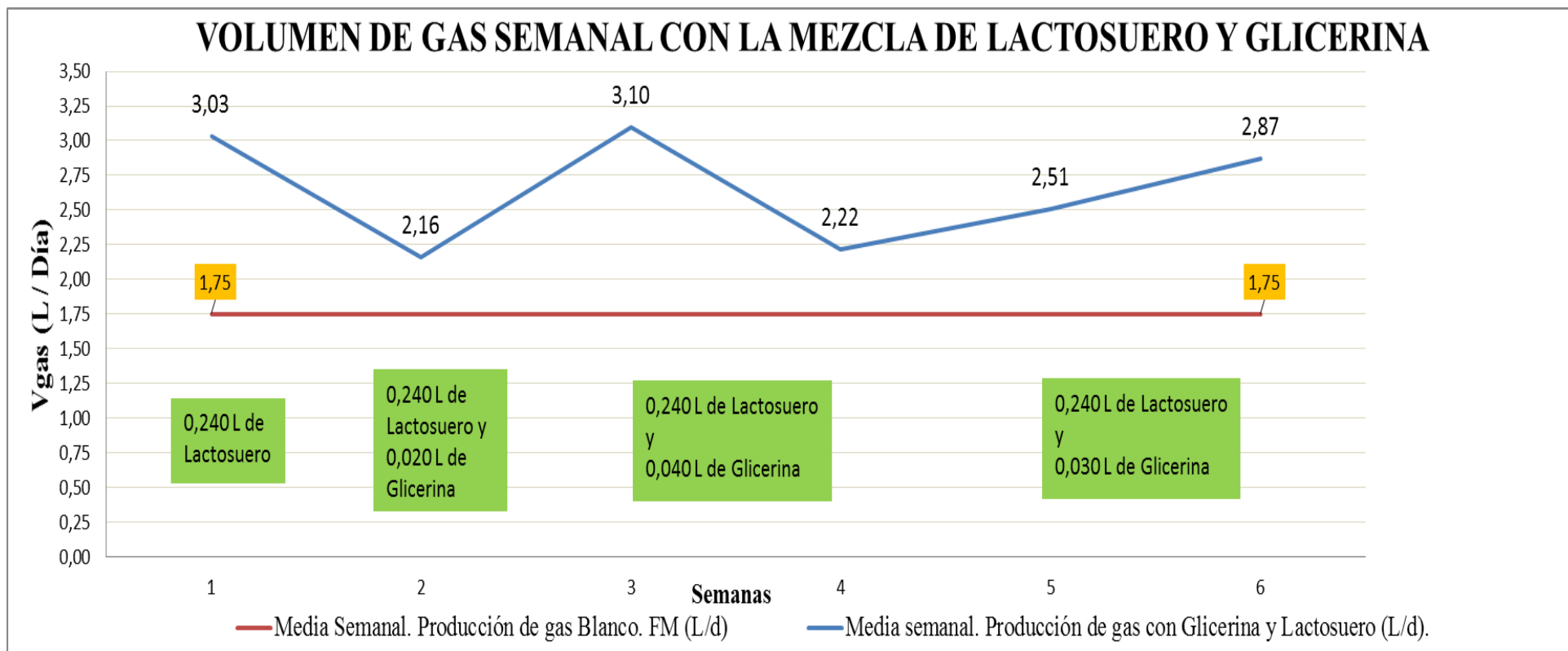
Se divide la gráfica en varios tramos en los que se alimenta el digestor con cantidades diferentes de glicerina. La primera semana muestra la producción de gas obtenida con la alimentación de lactosuero en el ensayo anterior. El día 5 se comienza con la adición de glicerina, bajando la producción de gas en el primer día, asociada al periodo de adaptación, dado que el resto de días la producción incrementa hasta los 3 litros de biogás. Con este incremento se decide aumentar la dosis de glicerina con el fin de eliminar el máximo residuo posible y aumentar el volumen extra de biogás. Se aumenta la dosis a 0,040 L de glicerina, nuevamente el primer día disminuye la cantidad de biogás producido, aumentando muy significativamente en la primera semana, llegando a valores que rondan los 5 litros de producción. En la segunda semana de estudio con 0,040 litros de glicerina la producción de biogás decae rápidamente, resultando una cantidad de alimentación excesiva para la población bacteriana. Por este motivo se regula la cantidad de glicerina añadida a 0,030 L. con esta cantidad la producción de biogás se estabiliza en un 3 litros de biogás, generando un 35 % de biogás extra. Con estos resultados se alcanza la alimentación óptima para el mejor funcionamiento de ambos residuos en conjunto, concluyendo la investigación con resultados satisfactorios.

La gráfica 151 representa el volumen de gas producido por semanas, donde las columnas indican la producción semanal de biogás, mostrando las oscilaciones en la producción de gas con el cambio en la alimentación. Como base comparativa se expone el biogás producido por el fango mixto en solitario, representado por la línea roja.

VOLUMEN DE GAS DIARIO CON LA MEZCLA DE LACTOSUERO Y GLICERINA



Figuras 150: Gráfica diaria de la producción de gas obtenida en el proceso con la mezcla de residuos.



Figuras 151: Gráfica semanal de la producción de gas obtenida en el proceso con la mezcla de residuos.

Se analiza ahora el desarrollo del proceso anaerobio con el lactosuero y la glicerina en las distintas mezclas de alimentación, para ello se observa el comportamiento de los distintos parámetros analizados. El análisis de estos parámetros confirma el buen funcionamiento del digestor y por tanto del proceso anaerobio.

Con respecto a la DQO, se comparan los datos de entrada, salida y eliminación de materia orgánica. Estos datos son los representados en las figuras 152, 153, 154 y 155. En la tabla 152, se exponen los datos de DQO de la alimentación del digestor y de la muestra sacada para el análisis en mg litro, y el rendimiento de eliminación en porcentaje. El porcentaje de rendimiento de eliminación de materia orgánica se ha calculado por diferencia entre la DQO de entrada y la de salida dividido por la DQO de entrada, todo ello multiplicado por cien.

En las gráficas 153, 154 y 155 se representan los datos de la tabla 152 a escala diaria y semanal. En color rojo puede verse la DQO de la alimentación, con una media de DQO de entrada de 32.300 mg/L. En color azul se representa la DQO de la muestra de digestor analizada, con una media de DQO de salida de 14.400 mg/L. En color verde se presenta el porcentaje de eliminación de DQO en el proceso anaerobio. Los datos obtenidos indican la estabilidad en la degradación de este residuo, obteniendo un promedio de eficiencia de eliminación de 55 %. A destacar el dato de la semana 4 donde disminuye esta eliminación hasta un 49,6 %, coincidiendo con la caída en la producción de biogás. A mayor porcentaje de eliminación mayor biodegradabilidad del sustrato y por tanto mayor eficiencia del proceso. La adición del lactosuero junto con la glicerina mantiene la eficiencia en eliminación de DQO presentada por el lactosuero anteriormente ensayada. La comparativa en la gráfica 155 con el volumen gas muestras la estabilidad en este parámetro pese a las oscilaciones del gas generado.

Figura 152: Tabla con los datos de DQO obtenidos en el proceso con la mezcla de residuos.

Semanas	DQO Entrada (mg/l)	DQO Salida (mg/l)	% eliminación
1	30.778 ± 0,7	13.845 ± 0,8	55 %
2	33.195 ± 0,7	14.255 ± 0,8	57 %
3	32.110 ± 0,7	14.319 ± 0,8	55 %
4	32.907 ± 0,7	16.759 ± 0,8	50 %
5	32.590 ± 0,7	13.594 ± 0,8	58 %
6	32.163 ± 0,7	13.840 ± 0,8	56 %

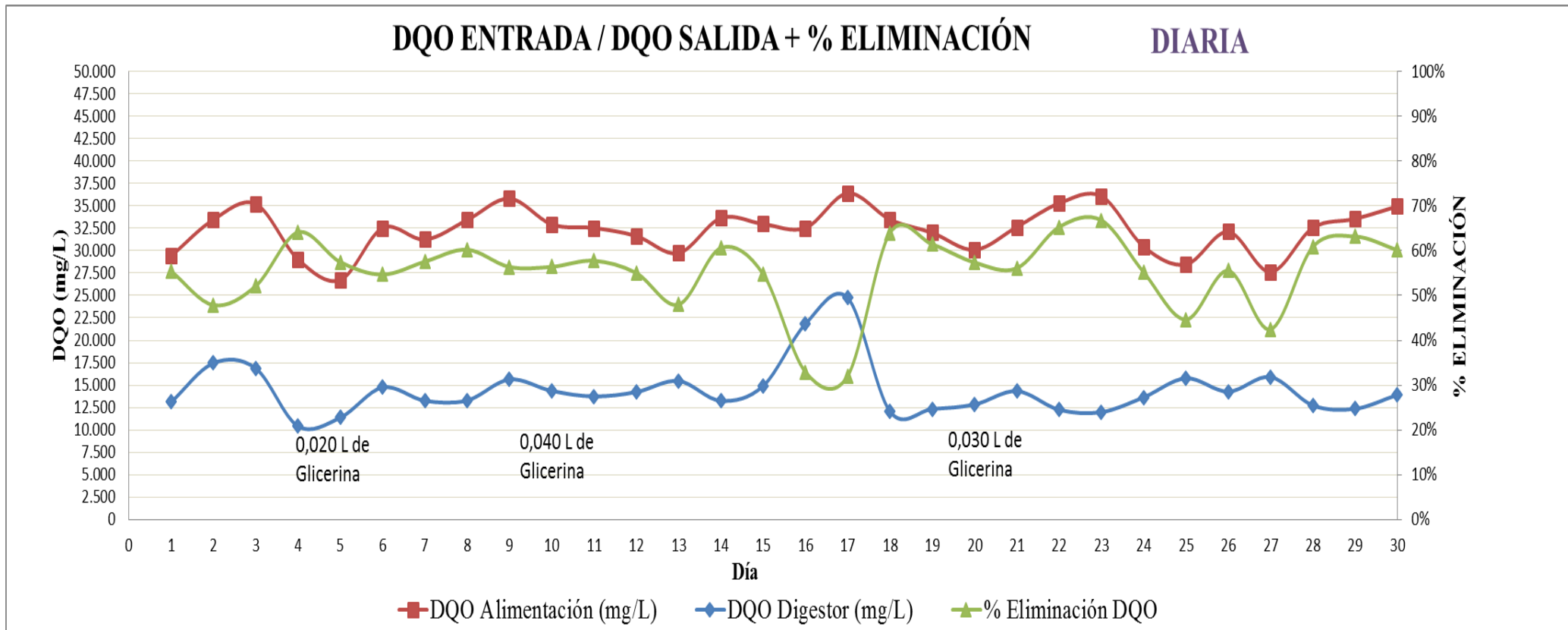


Figura 153: Gráfica de datos diarios de la DQO obtenida en el proceso con la mezcla de residuos.

DQO ENTRADA / DQO SALIDA + % ELIMINACIÓN SEMANAL

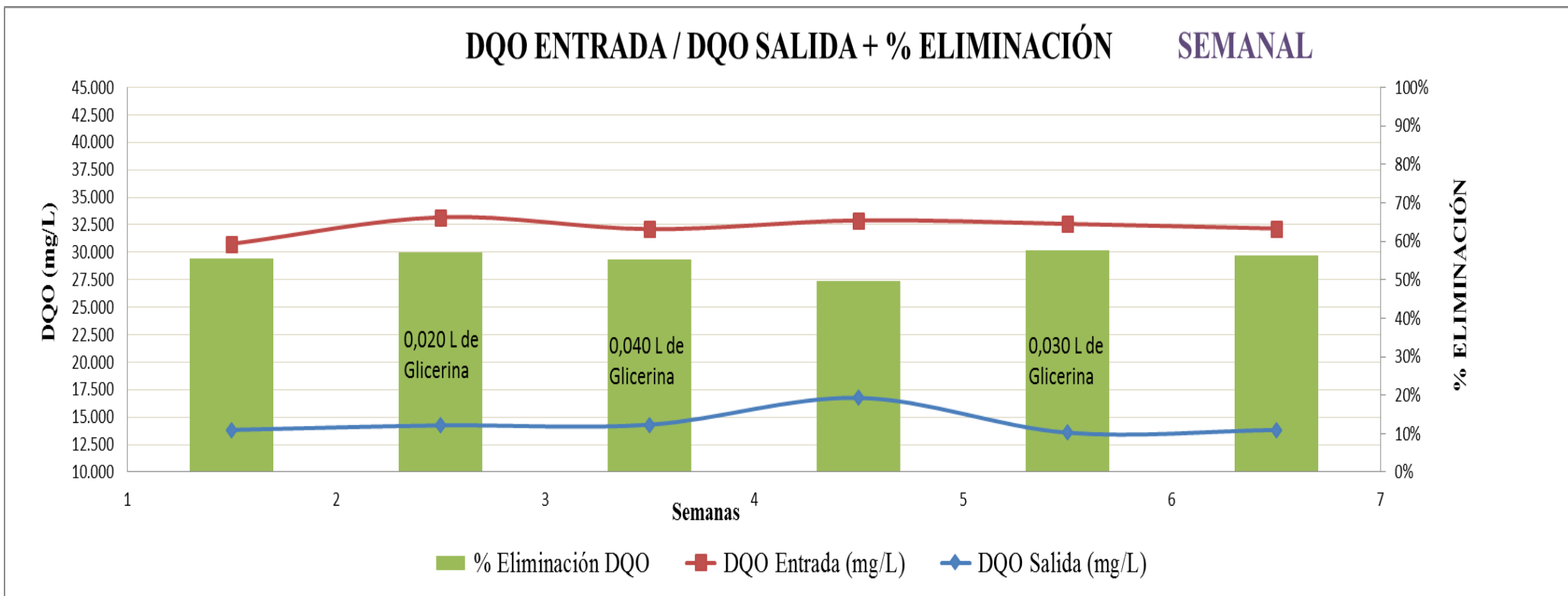
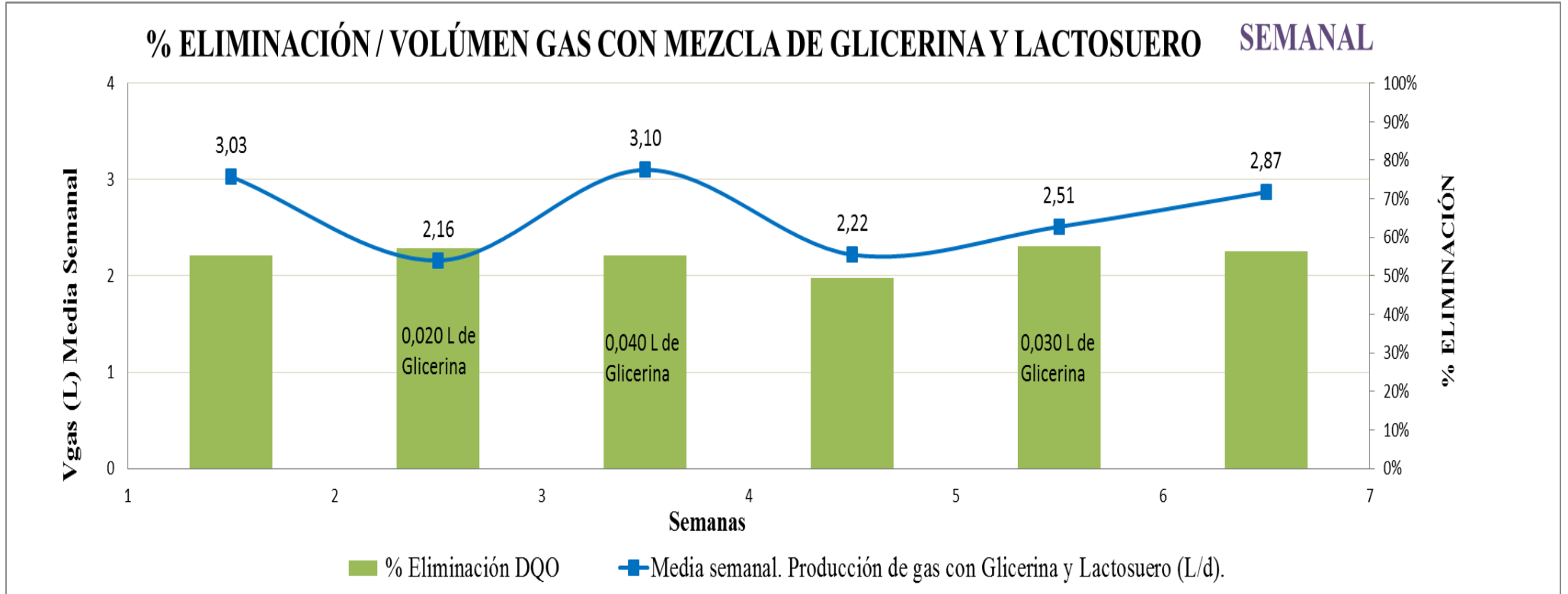


Figura 154: Gráfica de datos semanales de la DQO obtenida en el proceso con la mezcla de residuos.



. Figura 155: Gráfica de datos semanales de la eliminación de DQO y volumen gas obtenidos en el proceso con la mezcla de residuos.

Un parámetro esencial en el proceso de digestión anaerobia es la cantidad de microorganismos que existen en el digestor, representados por el porcentaje de materia volátil medido.

En la figura 156 se exponen los datos de materia volátil (MV) medidos en este ensayo. Se presentan los datos de materia volátil en la alimentación y en la salida del digestor. La diferencia entre ambas dividida entre la materia volátil en la alimentación, multiplicada por cien, indica el porcentaje de materia volátil eliminada.

El porcentaje de materia volátil es calculado por la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos volátiles medidos en las muestras de ensayo, todo ello multiplicado por cien.

En las figuras 157 y 158 pueden verse los datos de la tabla 149 gráficamente, tanto a escala diaria como semanal. En ambas gráficas se presenta en rojo la materia volátil referente a la alimentación, con una media de 73 %. En color azul se presenta la materia volátil correspondiente a la muestra de digestor analizada, con una media de 55 %. En color verde se presenta el porcentaje de eliminación de materia volátil. La eliminación de materia volátil con lactosuero y glicerina como residuos se mantiene estable en el transcurso del ensayo en torno a un 24 %. En la semana cuatro aumenta no significativamente, coincidiendo con la disminución de gas y la eliminación en DQO. Estos resultados son bastante buenos, conservando en el digestor alrededor de un 80 % de materia activa, pese a las oscilaciones en el volumen gas generado representado en la gráfica 158 con una línea azul.

Figura 156: Tabla de datos de materia volátil obtenida en el proceso con la mezcla de residuos.

% MV y % de eliminación MV			
Semana	MV	MV digestor	% eliminación MV
1	54 % ± 1	43 % ± 1	20 %
2	74 % ± 1	57 % ± 1	23 %
3	75 % ± 1	58 % ± 1	24 %
4	76 % ± 1	54 % ± 1	28 %
5	69 % ± 1	54 % ± 1	23 %
6	69 % ± 1	54 % ± 1	23 %

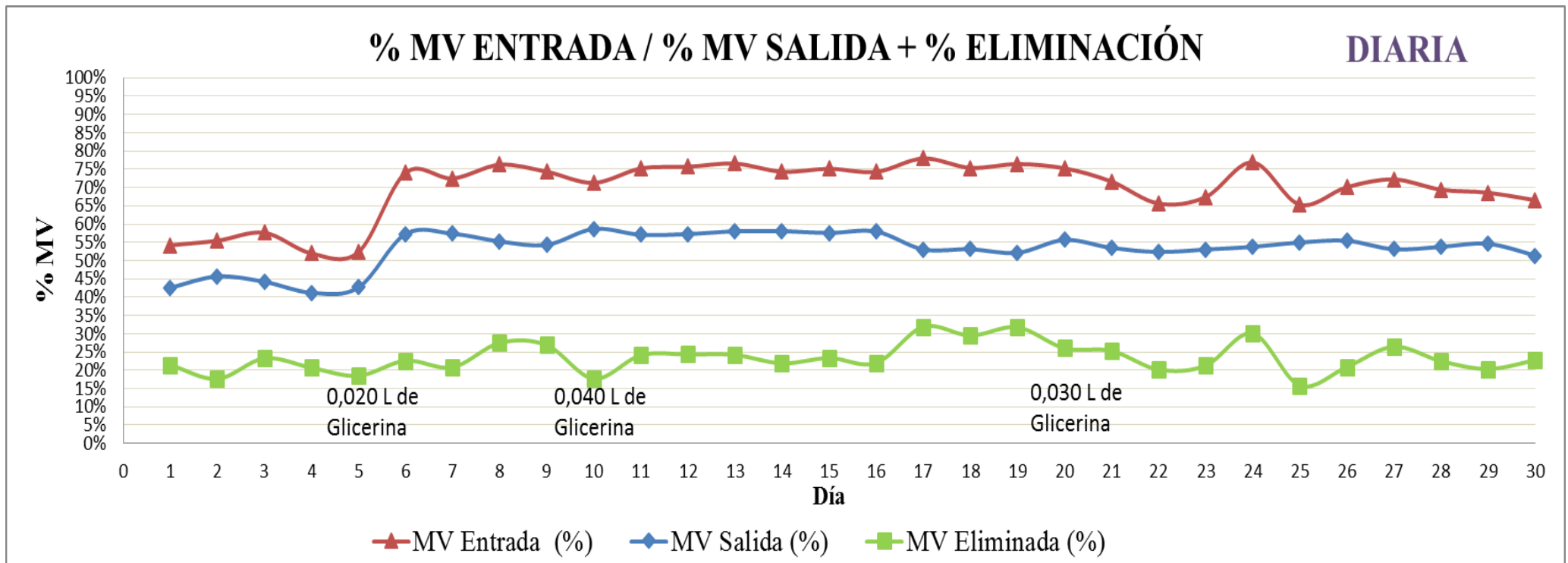


Figura 157: Gráfica de los datos diarios de materia volátil obtenida en el proceso con la mezcla de residuos.

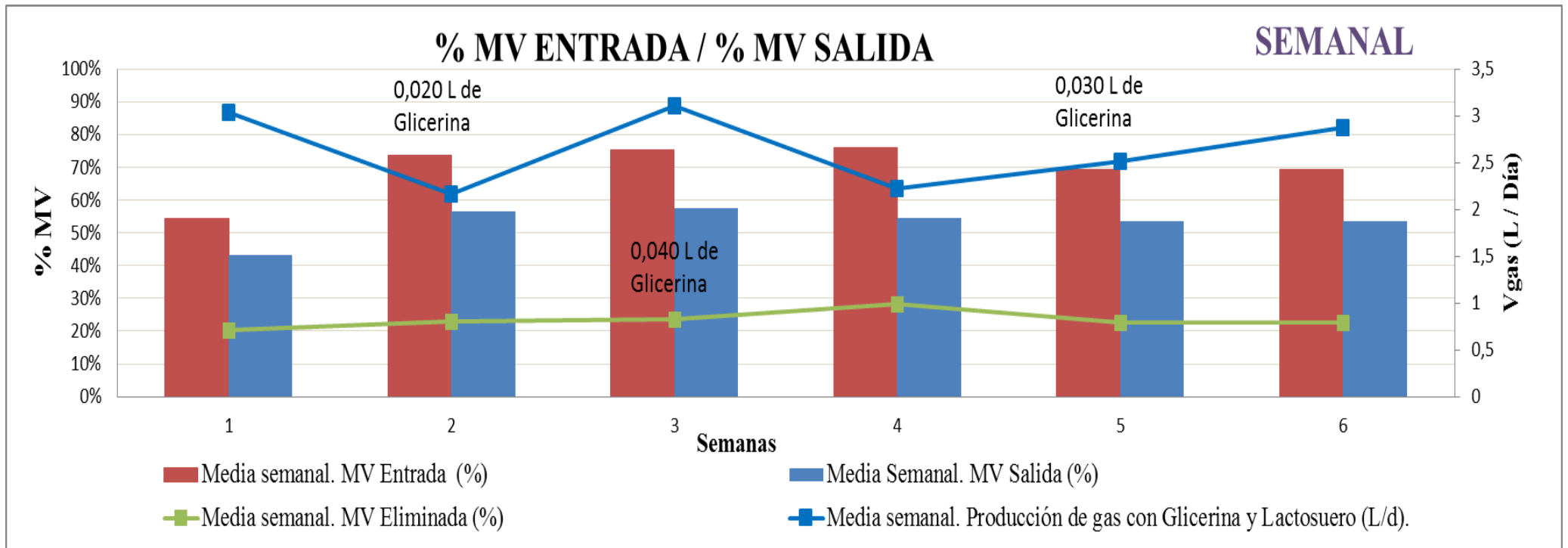


Figura 158: Datos semanales de la materia volátil obtenida en el proceso con la mezcla de residuos.

Se describen ahora dos de los parámetros fundamentales para la estabilidad del proceso, la producción de ácidos grasos volátiles y la alcalinidad.

La figura 159 recoge las medias semanales de los datos diarios recogidos en el proceso, donde puede verse que el digestor en estudio cuenta con una alta capacidad tampón, siempre dentro del rango de estabilidad marcado. En esta tabla se observa que la cantidad de AGV y alcalinidad medida en mg/l de CaCo₃ se mantienen estables durante todo el proceso, en números de 3.500 mg/L y 700 mg/L respectivamente. La mezcla de residuos aumenta la producción de AGV, ácidos que las bacterias metanogénicas pueden degradar aumentando la producción de biogás, tal y como ocurre en este ensayo.

En las figuras 160 y 161 se representan gráficamente los datos de la tabla anterior, tanto a escala diaria como a escala semanal. En ambas gráficas se presentan en morado los datos de alcalinidad y en naranja los de AGV. En estas gráficas se observa el aumento en los parámetros a medida que introducimos la mezcla de residuos, coincidiendo con el aumento de biogás generado, representado en la gráfica 161 por una línea azul.

Figura 159: Tabla de datos de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con la mezcla de residuos.

Semanas	Media Semana. ALCALINIDAD (mg/l) (CaCO₃)	Media Semana. ACIDEZ (mg/l)
1	1.914 ± 1,1	431 ± 0,9
2	3.285 ± 1,1	745 ± 0,9
3	3.794 ± 1,1	744 ± 0,9
4	3.577 ± 1,1	673 ± 0,9
5	3.518 ± 1,1	644 ± 0,9
6	3.563 ± 1,1	678 ± 0,9

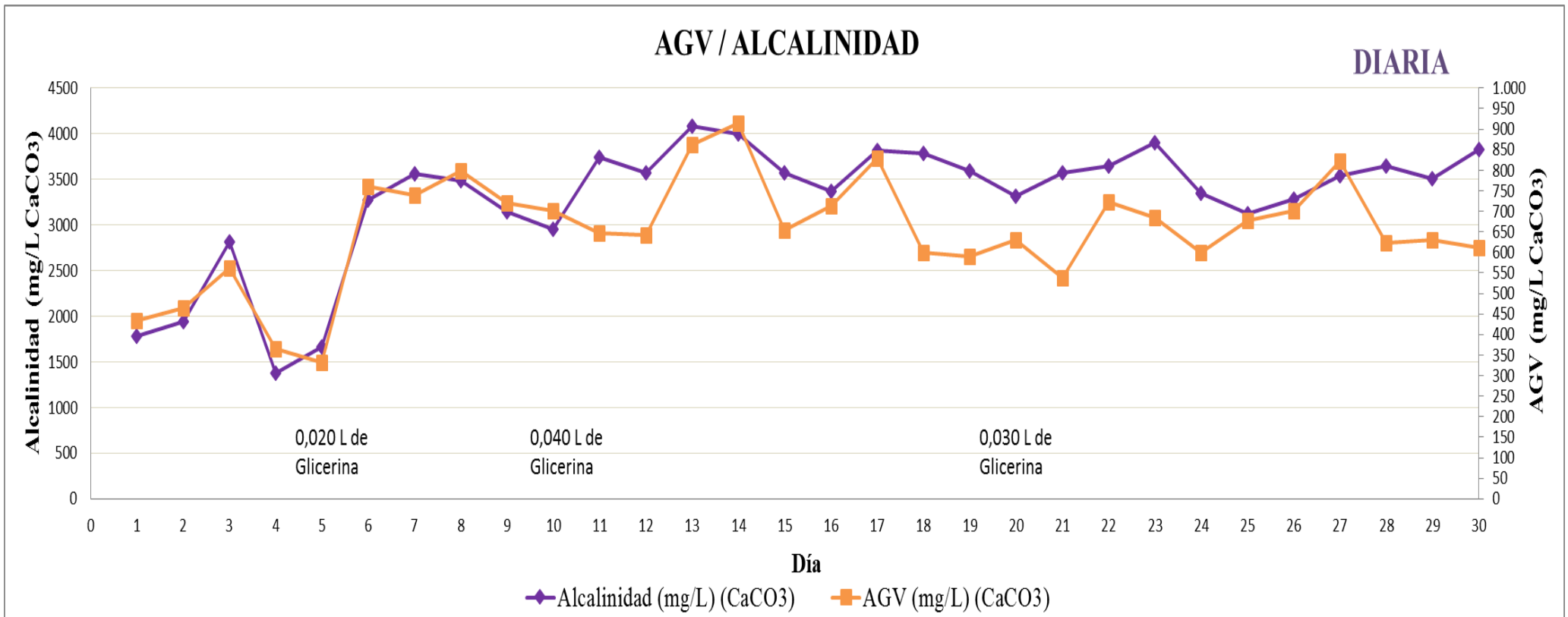


Figura 160: Gráfica de los datos diarios de la alcalinidad y la acidez medida en el proceso con la mezcla de residuos.

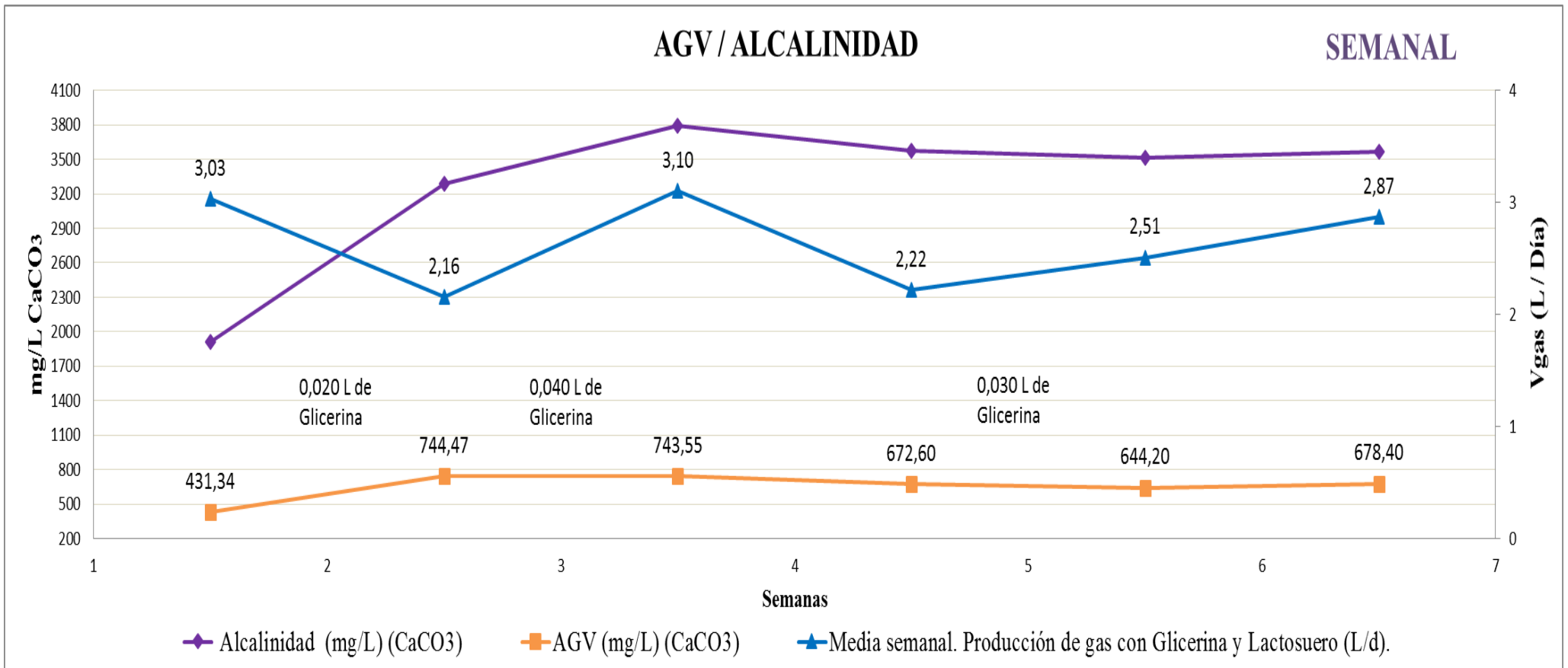


Figura 161: Gráfica de los datos semanales de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con la mezcla de residuos.

El ratio AGV/ Alcalinidad debe de estar dentro del rango establecido por su relación (0,1-0,4) para asegurar la estabilidad del proceso, cualquier variación en este rango supone un desequilibrio en el sistema. Otro parámetro muy importante para controlar la estabilidad del digestor es el pH. En la figura 162, se presenta la media de los datos de pH semanales junto con los valores de AGV/ Alcalinidad.

Los datos de pH y AGV/ Alcalinidad se han mantenido estables. Esta estabilidad del pH indica un buen funcionamiento del digestor y el desarrollo exitoso del proceso anaerobio. Las semanas tres y cuatro el pH decae un poco con el aumento de la cantidad de glicerina, coincidiendo con la disminución de la producción de biogás, no obstante en las semanas posteriores el pH vuelve a los rangos de estabilidad.

En las figuras 163, 164 y 165 pueden verse los trazados de pH, AGV/ Alcalinidad y biogás generado. En ellas se aprecia la caída en los valores de pH en las semanas centrales y la vuelta al rango de normalidad en las dos siguientes.

Figura 162: Tabla de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con la mezcla de residuos.

Semanas	Media Semana. PH (Digestor)	Ratio
1	7,4 ± 0,01	0,23
2	7 ± 0,01	0,23
3	6,7 ± 0,01	0,2
4	6,9 ± 0,01	0,19
5	7,1 ± 0,01	0,18
6	7,2 ± 0,01	0,19

RELACION ACIDEZ/ALCALINIDAD + pH SEMANAL

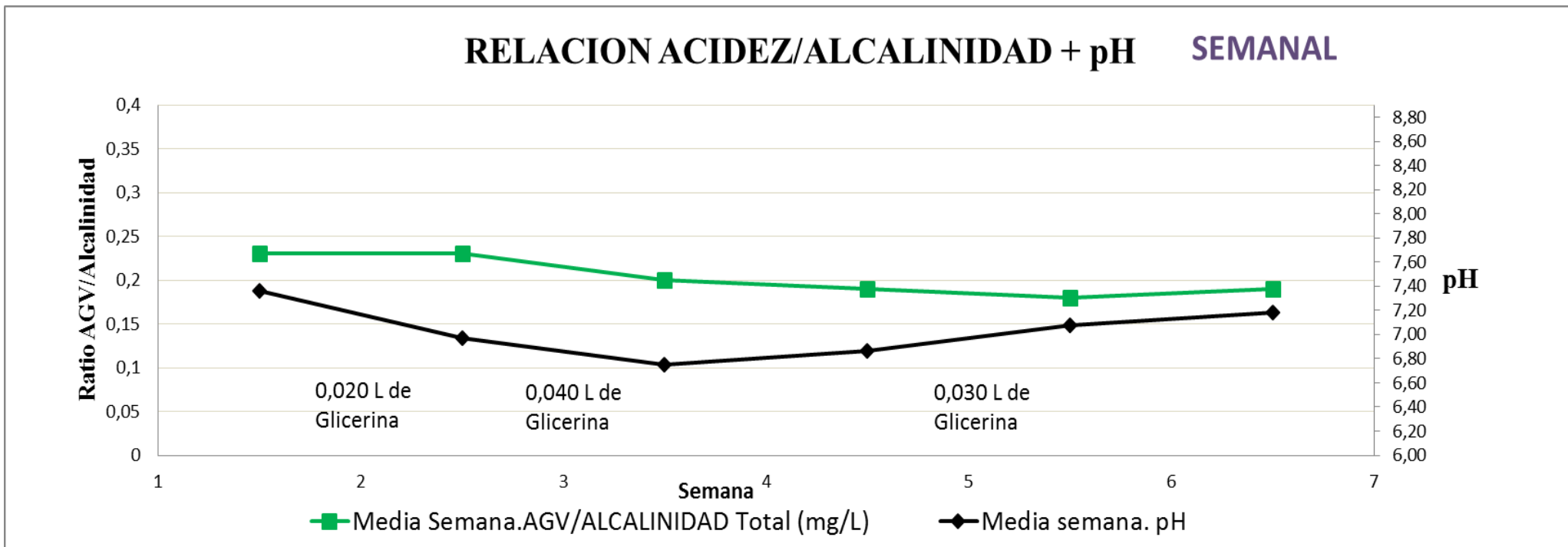


Figura 163: Gráfica de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con la mezcla de residuos.

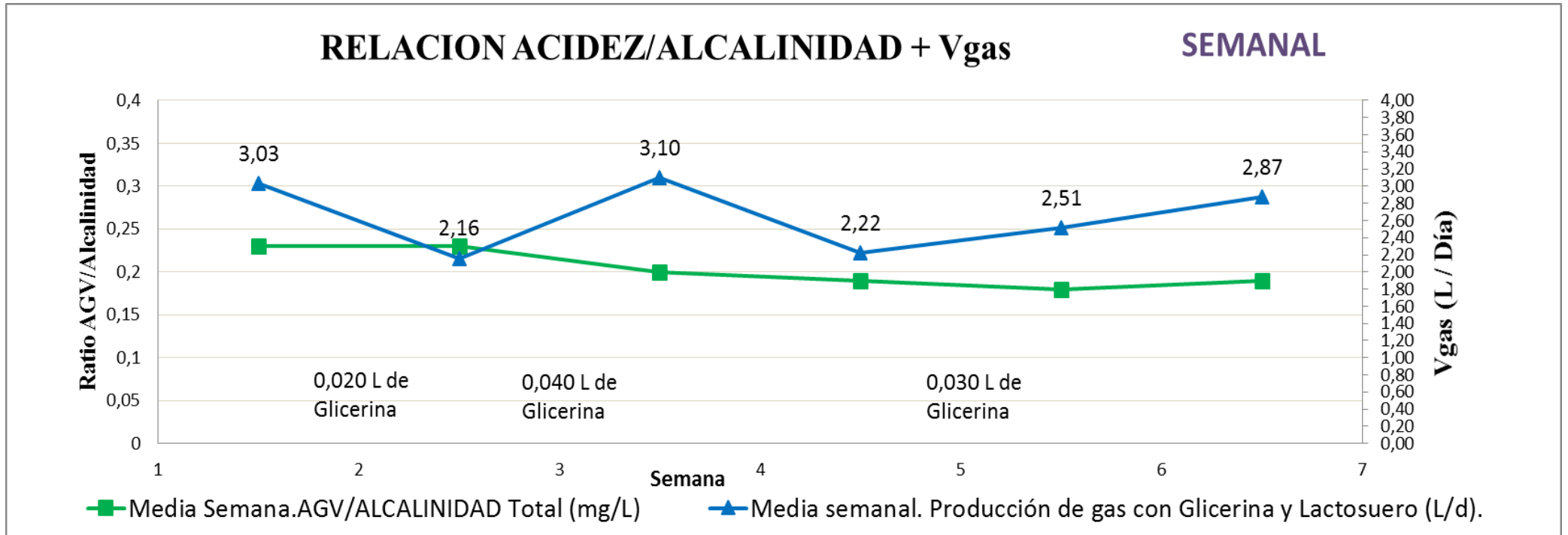


Figura 164: Gráfica de datos semanales de ratio AGV/ Alcalinidad y volumen gas medidos en el proceso con la mezcla de residuos.

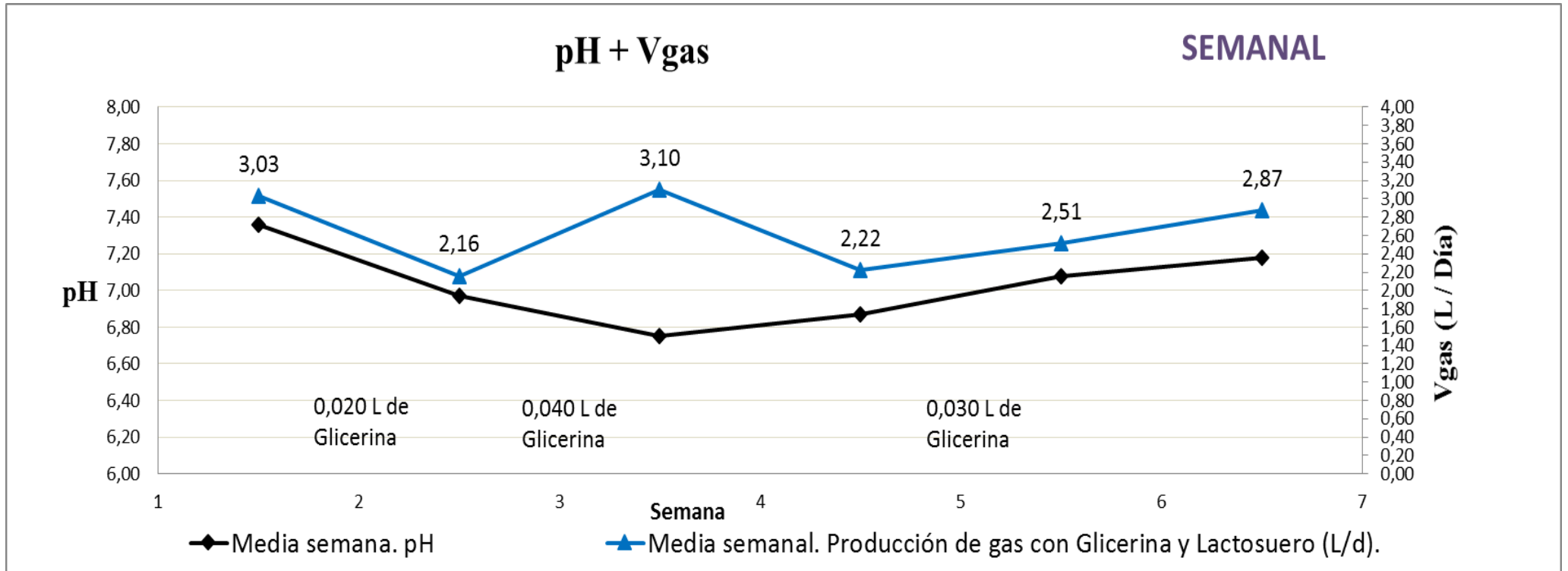


Figura 165: Gráfica de datos semanales de pH y volumen gas medidos en el proceso con la mezcla de residuos.

- ***Conclusiones.***

En este apartado se presentan las conclusiones obtenidas en base a los resultados y a las consideraciones anteriormente explicadas.

- El proceso de co-digestión anaerobia con adiciones de una mezcla con 0,240 L de lactosuero, 0,4 L de fango mixto y 0,030 L de glicerina obtiene unos resultados de biogás estables en un 35 % mayor al producido por el fango mixto. El proceso mantiene su estabilidad en todos sus parámetros.
- Se confirma el potencial del lactosuero como residuo estabilizador de digestores con capacidad para neutralizar residuos no viables como la glicerina, y generar una cantidad de biogás extra que genere beneficios energéticos.
- La implementación de una mezcla de residuos en una co-digestión anaerobia es viable, aumentando los beneficios obtenidos y manteniendo el proceso dentro de la estabilidad. De esta manera la co-digestión se consolida como alternativa para la gestión de residuos de difícil tratamiento, aportando además beneficios energéticos a la EDAR.

4. CONCLUSIONES

4.1 Conclusiones globales.

4.2 Conclusiones individuales.

4.3 Líneas de futuro.

4. CONCLUSIONES

A lo largo del proyecto se han expuesto diferentes aspectos en lo que respecta a un digestor anaerobio de laboratorio, como han sido:

- En primer lugar, una introducción teórica en la que se han explicado los mecanismos fundamentales de la digestión anaerobia, así como sus diferentes fases, procesos bacteriológicos y otros aspectos importantes.

También en este apartado teórico se han explicado los distintos parámetros que influyen en la digestión anaerobia, sus valores habituales, rangos óptimos, y mecanismos inhibidores o potenciadores del proceso de digestión.

- En segundo lugar, pasando ya al nivel práctico, se elabora una explicación detallada de los digestores utilizados en la investigación, su preparación e instalación.

En este apartado se explica la técnica con la que se lleva a cabo el ensayo y la puesta a punto del digestor, así como todas las partes de las que consta el mismo. También se exponen los distintos aparatos, medidores y equipos auxiliares que se utilizan para el desarrollo de los experimentos realizados al sistema. Además se detallan los diferentes métodos de análisis utilizados.

- Finalmente, se exponen detalladamente todos los resultados obtenidos en el desarrollo de los ensayos realizados, con especial atención a la producción de biogás extra obtenida con la co-digestión de los residuos. Se incluyen datos de otros parámetros como la DQO, materia volátil, alcalinidad, acidez y pH, para poder así determinar la eficacia y el buen funcionamiento del proceso con cada uno de los residuos estudiados.

4.1 Conclusiones globales.

Las conclusiones globales obtenidas en los distintos ensayos realizados, parten de las hipótesis iniciales:

- 1.- Es posible establecer el estudio de la CO-digestión anaerobia en digestores piloto de laboratorio, tanto en procesos continuos como discontinuos, utilizando la tecnología BMP o recreando el digestor de una EDAR real a escala piloto y procesándolo de la misma forma.
- 2.- En algunos casos, es posible aprovechar residuos orgánicos industriales de difícil gestión, perjudiciales para el medio ambiente, como sustratos en un proceso de digestión anaerobia, generando un extra de biogás producido en su CO-digestión con fangos mixto de depuradora.
- 3.- Es posible generar un extra en la producción de biogás adicionando mezclas de varios residuos a un proceso de digestión anaerobia, potenciando las ventajas del proceso anaerobio al trabajar en conjunto.
- 4.- Es posible recuperar un proceso de CO-digestión anaerobia de un residuo no funcional, añadiendo un segundo que neutralice las dificultades encontradas en el proceso y establezca los parámetros de trabajo del digestor, generando una producción extra de biogás.
- 5.- Es posible extrapolar los datos obtenidos en el estudio de digestores de una etapa con la tecnología BMP a digestores piloto de mayor volumen, obteniendo resultados similares.
- 6.- Es posible establecer un régimen de trabajo en un digestor anaerobio estabilizando la producción de gas, con una alimentación de un conjunto de residuos que anteriormente por separado han sido tóxicos para el digestor y que juntos en dosis adecuadas no interfieren en el proceso anaerobio.

Los resultados obtenidos en la investigación y las hipótesis cumplidas unen entre sí los residuos de difícil gestión y la co-digestión anaerobia, demostrando la posibilidad de implantación en una EDAR de un proceso anaerobio de co-digestión, que utilice residuos contaminantes de difícil gestión como co-sustratos, tanto de forma individual como en mezclas adecuadas, sin desestabilizar el proceso, con el consiguiente beneficio económico resultante de aprovechar el biogás producido para generar energía eléctrica, siendo una alternativa beneficiosa y operativa para su gestión como residuo. Además se comprueba que ciertos residuos tienen potencial reparador de digestores no operativos o en malas condiciones de trabajo, reestableciendo su funcionalidad.

4.2 Conclusiones individuales.

Analizando todos estos parámetros y los resultados obtenidos en cada ensayo, se alcanzan las siguientes conclusiones para cada residuo:

- Residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

La adición de residuo del deshuesado de la aceituna de mesa como sustrato en un proceso de co-digestión anaerobia es viable, generando un volumen extra de biogás, que es aprovechable en motores de cogeneración para la producción de energía eléctrica que de autoconsumo, reduciendo los costes energéticos del proceso.

Este residuo funciona de forma exitosa en el proceso de co-digestión, pudiendo ser implantado en una EDAR, generando beneficios económicos y convirtiendo a la misma en gestora de residuos.

- Lixiviado

La adición de lixiviado como sustrato en un proceso de co-digestión anaerobia no resulta viable en las cantidades estudiadas. El biogás generado en el proceso anaerobio disminuye hasta valores muy bajos y la estabilidad del sistema se rompe, inhibiendo el proceso. Se sugiere un estudio en profundidad de este residuo para poder ser implementado en un proceso de co-digestión en EDAR, que funcione como alternativa viable para su gestión.

- Lactosuero

La adición de lactosuero como sustrato en un proceso de co-digestión anaerobia es viable, generando un volumen extra de biogás, que es aprovechable en motores de cogeneración para la producción de energía eléctrica que de autoconsumo, reduciendo los costes energéticos del proceso. Además, los ensayos confirman su capacidad como residuo estabilizador del proceso de digestión, llevando digestores no operativos a una normalidad de trabajo y generando beneficios energéticos.

Este residuo funciona de forma exitosa en el proceso de co-digestión, pudiendo ser implantado en una EDAR, generando beneficios económicos y convirtiendo a la misma en gestora de residuos.

- Glicerina

Los resultados obtenidos en reactores de una sola etapa con la técnica BMP, indican la viabilidad de la glicerina como sustrato en un proceso de co-digestión anaerobia. Los resultados obtenidos con este residuo en digestores piloto de laboratorio de una escala mayor no confirman los resultados obtenidos en BMP. Sin embargo, la estabilidad que presenta el proceso anaerobio, indica la posibilidad de seguir investigando y encontrar una mezcla de alimentación adecuada que estabilice la producción de gas, haciendo viable su adición en EDAR como alternativa en su gestión como residuo, aunque no originen los beneficios económicos que otros residuos generan.

- Mezcla de Glicerina y Lactosuero

La adición de una mezcla de residuos de glicerina y lactosuero a un proceso de co-digestión anaerobia resulta viable, neutralizando las dificultades encontradas con el tratamiento de residuos por separado y aumentando los beneficios obtenidos. La correcta elección de dos residuos para alimentar un digester anaerobio resulta beneficioso, aumentando la cantidad de biogás aprovechable en motores de cogeneración para la obtención de energía eléctrica y manteniendo el proceso estable.

La implementación de mezclas de residuos en un proceso de co-digestión anaerobia debe de ser estudiada con mayor profundidad. En el caso del lactosuero y la glicerina, la co-digestión resulta una alternativa viable para su gestión como residuos aportando además beneficios energéticos a la EDAR.

4.3 Líneas de futuro.

Los resultados obtenidos en este trabajo abren nuevas líneas de investigación:

- 1- La experiencia en la simulación de digestores anaerobios capacita al grupo de investigación para continuar en la línea de investigación existente con distintos residuos o mezclas de residuos de difícil gestión, aprendiendo de los errores cometidos o fallos encontrados a lo largo del desarrollo del mismo. Con el estudio de una gran variedad de residuos se crea una base de datos que en un futuro constituya un manual de gestión en la digestión y co-digestión anaerobia con residuos orgánicos industriales de difícil gestión.
- 2- Estudio en detalle de las características y poblaciones bacterianas de los residuos que muestran potencial como estabilizadores y reparadores de sistemas no funcionales. Estudio de su composición y organismos, demostración de los mecanismos utilizados para estabilizar el proceso anaerobio desde unas condiciones poco idóneas.

- 3- Implantación de la co-digestión anaerobia en EDAR y constatación de los resultados y beneficios obtenidos en esta investigación. Estudio económico de la viabilidad de esta técnica en una EDAR real.
- 4- Estudio de las características de los fangos obtenidos en el proceso de digestión anaerobia. Estudio de la tratabilidad de estos fangos con los residuos añadidos. Características en su composición, estabilidad y aprovechamiento en campos de cultivo como compost o mejora de suelos.
- 5- Estudio de la formación de ácido sulfhídrico en el proceso anaerobio con una mezcla de residuos. La utilización de residuos contaminantes implica la dificultad en su tratamiento debido a su composición. En el caso de la glicerina, contiene gran cantidad de sulfatos que una vez sometidos al proceso anaerobio reaccionan en ácido sulfhídrico. Es ácido es uno de los más corrosivos para las tuberías y unidades que traten estos residuos, por lo que hay que evitar controlar su formación para evitar problemas en los equipos de trabajo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Ahring, B.K., Sandberg, M., Angelidaki, I. (1995). Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors. *Applied Microbiology and Biotechnology* 43(3), 559-565.
- Agencia Europea de Medio Ambiente. (2012). EEA Señales, “Crear el futuro deseado”. Recuperado de: <http://www.eea.europa.eu/es>.
- Agencia Andaluza de Energía. (2015). La biomasa y el biogás en Andalucía. Recuperado de: <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/>.
- Angelidaki, I., Ahring, B.K. (1997). Co-digestion of olive oil mill wastewaters with manure, household waste or sewage sludge. *Biodegradation* 8(4), 221-226.
- APHA-AWW-WOCF, (1992), Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, 17ª edición.
- Archer, D.B. y Kirsop, B.H. (1990). “The microbiology and control of anaerobic digestion”. *Anaerobic digestion: a waste treatment technology*, Wheatley A., ed., Elsevier applied science, 43-87.
- Baere, L, Mattheeuws, B (2008) Anaerobic digestion of solid waste. *Waste Management World* 9: pp. 1-8).
- Bastone, D. (2000). “High rate anaerobic treatment of the complex wastewater”, Tesis Doctoral, Universidad de Queensland.
- Benito, C. (2015). Desarrollo de la tecnología BMP para ensayos de codigestion anaerobia de residuos agroalimentarios con fangos mixtos de EDAR. Trabajo Fin de Master. Universidad de Sevilla.
- Benito, C. (2016). Desarrollo de la tecnología BMP para ensayos de codigestion anaerobia de residuos agroalimentarios con fangos mixtos de EDAR. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla. Sevilla.
- Ben, S. (2010). Aprovechamiento de huesos de aceituna, Biosorción de iones metálicos. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- Buffière, P., Bergeon, J.P. y Moletta, R. (2000). “The inverse turbulent ber: a novel bioreactor for anaerobic treatment”. *Water Research*, 34(2), 673-677.
- Cadi, Z. (1994). “Méthanisation en bioréacteur à membrane: application a effluent de papeterie”, Tesis doctoral, Université Claude Bernard (Lyon).

- Calli, B., Mertoglu, B., Inanc, B., Yenigun, O. (2005). Effects of high free ammonia concentrations on the performances of anaerobic bioreactors. *Process Biochemistry* 40, 1285-1292.
- Degremont Iberia. 2011. El factor clave del tratamiento de fangos, “La energía”. Recuperado de: <http://www.degremont.es/es/images/pdf/tratamientofangos.pdf>.
- Dinis, A. (2012). Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales: nuevos métodos de síntesis. Tesis doctoral. Universidad de Extremadura.
- Dolfín, J. (1988). “Acetogénesis”. *Biology of anaerobic microorganisms*, Zehnder A.J.B. ed., 417-468.
- Entaban Biocombustibles del Guadalquivir SA. Recuperado de: http://www.biodieselpain.com/plantas_detalle.php?id=21
- Empresa Metropolitana de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla, S.A. (2016). EDAR Copero. Recuperado de: <http://www.emasesa.com>.
- Esteban Gutiérrez, M. (2014). Co-digestión anaerobia de lodo de EDAR con residuos orgánicos de diferente naturaleza combinación de técnicas experimentales y herramientas matemáticas.
- Fernández-Polanco, F., Nieto, P., Pérez-Elvira, S., van der Zee, F.P., Fernandez-Polanco, M., Garcia, P.A. (2005). Automated equipment for anaerobic sludge parameters determination. *Water Science and Technology* 52(1-2), 479-485.
- Ferry, J.G. (1992). “Biochemistry of Methanogenesis”. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, 27(6), 473-503.
- Fezzani, B., Cheikh, R.B. (2010). Two-phase anaerobic co-digestion of olive mill wastes in semi-continuous digesters at mesophilic temperature. *Bioresource Technology* 101(6), 1628-1634.
- García, J.L., Patel, B.K.C. y Ollivier, B. (2000). “Taxonomic, phylogenetic, and ecological diversity of methanogenic *Archaea*”. *Anaerobe*, 6, 205-226.
- González, Y. (1995). Estudio Geotécnico de los Depósitos de Desechos Sólidos Urbanos. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
- Guyot, J.P. (1992). “Introducción a la microbiología de los reactores anaerobios”. *Bioprocesos anaerobios para el tratamiento de efluentes industriales*, Iztapalapa (Méjico), 1-17.

- Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management* 31(8), 1737-1744.
- Kim, M., Ahn, Y., Speece, R.E. (2002). Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion: mesophilic vs. thermophilic. *Water Research* 36, 4369–4385.
- Lebrato, J. (1990). Obtención de biogás a partir de residuos orgánicos urbanos: Experiencias en lecho fluidizado. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla. Sevilla.
- Li, Y., Park, S.Y., Zhu, J. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (1), 821-826.
- Mancomunidad de la Vega. (2016) Recuperado de: <http://web.lavegamancomunidad.es/>.
- Mata-Álvarez, J., Dosta, J., Macé, S., Astals, S. (2011). Co-digestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling. *Critical Reviews in Biotechnology* 31(2), 99-111.
- McCarty, P.L. (1981). “One hundred years of anaerobic treatment”. 2nd *International Symposium on Anaerobic Digestion*, Travemünde, Germany, 3-22.
- McInerney, M.J., Bryan, M.P. y Stafford, D.A. (1979). “Metabolic stages and energetics of microbial anaerobic digestion”. *Anaerobic Digestion*, Stafford W.y.H., ed., Applied Science, 91-98.
- Nagao, N., Tajima, N., Kawai, M., Niwa, C., Kurosawa, N., Matsuyama, T., Yusoff, F. M., Toda, T. (2012). Maximum organic loading rate for the single-stage wet anaerobic digestion of food waste. *Bioresource Technology* 118(0), 210-218.
- Ocaña Perez-Cerdá. Fco. J. 2011. “Biodigestor Anaerobio de Laboratorio” Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Universidad de Madrid.
- Parra, A. (2009). Lactosuero: importancia en la industria de alimentos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*.62 (1): 4967-4982.
- Pastor, J. (2002). Vertederos controlados. Problemática de los Lixiviados (p. 50-65).CSIC.

- Pozo, L. (2013). Desarrollo de canales abiertos de saneamiento con la ingeniería del agua posible. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla. Sevilla.
- Ruiz Cabrera, C. (2002). Aplicación de digestores anaerobios discontinuos en el tratamiento de aguas residuales industriales. Tesis doctoral Universidad de Sevilla.
- Soubes, M. (1994). “Microbiología de la digestión anaerobia”. *III Taller y Seminario Latinoamericano “Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales”*, Montevideo-Uruguay, 15-28.
- Speece, R.E., Boonyakitsombut, S., Kim, M., Azbar, N., Ursillo, P. (2006). Overview of Anaerobic Treatment: Thermophilic and Propionate Implications. *Water Environment Research* 78, 460-473.
- Stroot, P.G., McMahon, K.D., Mackie, R.I., Raskin, L. (2001). Anaerobic co-digestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions-I. Digester performance. *Water Research* 35(7), 1804-1816.
- Terreros-Mecalco, J., Olmos, A. et al; (2009). Digestión anaerobia en dos etapas de lodos primarios y secundarios con reactores anaerobios de flujo ascendente. Tesis doctoral, Universidad Autónoma Metropolitana
- Van Lier, J.B, Nidal, M., Zeeman, G. (2008). Anaerobic Wastewater Treatment. In: Henze, I., van Loosdrecht ,M.C.M., Ekama, G.A., Brdjanovic, D. (Ed.) *Biological Wastewater Treatment-Principles, Modelling and Design*, pp.415-456. IWA Publishing, London (UK).
- Vavilin, V.A., Angelidaki, I. (2005). Anaerobic degradation of solid material: Importance of initiation centers for methanogenesis, mixing intensity, and 2D distributed model. *Biotechnology and Bioengineering* 89(1), 113-122.
- Widdel, F. (1988). “Microbiology and ecology of sulfate- and sulfurreducing bacteria”. *Biology of anaerobic microorganisms*, Zehnder A.J.B., ed., 469.
- Zeikus, J.G. (1979). “Microbial populations in digesters”. *Anaerobic digestion*, Stafford, Whetley y Hughes, eds., Applied Science, 61-89.
- Zeikus, J.G. (1981). “Microbial intermediary metabolism in anaerobic digestion”. *2nd International Symposium on Anaerobic Digestion*, Travemünde, Germany, 23-36.

6. ANEXOS

6.1 Conocimiento de procesos.

Esta temperatura debe mantenerse durante todo el circuito. Puesto que la sonda de temperatura del termostato mide este dato en el baño térmico y no en el digestor, se realizan medidas de temperatura a las muestras de análisis extraídas del digestor, para comprobar que la temperatura requerida se mantiene en todo el circuito y en el interior de éste (Figura 166).



Figura 166: Imagen de la medida de temperatura a la muestra extraída del digestor (Fotografía: Antonio José Alonso).

A través de esta toma de datos se ajusta la temperatura en el baño térmico. La siguiente tabla muestra los datos de temperatura en la calibración del termostato:

Figura 167: Tabla de calibración de la temperatura de ensayo.

Días	1	2	3	4	5	25	50
Temperatura termostato °C	36	36	36	38	38	38	38
Temperatura digestor °C	33	34	34	36	36	35	36

Como muestran los datos de la figura 167, en el transcurso del circuito el agua pierde aproximadamente unos 2°C, por lo que ajustamos la temperatura del termostato en el baño térmico 2°C por encima de los 36°C requeridos para el óptimo desarrollo de la experiencia, para así conseguir esta temperatura en el digestor.

2.2.2.2.5 Válvulas de paso y gomas.

Para realizar todas las conexiones entre la unidad central y las complementarias se utilizan gomas de 8 mm de diámetro, uniones de PVC en forma de T o codos, bridas de ajuste, abrazaderas y grifo de cierre manual de PVC para las salidas. Todas las uniones deben de estar correcta y herméticamente conectadas para evitar pérdidas o fugas. En la figura 168 se muestran las conexiones enumeradas anteriormente.



Figura 168: Imagen de las conexiones y enlaces empleados en el montaje del digester anaerobio. (Fotografía: Antonio José Alonso).

El calibrado consiste en generar presión en el recipiente herméticamente cerrado, hasta que desplace la primera gota de agua al exterior por la goma de salida. Una vez generada, se introduce un volumen de aire conocido dentro del caudalímetro por medio de una jeringa (Figura 169), para ver si éste desplace al exterior un volumen de agua igual. Si el volumen de aire introducido coincide con el de agua desplazada, el funcionamiento del caudalímetro es óptimo.

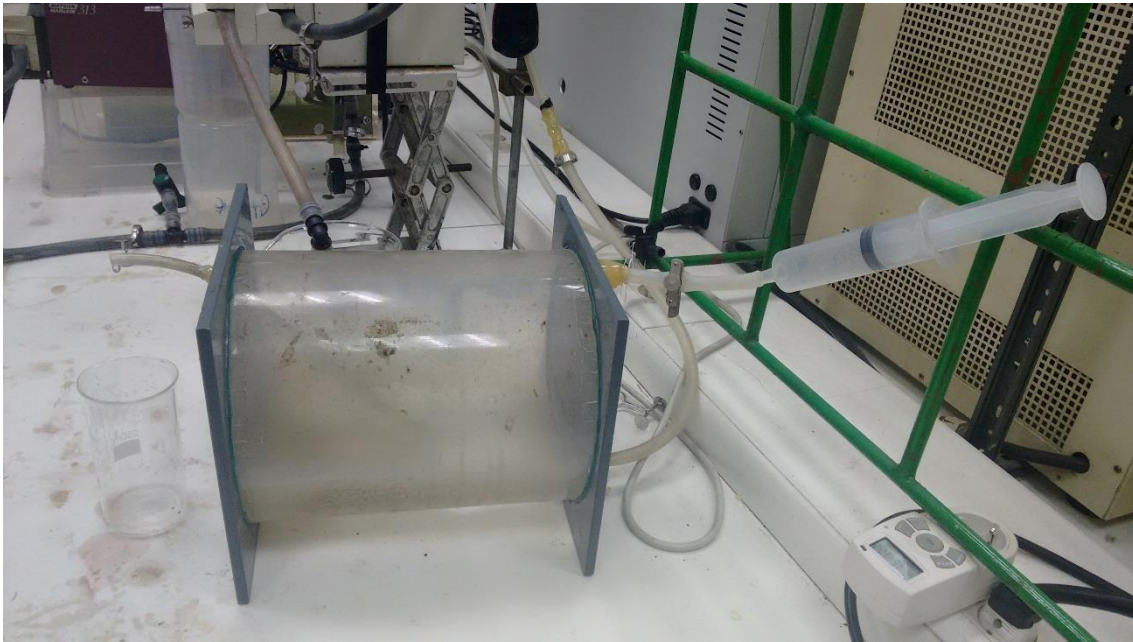


Figura 169: Imagen de la calibración del caudalímetro (Fotografía: Antonio José Alonso).

Este proceso se repite varias veces para realizar curvas de calibración y asegurar el buen funcionamiento del caudalímetro descartando fugas.

Figura 170: Tabla de calibración del caudalímetro.

Repeticiones	1	2	3	4	5
Volumen introducido L.	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Volumen desplazado L.	0,097	0,095	0,094	0,097	0,098

Una vez puesto a punto se conecta al digestor y comienza la medición.

6.1 Figuras

Figura 1: Esquema en el que se representan las principales etapas del metabolismo anaerobio así como los compuestos más representativos del proceso (Zeikus, 1979, 1981).

Figura 2: Composición esperada del biogás en la digestión anaerobia de diferentes compuestos en función del respectivo número de oxidación medio de los átomos de carbono (NMOC), (Van Lier et al, 2008).

Figura 3: Imagen de la muestra de Fango Digerido. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 4: Imagen de la EDAR de Copero (Sevilla). (Fotografía: Página web, www.EMASESA.com).

Figura 5: Imagen de la muestra de Fango Mixto. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 6: Imagen de la muestra de Residuo del deshuesado de la aceituna de mesa. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 7: Imagen de lixiviados en vertedero. (Fotografía: González, Y. 1995).

Figura 8: Imagen de la muestra de lixiviados. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 9: Imagen de la muestra de Glicerina. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 10: Imagen de la muestra de Lactosuero. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 11: Imagen de reactor de una sola etapa (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 12: Imagen del equipo agitador (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 13: Imagen de la preparación de BMP (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 14: Imagen del digester BMP listo para iniciar el proceso anaerobio (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 15: Imagen del Bicarbonato y los micronutrientes estabilizadores del proceso (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 16: Imagen de la unidad experimental completa (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 17: Imágenes del digestor anaerobio utilizado en el proceso. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 18: Imagen de la tapa superior del digestor anaerobio utilizado en el proceso. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 19: Imagen superior de la tapadera del digestor anaerobio utilizado en el proceso. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 20: Imagen de los diferentes sensores multiparamétricos utilizados en la toma de medidas. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 21: Imagen de las aberturas superiores en la tapa del digestor. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 22: Imagen de la bomba peristáltica utilizada en el proceso (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 23: Imagen de la instalación de alimentación y extracción de muestra utilizada en el proceso (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 24: Imagen de la varilla agitadora eléctrica utilizada para homogeneizar la mezcla. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 25: Imagen del baño térmico utilizado en el proceso (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 26: Imagen de la entrada del agua en el digestor (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 27: Imagen de la salida del agua desde el digestor (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 28: Imagen de la salida de recirculación en el digestor (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 29: Imagen de la entrada de recirculación en el digestor (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 30: Imagen de la bomba peristáltica utilizada para la recirculación (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 31: Imagen de la unión entre secciones en la bomba peristáltica utilizada en la recirculación (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 32: Imagen del caudalímetro de gas utilizado para la medida de los litros de biogás producidos (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 33: Imagen de las ventanas realizadas en el plástico que cubre el digestor para ver su estado (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 34: Imagen de la abrazadera que une la tapa al digestor (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 35: Imagen de las unidades complementarias al digestor anaerobio (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 36: Imagen del digestor cubierto por el plástico protector (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 37: Tabla con los datos específicos del método para la determinación de la DQO empleado en este estudio.

Figura 38: Imagen del indicador a utilizar en la valoración para la determinación de la DQO. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 39: Imagen de la valoración realizada para obtener el dato de alcalinidad. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 40: Imagen de la muestra calentada en la placa calefactora. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 41: Imagen de la clasificación de sólidos (Pozo, L. 2013).

Figura 42: Imagen de la campana de enfriamiento y la balanza de precisión (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 43: Imagen del equipo de medida de la presión (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 44: Imagen de la medida del biogás producido (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 45: Imagen del caudalímetro utilizado en el proceso anaerobio (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 46: Imagen del baño de NaOH utilizado para medir la composición del gas generado (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 47: Imágenes de la mufla u horno (derecha) y la estufa (izquierda) utilizada en el análisis.

Figura 48: Balanza de precisión utilizada para realizar las pesadas en los análisis. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 49: Imagen de las campanas de enfriamiento utilizadas en el análisis. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 50: Imagen del pH-metro utilizado en la medición. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 51: Imagen de la centrífuga utilizada en el análisis. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 52: Imagen de los dispensadores programados utilizados en el análisis. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 53: Bureta electrónica y manual utilizada en el proceso de análisis. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 54: Imagen de la placa calefactora utilizada en el análisis. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 55: Imagen del digestor utilizado para realizar el análisis de DQO. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 56: Tabla de Caracterizaciones de resultados.

Figura 57: Tabla de datos del volumen de gas obtenido con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Figuras 58: Gráfica diaria de la producción de gas obtenida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Figuras 59: Gráfica ampliación del punto crítico en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Figuras 60: Gráfica semanal de la producción de gas obtenida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Figura 61: Tabla con los datos de DQO obtenidos en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Figura 62: Gráfica de datos diarios de la DQO obtenida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Figura 63: Gráfica de datos semanales de la DQO obtenida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Figura 64: Gráfica de datos semanales de la DQO y volumen gas obtenida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Figura 65: Tabla de datos de materia volátil obtenida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Figura 66: Gráfica de los datos diarios de materia volátil obtenida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Figura 67: Datos semanales de la materia volátil obtenida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa

Figura 68: Tabla de datos de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Figura 69: Gráfica de los datos diarios de la alcalinidad y la acidez medida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Figura 70: Gráfica de los datos semanales de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Figura 71: Tabla de datos de pH y ratio AGV/Alcalinidad medidos en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Figura 72: Gráfica de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Figura 73: Gráfica de datos semanales de ratio AGV/ Alcalinidad y volumen gas medidos en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Figura 74: Gráfica de datos semanales de ratio pH y volumen gas medidos en el proceso con residuo del deshuesado de la aceituna de mesa.

Figura 75: Tabla de datos del volumen de gas obtenido en el proceso con lixiviado.

Figuras 76: Gráfica diaria de la producción de gas obtenida en el proceso con lixiviado.

Figuras 77: Gráfica semanal de la producción de gas obtenida en el proceso con lixiviado.

Figura 78: Tabla con los datos de DQO obtenidos en el proceso con lixiviado.

Figura 79: Gráfica de datos diarios de la DQO obtenida en el proceso con lixiviado.

Figura 80: Gráfica de datos semanales de la DQO obtenida en el proceso con lixiviado.

Figura 81: Gráfica de datos semanales de eliminación de la DQO y volumen gas obtenidos en el proceso con lixiviado.

Figura 82: Tabla de datos de materia volátil obtenida en el proceso con lixiviado.

Figura 83: Gráfica de los datos diarios de materia volátil obtenida en el proceso con lixiviado.

Figura 84: Datos semanales de la materia volátil obtenida en el proceso con lixiviado.

Figura 85: Tabla de datos de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con lixiviado.

Figura 86: Gráfica de los datos diarios de la alcalinidad y la acidez medida en el proceso con lixiviado.

Figura 87: Gráfica de los datos semanales de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con lixiviado.

Figura 88: Tabla de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con lixiviado.

Figura 89: Gráfica de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con lixiviados.

Figura 90: Gráfica de datos semanales de ratio AGV/ Alcalinidad y volumen gas medidos en el proceso con lixiviado.

Figura 91: Gráfica de datos semanales de pH y volumen gas medidos en el proceso con lixiviado.

Figura 92: Tabla de datos del volumen de gas obtenido con lixiviado.

Figuras 93: Gráfica diaria de la producción de gas obtenida en el proceso con Glicerina.

Figuras 94: Gráfica semanal de la producción de gas obtenida en el proceso con glicerina.

Figura 95: Tabla con los datos de DQO obtenidos en el proceso con glicerina.

Figura 96: Gráfica de datos diarios de la DQO obtenida en el proceso con glicerina.

Figura 97: Gráfica de datos semanales de la DQO obtenida en el proceso con glicerina.

Figura 98: Gráfica de datos semanales de la eliminación de DQO y volumen gas obtenidos en el proceso con glicerina.

Figura 99: Tabla de datos de materia volátil obtenida en el proceso con glicerina.

Figura 100: Gráfica de los datos diarios de materia volátil obtenida en el proceso con glicerina.

Figura 101: Datos semanales de la materia volátil obtenida en el proceso con glicerina

Figura 102: Tabla de datos de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con glicerina.

Figura 103: Gráfica de los datos diarios de la alcalinidad y la acidez medida en el proceso con glicerina.

Figura 104: Gráfica de los datos semanales de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con glicerina

Figura 105: Tabla de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con glicerina

Figura 106: Gráfica de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con glicerina.

Figura 107: Gráfica de datos de ratio AGV/ Alcalinidad y volumen gas medidos en el proceso con glicerina.

Figura 108: Gráfica de datos de pH y volumen gas medidos en el proceso con glicerina

Figura 109: Grafica comparativa de los residuos estudiados anteriormente.

Figura 110: Tabla de volumen diario producido en BMP con glicerina como residuo.

Figura 111: Tabla de volumen de gas total acumulado en la experiencia.

Figura 112: Gráfica de volumen diario de gas producido en las distintas mezclas estudiadas.

Figura 113: Tabla de composición del gas medido.

Figura 114: Tabla de medidas de pH.

Figura 115: Tabla de datos del volumen de gas obtenido con glicerina.

Figuras 116: Gráfica diaria de la producción de gas obtenida en el proceso con glicerina.

Figuras 117: Gráfica semanal de la producción de gas obtenida en el proceso con glicerina.

Figura 118: Tabla con los datos de DQO obtenidos en el proceso con glicerina.

Figura 119: Gráfica de datos diarios de la DQO obtenida en el proceso con glicerina.

Figura 120: Gráfica de datos semanales de la DQO obtenida en el proceso con glicerina.

Figura 121: Gráfica de datos semanales de la eliminación de DQO y volumen gas obtenidos en el proceso con glicerina

Figura 122: Tabla de datos de materia volátil obtenida en el proceso con glicerina.

Figura 123: Gráfica de los datos diarios de materia volátil obtenida en el proceso con glicerina.

Figura 124: Datos semanales de la materia volátil obtenida en el proceso con glicerina

Figura 125: Tabla de datos de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con glicerina.

Figura 126: Gráfica de los datos diarios de la alcalinidad y la acidez medida en el proceso con glicerina.

Figura 127: Gráfica de los datos semanales de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con glicerina.

Figura 128: Tabla de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con glicerina.

Figura 129: Gráfica de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con glicerina.

Figura 130: Gráfica de datos semanales de ratio AGV/ Alcalinidad y volumen gas medidos en el proceso con glicerina.

Figura 131: Gráfica de datos semanales de ratio pH y volumen gas medidos en el proceso con glicerina.

Figura 132: Tabla de datos del volumen de gas obtenido con lactosuero.

Figuras 133: Gráfica diaria de la producción de gas obtenida en el proceso lactosuero.

Figuras 134: Gráfica semanal de la producción de gas obtenida en el proceso con lactosuero.

Figura 135: Tabla con los datos de DQO obtenidos en el proceso con lactosuero.

Figura 136: Gráfica de datos diarios de la DQO obtenida en el proceso con lactosuero.

Figura 137: Gráfica de datos semanales de la DQO obtenida en el proceso con lactosuero.

Figura 138: Gráfica de datos semanales de la eliminación de DQO y volumen gas obtenidos en el proceso con lactosuero.

Figura 139: Tabla de datos de materia volátil obtenida en el proceso con lactosuero.

Figura 140: Gráfica de los datos diarios de materia volátil obtenida en el proceso con lactosuero.

Figura 141: Datos semanales de la materia volátil obtenida en el proceso con lactosuero.

Figura 142: Tabla de datos de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con lactosuero.

Figura 143: Gráfica de los datos diarios de la alcalinidad y la acidez medida en el proceso con lactosuero.

Figura 144: Gráfica de los datos semanales de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con lactosuero.

Figura 145: Tabla de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con lactosuero.

Figura 146: Gráfica de datos diarios de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con lactosuero.

Figura 147: Gráfica de datos semanales de ratio AGV/ Alcalinidad y volumen gas medidos en el proceso.

Figura 148: Gráfica de datos semanales de pH y volumen gas medidos en el proceso.

Figura 149: Tabla de datos del volumen de gas obtenido la mezcla de residuos.

Figuras 150: Gráfica diaria de la producción de gas obtenida en el proceso con la mezcla de residuos.

Figuras 151: Gráfica semanal de la producción de gas obtenida en el proceso con la mezcla de residuos.

Figura 152: Tabla con los datos de DQO obtenidos en el proceso con la mezcla de residuos.

Figura 153: Gráfica de datos diarios de la DQO obtenida en el proceso con la mezcla de residuos.

Figura 154: Gráfica de datos semanales de la DQO obtenida en el proceso con la mezcla de residuos

.Figura 155: Gráfica de datos semanales de la eliminación de DQO y volumen gas obtenidos en el proceso con la mezcla de residuos

Figura 156: Tabla de datos de materia volátil obtenida en el proceso con la mezcla de residuos.

Figura 157: Gráfica de los datos diarios de materia volátil obtenida en el proceso con la mezcla de residuos.

Figura 158: Datos semanales de la materia volátil obtenida en el proceso con la mezcla de residuos.

Figura 159: Tabla de datos de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con la mezcla de residuos.

Figura 160: Gráfica de los datos diarios de la alcalinidad y la acidez medida en el proceso con la mezcla de residuos.

Figura 161: Gráfica de los datos semanales de la alcalinidad y acidez medida en el proceso con la mezcla de residuos

Figura 162: Tabla de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con la mezcla de residuos.

Figura 163: Gráfica de datos de pH y ratio AGV/ Alcalinidad medidos en el proceso con la mezcla de residuos.

Figura 164: Gráfica de datos semanales de ratio AGV/ Alcalinidad y volumen gas medidos en el proceso con la mezcla de residuos.

Figura 165: Gráfica de datos semanales de pH y volumen gas medidos en el proceso con la mezcla de residuos.

Figura 166: Imagen de la medida de temperatura a la muestra extraída del digestor (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 167: Tabla de calibración de la temperatura de ensayo.

Figura 168: Imagen de las conexiones y enlaces empleados en el montaje del digestor anaerobio. (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 169: Imagen de la calibración del caudalímetro (Fotografía: Antonio José Alonso).

Figura 170: Tabla de calibración del caudalímetro.

