

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**BIOMETANIZACIÓN DE RESIDUOS VEGETALES
SOMETIDOS A HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA Y CODIGERIDOS
CON AYUDA DE BACILO Y LODOS DE DEPURADORA**

VÍCTOR HERNÁNDEZ BARRIOS

Tutoras:

ANDREA BRITO ALAYÓN

KARINA RODRÍGUEZ ESPINOZA

TENERIFE, MARZO 2024

ÍNDICE

RESUMEN / ABSTRACT	1
1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. Contexto actual:	3
1.2. Alternativas evaluadas para la gestión de los residuos orgánicos:	7
1.3. Cuantificación de residuos orgánicos:	8
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	15
2.1. Biometanización:	15
2.2. Hidrólisis enzimática:	17
2.3. Productos obtenidos:.....	21
3. OBJETIVOS.....	22
4. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL	23
4.1. Productos utilizados:.....	23
4.2. Caracterización de sólidos totales, fijos y volátiles:	24
4.3. Hidrólisis enzimática:	25
4.4. Digestión anaerobia:	28
5. RESULTADOS EXPERIMENTALES	34
5.1. Introducción:	34
5.2. Experimento 1:	39
5.3. Experimento 2:	42
5.4. Experimento 3:	45
5.5. Experimento 4:	48
5.6. Experimento 5:	51
5.7. Experimento 6:	54
5.8. Experimento 7:	57
5.9. Experimento 8:	60
6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	63
6.1. Introducción:	63
6.2. Análisis general de las curvas de producción:.....	63
6.3. Análisis general de las curvas de metano:	65
6.4. Análisis general de las curvas de alcohol:.....	67
6.5. Influencia del tipo residuo:.....	69
6.6. Efectividad del inóculo:	71
6.7. Efectividad de la hidrólisis enzimática:	73
6.8. Resumen de resultados experimentales:	75
7. CONCLUSIONES / CONCLUSIONS	76
8. RECOMENDACIONES	78
9. BIBLIOGRAFÍA.....	79
10. ANEXOS	81
10.1. Anexo I: Datos de producción obtenidos:.....	81
10.2. Anexo II: Datos de composición obtenidos:.....	82

RESUMEN / ABSTRACT

En esta investigación se ha realizado el estudio del proceso de producción de biogás a partir de residuos (biometanización¹), por tratarse de un recurso energético renovable, abundante y que contribuye en la transición hacia un modelo económico-social sostenible por dos vías:

- El desplazamiento del modelo energético actual basado en el uso de combustibles no renovables, contaminantes y perjudiciales para el medio ambiente y la sociedad.
- La gestión de residuos de una forma menos dañina para el medioambiente basada en la minimización de residuos que son vertidos y su valorización económica.

El estudio trata la biometanización de residuos vegetales, en búsqueda de un proceso alternativo para valorizar residuos de tipo agrícola y procedentes de labores de jardinería o de limpieza forestal. Se propone un proceso ayudado por un pretratamiento aeróbico (hidrólisis enzimática²) y por una bacteria comercial (bacilo), además del empleo de un inóculo (lodos de depuradora) y residuos orgánicos domésticos (FORSU³).

La efectividad de este proceso ha sido estudiada a través de la medida de la cantidad y composición del gas producido en varios experimentos bajo condiciones diferentes, estudiando principalmente la eficacia de la hidrólisis enzimática, del uso de inóculo y del tipo de mezcla a tratar.

El estudio ha consistido en el seguimiento de la degradación de residuos de poda de césped (césped⁴) y de residuos agrícolas mezclados en bruto (mezcla⁵), en diferentes condiciones de aplicación de inóculo e hidrólisis enzimática. Las diferentes muestras han sido degradadas en biodigestores a escala de laboratorio captándose diariamente el gas producido durante el proceso en frascos medidores de volumen y posteriormente siendo analizados mediante un cromatógrafo de gases.

Los datos de volumen y composición han proporcionado las curvas de distribución de composición y de producción para cada experimento, que se han sido comparadas para valorar la efectividad del proceso encontrando principalmente que:

- La metanización mejora con el uso de inóculo.
- La metanización mejora con la hidrólisis enzimática si su aplicación es conjunta con el uso de inóculo.
- Se sospecha la producción de alcoholes en dicho proceso.

¹ **Biometanización:** hace referencia al proceso de digestión anaerobia de residuos. Se describe en el apartado 2.1

² **Hidrólisis enzimática:** hace referencia al proceso de digestión aerobia como proceso de pretratamiento de residuos sometidos a digestión anaerobia. Se describe en el apartado 2.2

³ **FORSU:** “Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos”. En este estudio el FORSU hace referencia a una muestra de residuos orgánicos urbanos

⁴ De aquí en adelante se usa el término “**césped**” para referirse a las muestras de césped

⁵ De aquí en adelante se usa el término “**mezcla**” para referirse a las muestras de residuos vegetales mezclados en bruto

In this research, the study of the biogas production process from waste (biomethanization⁶) has been carried out, as it is a renewable energy resource, abundant and that contributes to the transition towards a sustainable economic-social model in two ways:

- The displacement of the current energy model based on the use of non-renewable, polluting fuels that are harmful to the environment and society.
- The management of waste in a less harmful way for the environment based on the minimization of waste that is discharged and its economic recovery.

The study deals with the biomethanization of vegetable waste, thus seeking an alternative process to recover agricultural waste and from gardening or forest cleaning. A process aided by an aerobic pretreatment (enzymatic hydrolysis⁷) and by a commercial bacterium (bacillus) is proposed, in addition to the use of inoculum (sewage sludge) and domestic organic waste (FORSU⁸).

The effectiveness of this process has been studied through the measurement of the amount and composition of the gas produced in several experiments under different conditions, mainly studying the efficiency of enzymatic hydrolysis, the use of inoculum and the type of mixture to be treated.

The study has consisted of monitoring the degradation of lawn pruning residues (turf⁹) and agricultural residues mixed raw (mixture¹⁰), under different conditions of application of inoculum and enzymatic hydrolysis. The different samples have been degraded in biodigesters at laboratory scale, capturing the gas produced during the process daily in volume measuring bottles and subsequently being analyzed by a gas chromatograph.

The volume and composition data have provided the composition and production distribution curves for each experiment, which have been compared to assess the effectiveness of the process, mainly finding that:

- Methanization improves with the use of inoculum.
- Methanization improves with enzymatic hydrolysis if its application is combined with the use of inoculum.
- The production of alcohols in this process is suspected.

⁶ **Biomethanization:** refers to the process of anaerobic digestion of waste. It is described in section 2.1

⁷ **Enzymatic hydrolysis:** refers to the aerobic digestion process as a process of pretreatment of waste subjected to anaerobic digestion. It is described in section 2.2

⁸ **FORSU:** "Organic Fraction of Urban Solid Waste". In this study, FORSU refers to a sample of urban organic waste

⁹ From here on the term "**turf**" is used to refer to turf samples

¹⁰ Hereinafter the term "**mixture**" is used to refer to samples of raw mixed plant residues

1. INTRODUCCIÓN

1.1. CONTEXTO ACTUAL:

Los principales beneficios de la biometanización son su interés como recurso energético renovable y como proceso de valorización de residuos, de modo que sirve de medida de ayuda en dos importantes objetivos que plantean los modelos de gestión ambiental: la producción de energía y la gestión de residuos.

Actualmente la **producción energética** a nivel mundial depende principalmente de los combustibles fósiles con una contribución de más de un 85%, mientras que el 15% restante se debe a las energías renovables (International Energy Agency, 2018). Pero este modelo energético es completamente ineficiente y se debe fomentar el uso de las energías renovables, así como políticas de desarrollo sostenible principalmente por dos causas: los problemas ambientales derivados del uso de los combustibles fósiles y sus problemas de disponibilidad.

Una causa muy importante para favorecer el desarrollo de un modelo energético más sostenible son los problemas ambientales derivados del uso de combustibles fósiles. La demanda energética mundial crece de manera descontrolada y está principalmente ligada a los combustibles fósiles, que producen compuestos perjudiciales cuya gestión no es nada eficiente. Son muchas las ciudades que sufren episodios de alta contaminación y que será causa de un gran número de muertos, como ocurre en Beijing, donde se ha superado el límite de exposición diario para partículas en suspensión hasta más de diez veces (National Geographic, 2018). Los combustibles fósiles además de producir gases contaminantes producen gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático y que es causa de olas de calor, sequías, catástrofes naturales y destrucción de ecosistemas.

Otra causa para favorecer el desarrollo de un modelo energético más sostenible son los problemas de disponibilidad de los combustibles fósiles. Según National Geographic (2018) nos encontramos cerca del cénit de todos los combustibles fósiles, lo que implica que cada vez serán más difícil de obtener y más caros, hasta que finalmente se agoten. En el caso del petróleo desde hace años se habla de que nos encontramos en su cénit, mientras que algunos expertos señalan que estamos a punto de alcanzar el del carbón y en el caso del gas natural y el uranio se prevé que a lo largo de este siglo se alcanzará. Por otro lado, las energías renovables son prácticamente inagotables, pero además son muy versátiles y tienen una alta disponibilidad, lo que podría hacer a cualquier región autosuficiente energéticamente. La multitud de formas en la que se encuentra le da una gran versatilidad, ya que puede obtenerse de la radiación solar, del calor terrestre, del movimiento de agua o el viento y de la energía contenida en los residuos. Además, las energías renovables esconden un gran potencial todavía por desarrollar y un ejemplo de esto es el dato que sugiere que una hora de sol se corresponde con más energía de la necesaria para abastecer a la población mundial durante un año (National Geographic, 2018). Este modelo energético también es representativo en España donde el consumo de energía a partir de las renovables no llega al 15%, como se observa en el Gráfico 1.

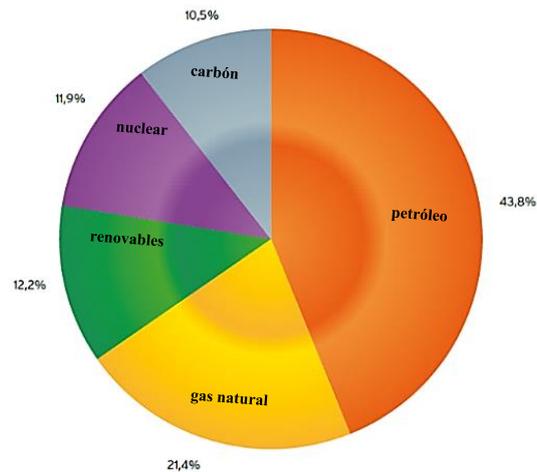


GRÁFICO 1. CONSUMO ENERGÉTICO EN ESPAÑA (ASOCIACIÓN DE EMPRESAS DE ENERGÍAS RENOVABLES, 2018)

A parte de esta alta dependencia histórica de los combustibles fósiles, España depende energéticamente casi completamente del exterior. Esta dependencia ha llegado a ser hasta del 81,3%, lo que significa más de veinte puntos por encima del promedio europeo. Con el tiempo esta dependencia ha ido disminuyendo ligeramente debido a las energías renovables, como se muestra en el Gráfico 2.

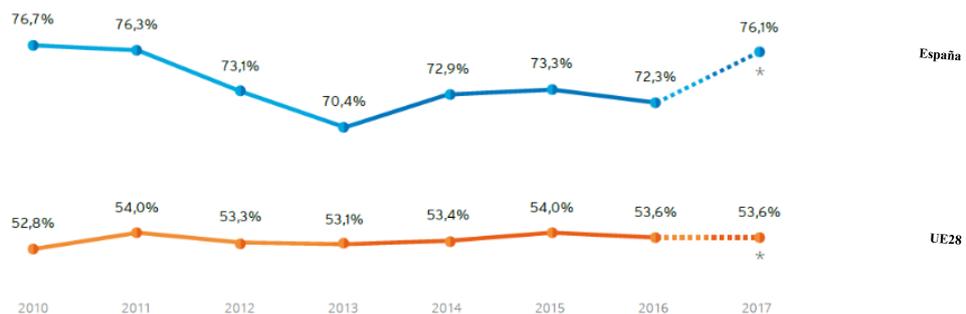


GRÁFICO 2. DEPENDENCIA ENERGÉTICA DE ESPAÑA CON RESPECTO A LA UE28 (ASOCIACIÓN DE EMPRESAS DE ENERGÍAS RENOVABLES, 2018)

Debido a la problemática del modelo energético actual, con el paso de los años ha habido un progresivo desarrollo de las energías renovables y de políticas de desarrollo sostenible, como lo muestran los objetivos climáticos propuestos por la UE o los acuerdos internacionales como el Protocolo de Kioto o el Acuerdo de París. La UE establece políticas vinculantes para garantizar los objetivos marcados (Comisión Europea, 2016):

- Objetivos para 2020: una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20%, un aumento de la eficiencia energética en un 20% y alcanzar un 20% consumo energético procedente de energías renovables.
- Objetivos para 2030: una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en un 40%, un aumento de la eficiencia energética en un 32,5% y alcanzar un 32% consumo energético procedente de energías renovables.
- Objetivo para 2050 de una economía baja en carbono y cuyas premisas están todavía por prefijar.

Actualmente, según la Comisión Europea (2016), la UE iba en camino de cumplir los objetivos EU2020, ha ido cumpliendo las obligaciones marcadas por el Protocolo de Kioto y está en fase de desarrollo de políticas que ayuden a alcanzar los objetivos EU2030. Entre las medidas adoptadas o por adoptar para alcanzar una política energética sostenible se encuentran: el fomento al autoconsumo ciudadano, prohibiendo cualquier tipo de impuesto de la misma clase que el impuesto al sol (Certificados Energéticos,

2018); evitar la competencia entre el sector energético y el alimenticio, al no permitir el uso de aquellos biocombustibles de primera generación de carácter alimenticio y al tampoco contabilizarlos en el objetivo de 2030 que pretende que el 14% del combustible sea de origen renovable (Certificados Energéticos, 2018); la inclusión en el Código Técnico de la Edificación de la certificación energética de edificios.

La evolución mundial en el uso de las energías renovables se puede ver plasmada en el Gráfico 3, y los avances que se pueden alcanzar de acuerdo con los objetivos marcados internacionalmente son muy amplios.

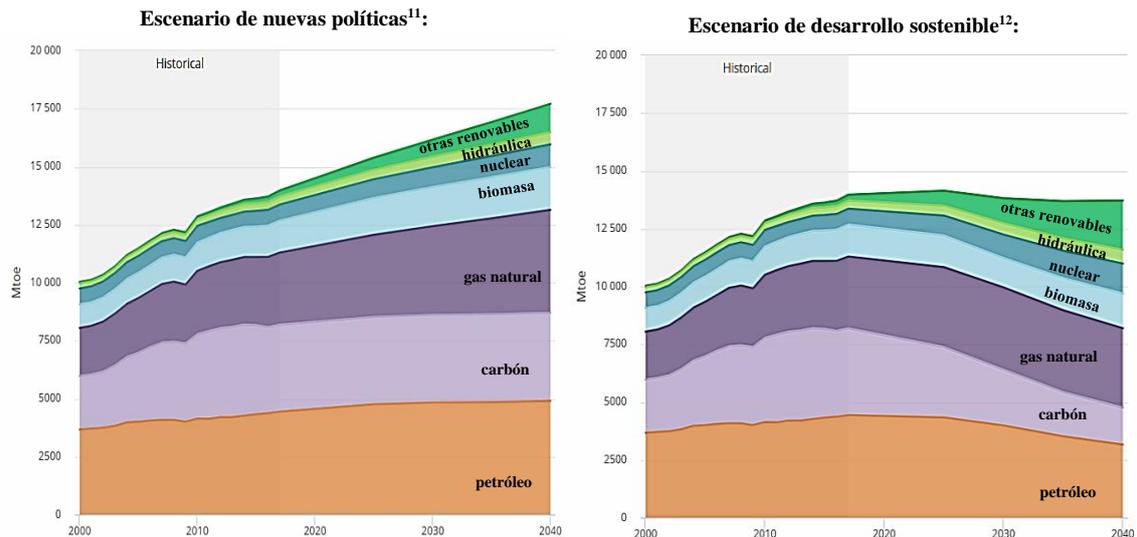


GRÁFICO 3. EVOLUCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA MUNDIAL (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018)

Por todos estos cambios hacia un escenario de desarrollo sostenible hay que aprovechar todas las oportunidades posibles y una oportunidad interesante es la de aprovechar los residuos para generar biocombustibles. Los biocombustibles producidos a partir de residuos no son la alternativa al petróleo debido a su baja productividad, pero son un recurso energético complementario para un nuevo marco energético sostenible y su principal atractivo radica en que solucionaría otro problema actual muy importante relacionado con la **gestión de residuos**.

En Tenerife todos los residuos domésticos generados en la isla llegan al complejo ambiental, los residuos recogidos selectivamente son enviados a plantas específicas de reciclaje, y el resto, la basura en masa, son separados y procesados en la planta de separación “todo en uno” para recuperar la mayor parte posible de residuos y verter lo que no es posible recuperar. Los residuos se separan de forma manual y mecánica consiguiendo recuperar una parte de la materia orgánica y una parte de los residuos que pueden ser reciclados (papel, envases, vidrio, etc.). Sin embargo, el porcentaje de residuos que se pueden aprovechar de la basura en masa en esta planta es relativamente bajo, puesto que al venir mezclados con materia orgánica su calidad no es la adecuada, además de la cantidad de tecnología que sería necesario para ello. La materia orgánica recuperada es enviada a una planta de bioestabilización y de esta fracción se obtiene un compost que puede ser utilizado en jardinería. Los rechazos del proceso son vertidos, para lo cual se depositan en celdas de vertido preparadas para almacenar los residuos de forma segura y recoger los subproductos que se producen en su interior debido a la descomposición de estos: los gases de vertedero y los lixiviados.

¹¹ Incorpora políticas energéticas existentes, así como una evaluación de los resultados que probablemente surjan de la implementación de las intenciones políticas anunciadas

¹² Esboza un enfoque integrado para lograr objetivos acordados internacionalmente sobre cambio climático, calidad del aire y acceso universal a la energía moderna

Según el Instituto Canario de Estadística (2016), cada habitante canario genera unos 500 kg de residuos al año y de los cuales solo 40 se separan para su reciclado. Según el informe llevado a cabo por la Comisión de Seguimiento de la Gestión de Residuos en Tenerife entre enero y julio (lo que corresponde a medio año) de 2017 (Acta N°10) se generaron 328.000 toneladas de residuos domésticos y de los cuales 245.000 toneladas fue la cantidad de basura en masa tratada en la planta de separación. De dicha cantidad de basura 42.000 toneladas fueron bioestabilizadas y de esa cantidad bioestabilizada 19.000 toneladas fueron finalmente destinadas a compostaje. Tras dicha separación de la basura en masa se produjeron 110.000 toneladas de rechazos que fueron destinados a las celdas de vertido. El complejo debido a sus celdas de vertido ha producido en ese periodo 3.185.000 m³ de biogás que se ha destinado a la producción de energía eléctrica produciendo 5.500 MW.

En Canarias el porcentaje de residuos destinados a vertido se sitúa en torno al 80 %, mientras que el porcentaje de recuperación total se sitúa en torno al 20%, siendo el porcentaje de residuos biodegradables vertidos del orden del 70 %. Las normativas actuales establecen objetivos de un 35% de vertido total, de un 50% en concepto de reutilización y reciclaje y de un 35% de reducción en el vertido de residuos biodegradables (Gobierno de Canarias, 2021). En la Tabla 1 se muestran los diferentes tratamientos a los que son sometidos los residuos.

Año	Total (T)	Vertido				Material reciclado			
		Directo (T)	Rechazos (T)	Estabilizado (T)	Sin tratar (%)	Recogida separada (T)	Recogida en masa (T)	Biorresiduo obtenido (T)	Total reciclado (%)
2011	528.870	402.777	75.312	0	76,2	25.534	6.519	13.190	8,6
2012	495.961	362.934	81.589	0	73,2	25.257	6.838	15.412	9,6
2013	476.725	99.236	260.430	32.108	20,8	24.467	20.398	27.225	15,1
2014	496.188	118.069	268.345	33.253	23,8	25.597	14.084	25.761	13,2
2015	506.779	82.660	329.455	15.754	16,3	26.530	18.743	17.228	12,3
2016	529.892	97.030	316.092	21.106	18,3	29.027	21.284	32.660	15,7
2017	552.343	83.662	359.291	21.438	15,1	32.006	20.435	19.042	12,9
2018	557.509	8.079	463.385	6.539	1,4	40.418	22.078	7.027	12,5

TABLA 1. TRATAMIENTO DE RESIDUOS EN TENERIFE (GOBIERNO DE CANARIAS, 2021)

Los residuos que se generan en la isla se convierten en un importante problema que se agrava debido al carácter insular del territorio. Siendo los factores que contribuyen a este problema los siguientes:

- El aumento de la población.
- Los cambios en los hábitos de consumo de la población.
- Los grandes volúmenes de residuos procedentes del transporte de productos.
- El carácter turístico de la isla.
- Los problemas de eliminación provocados por la falta de suelo para la ubicación de vertederos controlados.

Además de la gran cantidad de residuos que se generan y la poca disponibilidad de suelo para su vertido, su gestión se dificulta debido a la elevada dispersión de la población insular y a la cultura de la basura en masa y vertido arraigada en la población. Debido a estos factores Tenerife se encuentra distante de los objetivos medioambientales y la capacidad del Complejo Ambiental para asumir los residuos se encuentra limitada. Con el ritmo de generación de residuos previstos, conservando el modelo actual de verter la fracción no reciclable en las celdas de vertido del Complejo Ambiental, se estima que, en un horizonte de aproximadamente 25 años, sería necesario plantear la localización de un nuevo complejo ambiental. Ello es una opción de difícil viabilidad si se tiene en consideración que, en una isla densamente poblada, con gran dispersión edificatoria y con un alto porcentaje de espacios naturales protegidos, habría que disponer de una zona de dimensiones similares a la actual, con condiciones hidrogeológicas y climáticas favorables,

con buenas condiciones de accesibilidad y a una cierta distancia de los núcleos de población (Cabildo de Tenerife, 2009). Por lo tanto, se pretende conseguir un sistema de gestión lo más autosuficiente posible que evite la exportación de residuos, dado que ello supone, entre otras cuestiones, un incremento significativo en los costes de gestión de estos y la tasa de basura que paga la población en los ayuntamientos. En la Tabla 2 se muestra el crecimiento demográfico y de residuos en Tenerife.

Año	Población	Generación (kg/hab·año)	Residuos (t/año)
2004	902.992	565	510.194
2016	1.121.656	510	618.515
<i>Crecimiento medio anual</i>	+2,48%	-1,00%	+1,82%

TABLA 2. CRECIMIENTO POBLACIONAL Y DE GENERACIÓN DE RESIDUOS (CABILDO DE TENERIFE, 2009)

En este contexto se desarrolla el Plan Territorial Especial de Ordenación de Residuos (PTEOR) desarrollado por el Cabildo de Tenerife en 2009 y el Plan Integral de Residuos de Canarias (PIRCAN) publicado en 2021 por el Gobierno de Canarias.

1.2. ALTERNATIVAS EVALUADAS PARA LA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS:

Los residuos orgánicos resultan una fracción muy importante de los residuos generados, pues además de los residuos ganaderos, agrícolas y forestales, hay que considerar la fracción biodegradable de la basura en masa doméstica, que puede llegar a resultar el 50% y que apenas recibe tratamiento. El gran volumen de estos junto a su potencial energético los hace muy atractivos para producir biogás siempre y cuando estas fracciones se puedan recuperar. La biometanización es una alternativa interesante como tratamiento para los residuos orgánicos de la isla y es la que se plantea en este trabajo de fin de grado y que además es compatible con los planes de gestión de residuos actuales.

Actuaciones establecidas por el PTEOR:

El PTEOR dicta que la materia orgánica doméstica recogida selectivamente será tratada en plantas de compostaje ubicadas a tal efecto por el presente plan, mientras que los residuos agrícolas, ganaderos y forestales esperarán al desarrollo de plantas de compostaje de carácter privado (Cabildo de Tenerife, 2009), pretendiendo así formar una red insular de tratamiento de la materia orgánica. No obstante, en caso de que la iniciativa privada no se hiciese cargo de dichos residuos podrán ser tratados por la red de compostadoras del plan evitándose de esta forma una incorrecta gestión de estos.

Tanto la gestión de los residuos agrícolas como ganaderos es responsabilidad de los agricultores y ganaderos, los cuales deberán realizar una correcta gestión de estos. La alternativa para su tratamiento será el modelo de gestión tradicional, basado en su aprovechamiento como comida de ganado y su uso directo como abono. No obstante, las cualidades fertilizantes de estos residuos los hacen idóneos para su empleo en compostaje, de forma que, de manera excepcional podrán incorporarse a la red de compostaje de la materia orgánica doméstica recogida selectivamente, siendo el particular el que se encargue de los costes. Los restos vegetales y animales pueden constituir una fuente de calidad de carbono, necesario para crear una relación carbono / nitrógeno adecuada para el proceso de compostaje. Por lo tanto, aquellos residuos no empleados en las labores tradicionales serán susceptibles de emplearse en las plantas compostadoras.

Los residuos forestales se gestionarán a partir del modelo de gestión tradicional basado en el aprovechamiento de estos para la obtención de pinocha, para el ganado y uso agrícola, horquetas, etc., y todos aquellos que no pudieran ser aprovechados de forma tradicional, se depositarán, cuando sea necesario,

en las plantas de transferencia y desde estas plantas pasarían a las plantas de compostaje para la elaboración de compost (Cabildo de Tenerife, 2009).

Actuaciones establecidas por el PIRCAN:

El PIRCAN establece actuaciones para aumentar fuertemente las recogidas separadas de residuos reciclables y su aprovechamiento. Se destacan las siguientes medidas:

- **Medidas generales para mejorar el sistema de información:** realización de estudios periódicos de composición y desarrollo de una aplicación que permita a instituciones, productores y gestores introducir los datos de producción y gestión de residuos
- **Medidas generales para fomentar la reducción de residuos y fomentar la recogida separada:** redacción y aprobación de la normativa relativa al impuesto para desincentivar el vertido de residuos
- **Medidas para disminuir el desperdicio alimenticio:** campañas de divulgación sobre el desperdicio alimentario y programas de autocompostaje
- **Medidas para el desarrollo de la recogida separada de biorresiduos y su aprovechamiento:** sustitución paulatina del bioestabilizado producido en los complejos ambientales por compost producido a partir de la recogida selectiva ya que este empezará a computar como eliminación, obligación a los Cabildos insulares para la ejecución en un plazo de 3 años de los proyectos necesario para se disponer de las instalaciones para el tratamiento de los biorresiduos procedentes de la recogida separada, revisión y modificación en caso de las previsiones lo sugieran de los planes de residuos de cada isla y de las ordenanzas de gestión de residuos, campañas de concienciación para el fomento de la separación de las fracciones orgánicas, obligación a la entrega separada de biorresiduos procedentes de plantas de procesado de alimentos y del sector comercial, estudios orientados a garantizar el empleo del compost y del bioestabilizado en Canarias en la agricultura, en la jardinería pública y privada, y también en la regeneración y reforestación de espacios y suelos degradados
- **Medidas de apoyo en la valorización de biorresiduos:** disponer de nuevas plantas de biometanización para tratar los biorresiduos procedentes de la recogida separada, cerrar de tratamiento de los biorresiduos a partir del aprovechamiento del digestato para la fabricación de compost.

1.3. CUANTIFICACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS:

1.3.1 VÍAS POTENCIALES DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS:

Con la finalidad de tener una idea de la potencial aplicación de los residuos orgánicos en Tenerife como materia prima para la producción de biogás, se muestra una identificación y cuantificación de los residuos orgánicos de la isla según su tipo.

a. Residuos domésticos de origen domiciliario (RD):

Son los residuos que se generan en los hogares, exceptuando los residuos especiales. Estos residuos son gestionados a través de la recogida municipal de la basura en masa, los sistemas de recogida selectiva y de los puntos limpios. En la Tabla 3 se presenta una estimación de la generación de residuos orgánicos domésticos contenidos en la basura en masa:

Tipo	Residuos orgánicos (t/año)
Basura en masa	157.650 ¹³

TABLA 3. GENERACIÓN DE RD ORGÁNICOS (2004) (CABILDO DE TENERIFE, 2009)

En 2018 se registraron 507.000 T de residuos municipales mezclados (incluyendo asimilables) y se produjeron 6.500 T de bioestabilizado y 7.000 T de biorresiduos procedentes de los residuos municipales mezclados y de la recogida selectiva (Gobierno de Canarias, 2021).

b. Residuos asimilables a domésticos (RICIA):

Son los residuos municipales, comerciales, industriales y de servicios que se incorporan a la cadena de gestión de residuos domésticos, exceptuando por tanto a los residuos especiales y peligrosos. Estos residuos son gestionados a través de la recogida municipal y por gestores autorizados. En la Tabla 4 se presenta la generación de residuos orgánicos presentes en los residuos municipales, comerciales e industriales según su procedencia:

Tipo	Residuos orgánicos (t/año)
Municipales no especificados	25.616
Parques y jardines	5.679
Limpieza viaria	1.731
Limpieza de alcantarillado	216
Lodos	1.945
Mercados	10.914
Cocinas y restaurantes	11

TABLA 4. GENERACIÓN DE RICIA ORGÁNICOS (2004) (CABILDO DE TENERIFE, 2009)

En 2018 se registraron 29 T de residuos biodegradables de cocina, 4.814 T de residuos biodegradables de parques y jardines procedentes de recogidas separadas, 2.367 T de residuos de mercados mezclados y 3.228 T de residuos de limpieza viaria mezclados en Tenerife (Gobierno de Canarias, 2021).

c. Lodos de depuradora:

Son los lodos que se generan en las Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) tras el proceso de depuración de aguas residuales. El lodo de depuradora es un residuo con un alto coeficiente de fermentabilidad y con cualidades fertilizantes, por lo que puede ser aprovechado para producir compost o biogás. Debido a que no existe en la Isla un tejido industrial potente, los lodos de depuradora no presentan problemas de presencia de metales pesados, por lo que puede ser usado tras un tratamiento de estabilización como fertilizante o servir de sustrato junto con la materia orgánica de RU para producir compost. Dado su elevado porcentaje de humedad, en torno a un 25%, su gestión futura necesitará de una reducción del porcentaje de humedad en origen de cara a minimizar los costes de transporte. En la Tabla 5Tabla 4 se presenta la generación de lodos de depuradora y su evolución:

Tipo	Año	Lodos (t/año)
Lodos de depuradora	2004	29.000
	2006	125.000 ¹⁴

TABLA 5. GENERACIÓN DE LODOS DE DEPURADORA (CABILDO DE TENERIFE, 2009)

La gestión actual de los mismos es principalmente su vertido en el Complejo Ambiental de Tenerife, aunque también se producen gestiones ilegales como su vertido en campos de cultivo sin tratamiento previo, vertido

¹³ Caracterización llevada a cabo por el Gobierno de Canarias

¹⁴ Estimación a partir de la actualización correspondiente marcada por la Directiva 91/271/CEE

al mar, etc., mientras que en otras islas como en Gran Canaria y Lanzarote prácticamente su totalidad se valoriza para obtener biogás (Gobierno de Canarias, 2021). No existen datos de generación de lodos de todas las depuradoras instaladas en la Isla, ya que muchas de ellas se sitúan en hoteles y urbanizaciones y no cuentan con un registro adecuado. Se dispone de los datos de generación actual de lodos de las principales EDAR de la isla: Buenos Aires, Adeje-Arona, La Orotava y Valle Guerra, las cuales producen en torno a 29.000 t/año. Este dato contrasta con las 16.000 t recogidas en el Complejo Ambiental durante el año 2004, debido a fallos en los sistemas de depuración que hicieron parar a algunas de estas plantas. En Canarias se registraron 127.455 T de lodos de depuradora, de los cuales el 28% fue vertido, el 1% fue bioestabilizado y el 71% fue valorizado mediante un proceso de biometanización (Gobierno de Canarias, 2021).

d. Residuos agrícolas:

Los residuos agrícolas son todos los residuos derivados de la explotación agrícola, mientras que su fracción orgánica se centra los restos vegetales. La gestión de los residuos agrícolas incumbe íntegramente al productor, lo que significa que, excepto en casos puntuales este tipo de residuos no debería entrar en la cadena de gestión de los residuos domésticos y asimilable, sin embargo, la fracción vegetal puede ser un sustrato interesante en procesos de tratamiento de residuos como el compostaje o la biometanización. En la Tabla 6 se presenta la generación de residuos agrícolas según su tipo:

Tipo de residuo	Cultivo	Residuos orgánicos (t/año)
Fibroso	Platanera	28.228
	Tomate	50.664
	Papas	112.123 ¹⁵
	Hortalizas	22.516 ¹⁶
	Flores y ornamentales	876
	Cereales	1521
Leñoso	Viña	14.968 ¹⁷
	Frutales	1.461 ¹⁸

TABLA 6. GENERACIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS ORGÁNICOS (2004) (CABILDO DE TENERIFE, 2009)

Su gestión se basa principalmente en el aprovechamiento dentro de la propia explotación, excepto cuando los restos vegetales están contaminados con plagas o están mezclados con plásticos u otros residuos derivados de la producción intensiva y que suelen acabar en vertedero:

- Utilización en la propia parcela, incorporándolos al suelo, para mantener la humedad e incorporar nutrientes que poco a poco se van liberando.
- Aprovechamiento ganadero: alimenticio o como cama de ganado.
- Obtención de compost a utilizar como fertilizante orgánico en la agricultura, para lo cual requiere un tratamiento y una gestión específica.

Asimismo, existen factores limitantes en su gestión como:

- El alto grado de fragmentación y dispersión de las parcelas donde se generan, lo que puede hacer muy costosa su cuantificación, así como su recogida y tratamiento.
- La posible presencia de plagas y enfermedades que implica que pueden hacer de vectores que favorezcan la dispersión de estas.
- La presencia de altas concentraciones de productos fitosanitarios, compuestos químicos de fertilizantes, etc. que los puedan volver peligrosos para su utilización en ganadería o en la fabricación de compost.

¹⁵ Incluye asociación de hortalizas y papas

¹⁶ Incluye huerto familiar

¹⁷ Incluye asociados a la viña

¹⁸ Incluye cítricos, frutales subtropicales y templados

e. Residuos ganaderos:

Los residuos ganaderos son todos los residuos derivados de la explotación ganadera, mientras que su fracción orgánica atiende principalmente a las excretas que se producen en las explotaciones estabuladas. La gestión de los residuos ganaderos incumbe íntegramente al productor siendo gestionados en una corriente aparte de los residuos domésticos, además de que la mayor parte de estos residuos tienen categoría SANDACH por lo que tienen una gestión específica muy regulada. Las excretas pueden ser utilizadas para la producción de compost o biogás, además de su uso como abono directo debido a la situación de déficit de materia orgánica de los suelos canarios. En Canarias existen experiencias para el desarrollo de teteras de compost, además de que las plantas de biometanización disponibles podría admitir sus subproductos, pero no disponen de la capacidad suficiente (Gobierno de Canarias, 2021). En la Tabla 7 se presenta la generación de excretas según su procedencia:

Tipo	Estiércol (t/año)
Caprino reproducción	58.268
Caprino engorde	2.305
Ovino reproducción	9.242
Ovino engorde	602
Porcino reproducción	20.188
Porcino engorde	19.043
Porcino hasta 50kg	17.765
Bovino madres	65.746
Bovino 12-24 meses	10.610
Bovino 0-12 meses	2.221
Cunícola	2.305
Aves puesta	65.701
Aves engorde	24.288

TABLA 7. GENERACIÓN DE RESIDUOS GANADEROS ORGÁNICOS (CABILDO DE TENERIFE, 2009)

Las excretas tienen diferente gestión en función de su procedencia. Las bovinas y ovinas se emplean como abono de las tierras agrícolas. Los purines y gallinaza, dada su composición, no pueden emplearse directamente como abono, y suponen un problema ambiental de gran calado (SANDACH categoría 2), ya que en numerosas ocasiones se vierten a barrancos, alcantarillado, entre otros. Además, su elevada producción hace que estén apareciendo excedentes que llegan a determinados los Complejos Ambientales, transformándose en residuo.

El problema de la correcta gestión de la fracción orgánica se produce porque en los últimos años la intensificación de la ganadería ha supuesto la “desconexión”, entre agricultura y ganadería que tradicionalmente había supuesto un ciclo cerrado, estableciéndose una simbiosis entre la agricultura, que proporcionaba alimento al ganado, y la ganadería, que proveía de abono en forma de estiércol. Esta conexión se está volviendo a establecer gracias a la acción de empresarios que mediante la producción de compost fabrican un abono muy adecuado para la tipología de la agricultura de la Isla.

f. Residuos forestales:

Los residuos forestales son los residuos generados de actividades como la horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca y los residuos de la preparación y elaboración de alimentos. Los residuos forestales producidos en la isla provienen principalmente de los tratamientos silvícolas a los que se somete a los montes para su limpieza, conservación y protección contra incendios y que no tienen un uso directo en la industria de la madera o en las explotaciones agrarias. Los residuos silvícolas pueden considerarse un subproducto que puede servir para aprovechamiento industrial, agrario o domésticos y que solo si no se utiliza para ello y llegan a alcanzar un volumen importante en el monte, constituyendo un peligro para el mismo puede ser considerado como residuo. En la Tabla 8 se presenta la generación de residuos forestales:

Tipo	Residuos orgánicos (t/año)
Forestales	5.350

TABLA 8. GENERACIÓN DE RESIDUOS FORESTALES ORGÁNICOS (2004) (CABILDO DE TENERIFE, 2009)

Ante la ausencia de datos oficiales sobre los trabajos forestales no se ha podido evaluar suficientemente la generación actual y potencial de los residuos forestales en Canarias, es por ello por lo que, de acuerdo con lo recogido, tanto en el Documento de Aprobación Inicial (1998), como en el Plan Forestal de Canarias, las disponibilidades reales se estiman entre 10.000 y las 30.000 t/año (Gobierno de Canarias, 2021). Teniendo en cuenta la poca actividad de explotación de los montes y el aprovechamiento local de alguno de los residuos generados se estima que no es de esperar que se presente una gran cantidad de residuos, aun cuando se sume la posibilidad de que se produzcan cantidades apreciables de residuos forestales al poder ser asimilados por el mercado de la madera para la producción de aglomerados o de pellets.

La gestión dada a estos residuos se centra en usos tradicionales tales como la utilización directa como cama de ganado, como carbón vegetal, como abono o para la fabricación de horquetas. Dado el carácter orgánico de estos residuos no constituyen un peligro ambiental reseñable, existiendo únicamente riesgo de incendio en zonas de acumulación. La principal dificultad a la hora de su gestión es el acceso a las zonas de bosque donde se generan estos residuos, ya que la red de caminos forestales no es abundante y el uso de maquinaria en el bosque está muy limitado.

g. Otros residuos orgánicos valorizables como biomasa:

- **Aceites vegetales usados:** principalmente de procedencia comercial y que suelen ser gestionados por parte de gestores autorizados tras su entrega directa a estos. Según los datos disponibles, en Canarias en el año 2014 se recogieron un total de 3.000 T, ascendiendo a 4.140 T en 2015 (Gobierno de Canarias, 2021).
- **Residuos de madera de origen comercial e industrial:** maderas no provenientes de residuos de construcción u otros orígenes y envases de madera. Suelen ser gestionados por gestores privados para su valorización como biomasa o en el Complejo Ambiental para su trituración. En el año 2015 se gestionaron en Canarias 8980 T de envases de madera y 900 T de maderas de origen comercial e industrial (Gobierno de Canarias, 2021).
- **Residuos de subproductos animales no destinados al consumo humano (SANDACH):** hace referencia a cuerpos o partes de animales, productos de origen animal u otros productos obtenidos a partir de animales, que no están destinados a consumo humano y que suponen riesgos para la salud humana, animal o al medio ambiente, especialmente en la cadena de seguridad alimentaria. Los SANDACH se generan en la actividad ganadera, en la industria alimenticia, en comercios y en otras actividades como la caza, sector doméstico, entre otros y se clasifican en tres categorías en orden de peligrosidad. La gestión de los SANDACH está completamente regulada y es afectada por normativa en materia de sanidad además de en materia de gestión residuos según el proceso de tratamiento y su categoría. Su gestión incluye las siguientes posibilidades: aprovechamiento como alimento directo o para la producción de este, compostaje, biometanización, producción de biocombustibles, incineración, esterilización, vertido o enterramiento (para pequeñas explotaciones). En Canarias se registraron en 2012, 2.800 T de cadáveres procedentes de explotaciones ganaderas los cuales fueron destinados a vertido en los complejos ambientales (Gobierno de Canarias, 2021). Por otro lado, se registraron 107.000 m³ de estiércol porcino y 766.000 T de estiércol de otras especies (Gobierno de Canarias, 2021). Finalmente se estiman 12.500 T de SANDACH categoría 2 y 3 derivadas de la industria alimentaria y comercios, cuya gestión como producto para la elaboración de alimento animal va en aumento (Gobierno de Canarias, 2021). La gestión de estos residuos en Canarias se basa principalmente en su tratamiento mediante plantas de tratamiento de SANDACH. En estas plantas los residuos adecuados se valorizan como alimentación animal y el resto es acondicionado para el vertido mediante trituración y adición de cal viva.

Resultando los siguientes totales:

En la Tabla 9 se presenta un resumen de los residuos totales generados en Canarias según el tipo para el año 2004.

Tipo	Residuos orgánicos (t/año)
Domésticos	157.650
Municipales, comerciales e industriales	46.112 ¹⁹
Lodos de depuradora	29.000
Agrícolas	232.377
Ganaderos	298.300
Forestales	5.350
Residuos orgánicos totales	768.789

TABLA 9. GENERACIÓN APROXIMADA DE RESIDUOS ORGÁNICOS (2004) (CABILDO DE TENERIFE, 2009)

Se evidencia que existe una gran disponibilidad de residuos orgánicos en Tenerife que pueden ser aprovechados energéticamente a través del proceso de biometanización, en el siguiente apartado se detalla el fundamento teórico necesario para la realización de este trabajo de fin de grado.

1.3.2 GESTIÓN ACTUAL DE RESIDUOS ORGÁNICOS:

a. Cantidades gestionadas:

A continuación, en la Tabla 10 se muestran los residuos orgánicos gestionados actualmente en Tenerife.

Residuos	Residuos (t/año)	
	2018	2022
Mezclas de residuos municipales	462.776	441.757
Fración orgánica ²⁰	120.000	115.000
Residuos orgánicos	45.523	40.872
Lodos del tratamiento de aguas residuales urbanas y asimilables	24.464	20.136
Lodos de fosas sépticas	--	1
Residuos de la limpieza de alcantarillas	91	207
Residuos estabilizados distintos de los especificados en el código 190304	1	--
Residuos de la limpieza viaria ²¹	3.228	2.290
Residuos biodegradables ²²	4.814	5.775
Residuos biodegradables de cocinas y restaurantes ²³	40	1.164
Residuos de mercados ²⁴	2.367	2.248
Materiales inadecuados para el consumo o la elaboración y asimilables	10.519	9.051

TABLA 10. RESIDUOS BIODEGRADABLES TOTALES GESTIONADOS EN TENERIFE (DATOS ABIERTOS. CABILDO DE TENERIFE, 2018-2022)

b. Caracterización de la fracción resto:

Los datos oficiales más recientes de la composición de la fracción resto en Tenerife se corresponden con el estudio de Composición y Caracterización de diciembre de 2010. Las propiedades de estos residuos se muestran en la Tabla 11 y en su composición por fracciones muestran en el Gráfico 4.

¹⁹ Estimación potencial

²⁰ Estimación a partir del estudio de composición de 2010

²¹ Se refiere a residuos vegetales de limpieza viaria: hojarasca caída de los árboles de calles, parques y jardines

²² Se refiere a residuos vegetales de parques, jardines y cementerios

²³ Se refiere a residuos alimentarios domésticos como asimilables de comercios, industrias e instituciones, siempre que procedan de recogidas separadas: en bares y cafeterías, hoteles, restaurantes, comedores escolares, hospitales, acuartelamientos, centros penitenciarios, etc.

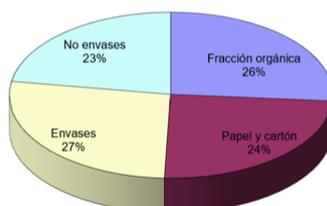
²⁴ Se refiere a residuos alimentarios de mercados equivalentes a los de cocinas

Granulometría	<25 mm	9,3	%
	25<x<80 mm	9,3	%
	>80 mm	81,4	%
Densidad		151,0	kg/m ³
Composición	Fracción orgánica	19,7	%
	Residuos vegetales	6,5	%
	Papel	19,2	%
	Cartón	5,1	%
	Plásticos	17,3	%
	Madera	2,1	%
	Metales Fe	2,4	%
	Metales No Fe	1,5	%
	Vidrio	4,3	%
	Bricks	2,2	%
	Textil	7,9	%
	Otros	9,7	%
Higiénico-sanitarios	1,9	%	

TABLA 11. PROPIEDADES Y COMPOSICIÓN DE RESIDUOS TENERIFE (2010) (PIRCAN)

No envases	Plásticos	4,6	% _{ret}
	Férricos	0,5	% _{ret}
	No férricos	0,5	% _{ret}
	Vidrio	1,4	% _{ret}
	Otros	28,9	% _{ret}
	Textiles	35,3	% _{ret}
	Gomas y cue	2,4	% _{ret}
	Maderas	6,1	% _{ret}
	Higiénicos sa	8,6	% _{ret}
	RAEE	11,4	% _{ret}
	Inertes	0,3	% _{ret}

Fracción orgánica	<25 mm	35,7	% _{ret}
	25<x<80 mm	27,6	% _{ret}
	>80 mm	11,8	% _{ret}
	Residuos veg	24,9	% _{ret}



Envases	PEBD (Film)	41,0	% _{ret}
	Bricks	8,3	% _{ret}
	Férricos	8,5	% _{ret}
	No férricos	5,0	% _{ret}
	PET	8,9	% _{ret}
	PEAD Blanco	4,6	% _{ret}
	PEAD Color	3,3	% _{ret}
	PVC	0,0	% _{ret}
	Otros plástic	2,6	% _{ret}
	Vidrio	14,9	% _{ret}
	Maderas	2,9	% _{ret}

Papel y cartón	Papel	79,1	% _{ret}
	Cartón	20,9	% _{ret}

GRÁFICO 4. COMPOSICIÓN POR FRACCIONES DE RESIDUOS TENERIFE (2010) (GOBIERNO DE CANARIAS, 2021)

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. BIOMETANIZACIÓN:

La metanización o digestión anaerobia es un proceso de descomposición de la materia orgánica a partir de microorganismos que la digieren en ausencia de oxígeno. Este proceso tiene por lo tanto especial interés en el tratamiento de residuos al transformar el residuo en un producto estabilizado y biogás. El producto estabilizado tiene propiedades fertilizantes y se puede utilizar como abono, mientras que el biogás es un combustible principalmente formado por metano.

2.1.1 QUÍMICA DEL PROCESO:

El proceso químico es complicado debido a que ocurre a partir de una serie de etapas en las que hay involucrada una gran variedad de microorganismos, que dependen en gran medida de la naturaleza del residuo y que son muy susceptibles a las condiciones de operación. Cada tipo de microorganismo se encarga de realizar un proceso de transformación concreto y que cuyo producto sirve de sustrato a otro tipo de microorganismo, de manera que el residuo se va transformando a partir de una serie de etapas diferenciadas hasta que finalmente se obtiene el residuo estabilizado y el biogás. De este modo el proceso se produce de secuencialmente, aunque hay algunas etapas que ocurren de manera simultánea, además de que según el tipo de residuo o condiciones puede existir competencia entre un tipo de microorganismo u otro por un sustrato afectando al rendimiento del proceso.

El proceso se basa en la degradación de los compuestos a compuestos más simples para ser transformados por medio de diferentes vías a acético y dióxido de carbono que serán las dos vías de producción de biogás. Las etapas en las que se desarrolla dicho proceso son las siguientes:

I. Hidrólisis:

En la etapa de hidrólisis los biopolímeros contenidos en los residuos son fragmentados por medio de las bacterias hidrolíticas a través de la acción de sus enzimas. Los microorganismos hidrolíticos producen enzimas extracelulares capaces de convertir la materia orgánica polimérica en materia orgánica solubles más simple. Las proteínas son degradadas a aminoácidos, los polisacáridos a azúcares y las grasas a ácidos grasos de cadena larga y polialcoholes. Esta etapa es la determinante en la velocidad global del proceso y limita la conversión del residuo a biogás dependiendo de la complejidad de estos polímeros.

II. Acidogénesis:

En la etapa de acidogénesis los monómeros producto de la hidrólisis son transformados en ácidos y otras sustancias reducidas por medio de las bacterias fermentativas. Los microorganismos metabolizan los compuestos, siendo adsorbidos, fermentados y finalmente expulsados. Los aminoácidos y ácidos grasos son transformados principalmente en ácidos mientras que los azúcares y polialcoholes a alcoholes simples. Esta etapa aporta acético, dióxido de carbono e hidrógeno como sustratos para la etapa de metanización, además de que requiere de la participación de otras etapas para mantener un equilibrio entre la producción de ácidos y su descomposición para no acidificar demasiado el medio e inhibir el proceso.

III. Acetogénesis:

En la etapa de acetogénesis los compuestos reducidos restantes son transformados en acético por medio de las bacterias acetoclásticas a través de dos vías. Los ácidos y alcoholes son transformados en acético, y por otro lado también parte del dióxido de carbono e hidrógeno producido a lo largo del proceso se transforma en acético. Los productos generados en esta etapa constituyen los sustratos para la metanogénesis, sin embargo, algunas bacterias comparten los sustratos con metanógenos compitiendo con ellos y reduciendo la eficiencia de producción de metano.

IV. Metanogénesis:

En la etapa de metanogénesis los sustratos metanogénicos son transformados en metano por medio de las bacterias metanogénicas a través de dos vías. El acético es transformado en metano representando la mayor parte de este, mientras que el resto es sintetizado a través de dióxido de carbono e hidrógeno. Esta etapa es considerada la más sensible a los desequilibrios del proceso debido a que este microorganismo requiere condiciones ambientales estrictas para su desarrollo, lo que se atribuye a la diversidad metanogénica inherentemente baja. En ausencia de la metanogénesis, el sistema podría alcanzar altos niveles de acidez inhibiéndose totalmente.

2.1.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE OPERACIÓN:

Este proceso se realiza en dispositivos denominados digestores para tratar los residuos y debido a que los microorganismos que actúan en este proceso son altamente susceptibles, para no impedir su actividad es necesario controlar una serie de parámetros:

1. Características del residuo a digerir:

El tipo de residuo orgánico influye directamente en el rendimiento del proceso ya que de esto depende el tipo de microorganismo que intervenga, la cantidad de nutrientes presentes y la dificultad para degradar su estructura química. Los residuos han de disponerse lo menos degradados posible y hay que tener cuidado en su elección para no escoger productos en los que se presenten inhibidores.

El proceso requiere pocos nutrientes (N, P, S, K, Mg, Ca, Na...) para que se produzca la actividad microbiana y su necesidad depende de los microorganismos implicados y del residuo a tratar. Para sustrato complejos es necesario un relación: 443/7/1 DQO/N/P, para sustrato acidificado 2260/7/1 DQO/N/P, para casos generales se puede tomar la relación 600/7/1 DQO/N/P, aunque es aconsejable su determinación.

El oxígeno inhibe la digestión anaerobia y la presencia de metales pesados inhibe la actividad bacteriana. Hay que controlar la cantidad de amoníaco, así como la de azufre debido a que una cantidad excesiva puede inhibir la actividad bacteriana, además de aumentar la competencia por sustratos como H₂ disminuyendo el rendimiento del proceso.

2. Preparación de muestras:

En la preparación de la muestra es necesario conseguir un tamaño de partícula adecuado, así como aportar la humedad suficiente a la muestra. En este proceso es importante la utilización de algún inóculo u otro elemento que favorezca el proceso.

La reducción del tamaño de las partículas es necesaria para poder contar con un aumento de superficie disponible que mejora el rendimiento del proceso. Se requiere un ambiente acuoso de al menos un 50% de agua.

La materia orgánica puede ser degradada mediante el empleo de inóculos, cuya función es potenciar la degradación de esta. Los inóculos producen degradación anaerobia de forma natural. El potencial de degradación de un inóculo mejora después de un periodo de aclimatación del sustrato, condicionando así el tiempo de arranque. La relación inóculo/sustrato debe ser adecuada, pues una baja concentración de sustrato inhibe el crecimiento de los microorganismos dependientes de sustrato y de la misma manera, altas concentraciones de sustrato pueden inhibir el proceso debido a la generación de ácidos.

3. Condiciones de operación:

Las condiciones de temperatura, pH y agitación son fundamentales para el desarrollo del proceso, así como alcanzar el mayor rendimiento posible.

La temperatura debe ser constante y uniforme en el reactor. Existen tres condiciones de temperatura en las que se puede trabajar: condiciones psicrófilas (5-20°C), mesófilas (20-40°C) y termófilas (50-70°C). La temperatura afecta a la actividad de los microorganismos y por lo general a mayor temperatura más rápido es el proceso y mayor es su eficacia en la descomposición. El tratamiento de sustratos complejos puede verse limitado por la velocidad de la etapa hidrolítica a temperaturas psicrófilas, y por otro lado la actividad termófila solo suele reservarse para unos casos por razones económicas. En términos de eficacia se puede decir que no es conveniente trabajar por debajo de 30°C.

El pH necesario de trabajo es entre 5,0 y 8,5 y se requiere unos valores estables. La actividad óptima de los diferentes microorganismos presentes varía del siguiente modo: para las bacterias hidrolíticas entre 7 y 7,5, para las acidogénicas y acetogénicas alrededor de 6, y para las metanogénicas entre 6,5 y 7,5, aunque se puede considerar óptima una actividad entre 7 y 8 de pH. El pH del medio cambia con el transcurso de la reacción, aunque estos valores dependen de la composición del residuo. Este cambio se produce especialmente en la etapa de acidogénesis, para lo cual es necesario utilizar disoluciones amortiguadoras para controlar el pH y resistir los cambios repentinos de pH. Cuando el pH es inferior a 6,5 comienza a disminuir la actividad de las bacterias acetogénicas hasta que por debajo de 5,5 cesa completamente, pero el pH puede seguir disminuyendo porque se mantiene la actividad de otros grupos tróficos, aunque limitada. La actividad de los microorganismos provoca que el pH del medio se estabilice en valores ligeramente alcalinos. Para controlar y estabilizar el pH se añaden a las muestras disoluciones amortiguadoras.

La agitación tiene como objetivos mantener una distribución homogénea de los sustratos, de la población bacteriana y de la temperatura en el reactor, así como favorecer la evacuación de gases y evitar la sedimentación.

2.2. HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA:

La digestión aerobia es un proceso de descomposición de la materia orgánica a partir de microorganismos que la digieren en presencia de oxígeno. Este es un proceso ampliamente utilizado en la gestión de residuos a través del compostaje, pero en este estudio se pretende utilizar como pretratamiento a la etapa de metanización a través de un proceso denominado hidrólisis enzimática. Debido a que el residuo a tratar es vegetal y puede contener altas cantidades de compuestos de difícil degradación que limiten la metanización, como la celulosa, hemicelulosa y/o lignina, se quiere aprovechar la acción enzimática de los microorganismos aerobios para digerirlas.

La hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos, ya que la materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles que puedan atravesar la pared celular. La hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos, que pueden estar presentes en la digestión aerobia o anaerobia.

La bibliografía consultada muestra que este tipo de compuestos son difíciles de degradar de forma natural, de modo que en procesos sumamente estudiados que dependen de la ruptura de estos compuestos, como es el caso de procesos de fermentación a partir de materiales lignocelulósicos, se suele potenciar la hidrólisis a partir de enzimas añadidas al proceso o de microorganismos específicos que producen este tipo de enzimas. Tales como celulasas, xilanasas y otras enzimas que se encargan de la hidrólisis de la celulosa, hemicelulosa y lignina.

2.2.1 FUENTES DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA:

La biomasa lignocelulósica tiene un gran potencial ya que compone un porcentaje representativo de la biomasa, pues supone el grueso de los residuos de origen agrícola y forestal, tanto de sus propios cultivos como procedentes de su procesamiento industrial o su consumo. Los residuos lignocelulósicos se pueden clasificar según la actividad que los genera en: agrícolas, forestales, industriales y urbanos, como se presentan en la Tabla 12.

Dentro de los residuos agrícolas se encuentran principalmente los desechos producidos durante el cultivo dedicado a la producción de alimento o forraje y los derivados de la producción de cultivos energéticos, mientras que dentro de la biomasa lignocelulósica forestal se destacan los cultivos dedicados a la obtención de biomasa además de los residuos procedentes del procesamiento de la madera y de los derivados de la limpieza forestal. Además de estas fuentes de biomasa lignocelulósica existe una fracción de los residuos industriales de tipo lignocelulósico correspondientes a los residuos obtenidos del procesamiento de alimentos o bebidas y los desechos de la industria papelera y una fracción de los residuos domésticos y municipales correspondientes a una parte de los residuos sólidos urbanos y a los desechos generados en labores de poda y mantenimiento de jardines, carreteras, campos de golf, etc.:

Agrícolas	Residuos de cultivos alimentarios	Paja de arroz Paja de trigo Paja de cebada
	Residuos de cultivos energéticos	Restos de la planta de colza Paja de maíz Bagazo de caña de azúcar
Residuos forestales	Cultivos dedicados a la producción de biomasa	Eucalipto Álamo Sauce
	Desechos del procesamiento de la madera	Corteza de diferentes árboles Astillas, tacones y virutas
Industriales	Residuos de la industria agrícola	Restos de frutas de la elaboración de zumos Paja de maíz Bagazo de caña de azúcar Piel de naranja
	Residuos de la industria forestal	Serrín de pino Madera reciclada
Urbanos y municipales	Residuos generados en labores de mantenimiento de jardines y otros	Podas de árboles, matos y setos Césped
	Fracción vegetal de los residuos sólidos	Mezcla variada de residuos alimenticios

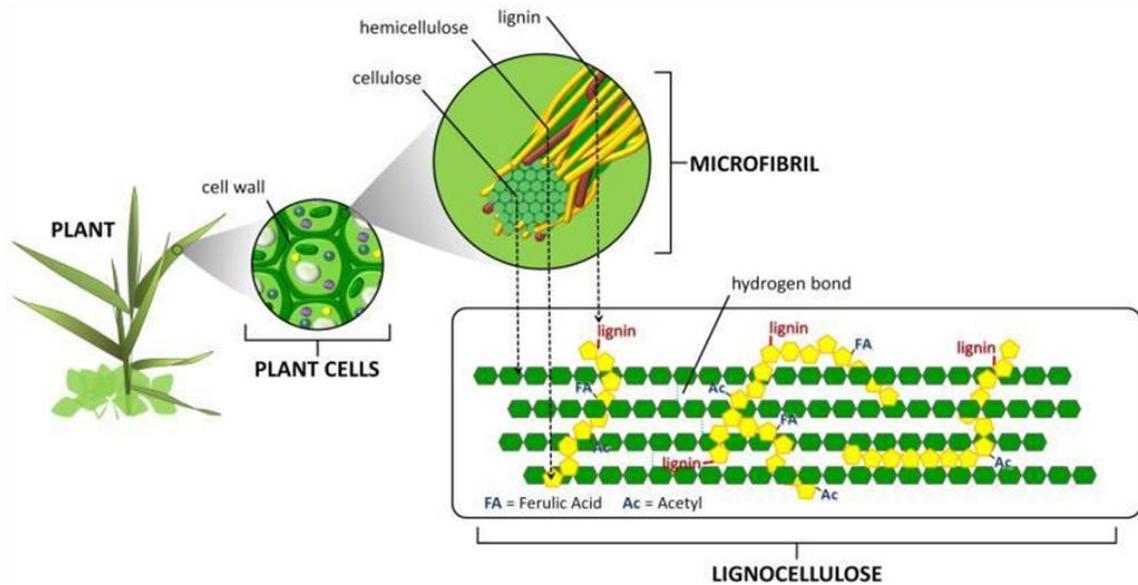
TABLA 12. CLASIFICACIÓN DE LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA

2.2.2 COMPOSICIÓN DE LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA:

La biomasa lignocelulósica tiene una estructura química compleja, como se muestra en el Esquema 1 y está compuesta principalmente por celulosa (35-50%), lignina (20-40%) y hemicelulosa (en la proporción restante²⁵) en una proporción variable debido a la gran variedad de residuos existentes. La celulosa es un polímero cristalino compuesto por unidades de glucosa y que se agrupa formando microfibras que conforman el esqueleto que mantiene cohesionado a las células presentes en las estructuras vegetales. La hemicelulosa es un polímero amorfo que se sitúa entre las diferentes microfibras de la celulosa dotándola de consistencia y está formada por diferentes heteropolímeros, tales como xilanos, galactomananos, glucurono, arabinosilanos, glucomananos y xiloglucanos cuya composición es única dependiendo del tipo de residuo. La lignina es un polímero fenólico que dota de resistencia a la celulosa al ataque microbiano y

²⁵ Composición general en % seco

al estrés fisicoquímico y está compuesta por tres tipos diferentes de monómeros: alcohol p-cumarílico, alcohol coniferílico y alcohol sinapílico.



ESQUEMA 1. ESTRUCTURA QUÍMICA DE LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA

2.2.3 PROCESAMIENTO DE LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA:

El procesamiento de esta biomasa requiere la separación de estos tres componentes y por su carácter resiliente es necesario realizarlo en etapas diferentes. De forma general existen diferentes procesos para separar sus componentes, como se muestra en la Tabla 13, aunque debido a la variedad de tipos de biomasa lignocelulósica, el proceso óptimo puede variar en gran medida de un tipo de residuo a otro. El procedimiento general se basa en tres procesos: primero un proceso de acondicionamiento para facilitar su transformación y engloba a procesos de secado, molido, lavado, etc. Posteriormente es necesario un proceso de pretratamiento, a partir del cual se produce una transformación de los componentes de la lignocelulosa para romper la matriz de lignocelulítica o conseguir una separación más sencilla de sus componentes y se dividen en procesos físicos, químicos, fisicoquímicos, termoquímicos o biológicos. Finalmente se lleva a cabo el proceso a partir del cual el residuo pretratado se transforma en un producto de valor añadido o energía y se dividen en químicos, termoquímicos o bioquímicos.

	Pretratamientos	Procesos de transformación
Físicos	Mecánico Microondas Ultrasonidos Radiación electrónica de alta energía	
Químicos	Ácido diluido Ácido concentrado Álcali Tratamiento oxidativo Organosolv Líquidos iónicos	Transesterificación
Fisicoquímicos	Explosión por vapor Expansión de fibras por amoníaco	
Termoquímicos	Pirólisis	Combustión Gasificación Pirólisis
Bioquímicos	Tratamiento biológico	Digestión Fermentación

TABLA 13. TIPOS DE PRETRATAMIENTOS Y PROCESOS APLICABLES A LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA

2.2.4 QUÍMICA DEL PROCESO:

La biomasa lignocelulósica requiere de una etapa previa de liberación de monosacáridos solubles que serán el sustrato de los microorganismos presentes en el proceso, ya que salvo a algunos hongos, no existen microorganismos capaces de metabolizar directamente la celulosa, hemicelulosa y lignina. La hidrólisis enzimática o pretratamiento biológico es un proceso en el que se emplean enzimas que ayudan en la degradación de estos polímeros, liberando los monosacáridos y monómeros que la componen. El proceso degrada principalmente estos componentes a glucosa y xilosa y las principales enzimas involucradas son las siguientes:

- Enzimas que degradan la celulosa (celulasas): la celulosa es degradada principalmente a glucosa fundamentalmente a partir de la acción de tres tipos de enzimas: endoglucanasas, exoglucanasas y β -glucosidasas
- Enzimas que hidrolizan la hemicelulosa: a partir de enzimas que degradan la xilanasas y enzimas que degradan los polímeros de mannosas produciendo xilosa, arabinosa, galactosa, mannosas, ácido ferúlico y acético.
- Enzimas que hidrolizan la lignina: la lignina es hidrolizada mediante una mezcla compleja de enzimas (ligninasas) produciendo compuestos fenólicos como el alcohol p-cumarílico o el alcohol coniferílico.

Esta reacción pasa por una fase de reducción de la complejidad del sólido a través de enzimas que actúan sobre la quitina y que provocan la rotura de la lignina que protege a la celulosa del ataque de otras enzimas. Posteriormente, se produce un ataque de las enzimas celulasas, primero a través de las endoglucanasas que rompen las cadenas de celulosa y posteriormente a través de las enzimas exoglucanasas, que actúan sobre estas nuevas cadenas para liberar oligosacáridos, produciendo el colapso de la estructura celulósica y a la solubilización del sólido. Finalmente, los oligosacáridos liberados son transformados por las enzimas β -glucosidasas en monosacáridos.

El proceso está caracterizado por una serie de factores como: el tipo de enzimas, procesos de inhibición o la temperatura. Las enzimas intervinientes en el proceso pueden ser aportadas a partir de organismos que las generen y que están presentes en los residuos o suplementando enzimas como la β -glucosidasas al proceso. Existen determinados compuestos producidos durante el proceso de hidrólisis, como los producidos tras la desactivación de la lignina que producen una desactivación de las enzimas o algunos oligómeros como la celobiosa que reaccionan con las endo y exoglucanasas o la celulosa que reacciona con la β -glucosidasas impidiendo que actúen sobre los compuestos que deben actuar para que el proceso avance. Debido a la naturaleza (mesofílica o termofílica) de los microorganismos de los que se obtienen los cócteles empleados para la hidrólisis de la biomasa lignocelulósica, se considera que las enzimas celulolíticas, tienen un rango de funcionamiento óptimo situado entre 40 y 50 °C, dependiendo del tipo de enzima y de su origen (Wojtusik, 2019).

2.3. PRODUCTOS OBTENIDOS:

2.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL BIOGÁS Y TRATAMIENTOS POSTERIORES:

El biogás es una mezcla de diferentes gases producidos por la descomposición anaeróbica de materia orgánica. El biogás está compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono y puede contener trazas de otras sustancias. Su composición puede variar mucho según el residuo y proceso utilizado, pudiendo dar desde un gas pobre en metano a la producción de otros componentes, aunque para que sea considerado biogás tiene que estar compuesto al menos en un 50% de metano. Las trazas más comunes que se suelen encontrar son oxígeno, nitrógeno u otros compuestos volátiles orgánicos.

El biogás es un combustible que posee un bajo poder calorífico, pero, aun así, su energía es suficiente para mantener en operación un dispositivo de generación de potencia como turbinas, motores o sistemas de calentamiento y cocción de alimentos. Este combustible puede ser utilizado directamente como carburante de vehículos, en sistemas de generación de electricidad o en sistemas de generación de energía térmica, como gas natural. También puede ser utilizado como materia prima para la producción de biocombustibles de generación posterior, como el DME.

Para ser utilizado como combustible es necesario que sea sometido a un proceso de tratamiento con el fin de refinar su calidad y eliminar los contaminantes presentes. Los principales contaminantes que pueden estar presentes son el nitrógeno, el sulfuro de hidrógeno y el amoníaco, que, en su manipulación aparte de ser tóxicos, algunos son corrosivos. Además, hay que eliminar el dióxido de carbono y el oxígeno y agua presente, ya que estos componentes no aportan poder calorífico al combustible. El agua debe ser eliminada además para evitar condensaciones durante su transporte.

2.3.2 CARACTERÍSTICAS DEL DIGESTATO:

El digestato es el residuo sólido o líquido que queda en el digestor tras el proceso y que se corresponde con la fracción del residuo que no ha sido transformado en biogás. Está compuesto por la masa bacteriana estabilizada, así como el resto de los compuestos estabilizados correspondientes a los subproductos del proceso de digestión y los materiales que no han sido posible degradar. Este producto contiene nitratos y sulfatos que le dan propiedades fertilizantes y de acondicionamiento de suelos.

3. OBJETIVOS

El **objetivo general** de este estudio es la evaluación de la efectividad de la biometanización de residuos vegetales a través de un proceso de codigestión con FORSU en el que se emplea un inóculo y una bacteria comercial y que cuyos residuos han sido pretratados mediante hidrólisis enzimática.

Para la realización de este objetivo general se han fijado los siguientes **objetivos específicos**:

- Estudio de la influencia del tipo de residuo/mezcla
- Estudio de la eficacia del inóculo como ayuda a la digestión anaerobia
- Estudio de la eficacia de la hidrólisis enzimática como pretratamiento a la digestión anaerobia

Para cumplir con los objetivos marcados ha sido necesario la realización de los siguientes **pasos**:

- Revisión bibliográfica del conocimiento científico y de la tecnología actual relacionada con los procesos de biometanización
- Análisis de la situación actual y cuantificación de residuos a nivel insular
- Determinación experimental de contenido en sólidos de las muestras
- Realización de procesos de digestión aerobia
- Estudio de la producción del gas obtenido a partir de la digestión anaerobia de diferentes muestras de residuos
- Estudio de la composición del gas obtenido mediante la digestión anaerobia de diferentes muestras de residuos

4. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

La realización de este estudio se ha llevado a cabo en laboratorio a partir de los siguientes experimentos:

- Determinación experimental de contenido en sólidos de las muestras
- Realización de hidrólisis enzimática de una parte de las muestras
- Realización de digestión anaerobia de todas las muestras

La parte principal del experimento es la digestión anaerobia (biometanización), que es el proceso de estudio y a partir del cual se toman los datos para medir la efectividad del proceso.

4.1. PRODUCTOS UTILIZADOS:

En la preparación de las muestras se utilizaron residuos vegetales, empleándose dos residuos diferentes: por un lado, césped correspondiente a las labores de mantenimiento de campos de golf, dada la importancia de este residuo en la isla de Tenerife, y por otro una mezcla de residuos vegetales para valorar la eficacia del proceso de digestión a la hora de tratar residuos en masa.

Aparte del residuo vegetal se añadieron a las muestras un conjunto de sustancias para favorecer el proceso de digestión estos residuos: un inóculo, una bacteria comercial y un conjunto de residuo orgánico doméstico (codigestión). Finalmente, se añaden productos encargados de estabilizar el pH del proceso y amortiguar los bruscos cambios que se producen en este tipo de proceso asegurando así la mayor uniformidad de este a lo largo del proceso.

A continuación, en la Tabla 14 se enumeran los materiales utilizados, describiendo su estado y características y en la Imagen 1 se muestra una fotografía de los residuos utilizados.

		Características	Estado
Residuos	Césped	100% césped Procedente de campos de golf	Estado fresco
	Mezcla en bruto de residuos vegetales	50% césped 50% malas hierbas, hojas de palmera, de drago, de parra, de platanera y de naranjo (a partes iguales) Procedentes de una huerta	Estado fresco
Disolvente	Agua destilada	--	Destilada
Activadores	Inóculo	Lodos de depuradora Proporcionados por la depuradora de Santa Cruz de Tenerife	Estado fresco
	FORSU	Mezcla de residuos sólidos orgánicos: 40% cereales 30% alimentos proteicos 30% verduras Proporcionados por la cafetería de la Facultad de Química de la ULL	Estado fresco
	Bacilo	Bacteria comercial Proporcionada por la empresa CAMBE.SL	Comercial
Estabilizadores de pH	HCl	Disolución de ácido clorhídrico 0,1M preparada a partir de ácido clorhídrico comercial al 37%	Comercial
	NaOH	Lentejas comerciales de hidróxido de sodio	Comercial
	NH ₄ Cl	Cloruro de amonio comercial en polvo	Comercial
	CaCO ₃	Carbonato de calcio comercial en polvo	Comercial
	Disolución Buffer	Disolución amortiguadora comercial de fosfato de pH 7	Comercial
Corrientes de proceso	Nitrógeno	Corriente de nitrógeno gaseoso de 99% de pureza	Comercial

TABLA 14. RELACIÓN DE PRODUCTOS UTILIZADOS



IMAGEN 1. MUESTRA DE RESIDUOS VEGETALES, FORSU, INÓCULO Y BACILO

4.2. CARACTERIZACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES, FIJOS Y VOLÁTILES:

4.2.1 FUNDAMENTO:

El contenido en sólidos de una muestra está relacionado con la degradación de esta, ya que es este el sustrato del que se alimentan las bacterias en el proceso de degradación un residuo. De este modo su contenido disminuye con el tiempo tras el avance en el proceso de descomposición y puede ser un parámetro directamente relacionado con la cantidad y calidad del gas generado este proceso, además de un parámetro indicativo de la biodegradabilidad de un residuo y el estado de maduración en el que se encuentra.

Para cada muestra fue determinado su contenido en sólidos totales, fijos y volátiles:

- Sólidos totales (ST): cantidad de materia suspendida o disuelta asentada tras el secado de la muestra en una estufa a 105°C tras 24 h.
- Sólidos fijos (SF): cantidad de sólidos que aún permanecen en la muestra tras la calcinación en una mufla a 550°C tras 1 h.
- Sólidos volátiles (SV): cantidad de sólidos perdidos de la muestra tras la calcinación en una mufla a 550°C tras 1 h.

Este análisis se emplea con la finalidad de realizar un estudio más profundo de la degradación de estos, permitiendo así:

- Extraer conclusiones a partir de la relación entre la composición de los residuos y la producción de biogás
- Poder estimar la eficacia en la degradación de los residuos a partir de la variación de sólidos sufridas en los mismos

4.2.2 MATERIALES:

Los materiales y equipos necesarios son los siguientes: estufa, mufla, secador, balanza de presión, balanza de laboratorio, cápsulas de porcelana, como se muestra en la Imagen 2.



IMAGEN 2. CÁPSULAS PARA MUESTRAS, ESTUFA Y MUFLA

4.2.3 PROCEDIMIENTO:

La caracterización se hizo por duplicado o triplicado de cada muestra a fin de tener una medida lo más exacta posible, y consta de los siguientes pasos:

1. Pesaje de las cápsulas que van a almacenar a cada muestra
2. Pesaje de las cápsulas con 1g de cada muestra
3. Secado de las muestras en una estufa a 105°C durante 24 h
4. Almacenaje de las muestras en un desecador para su enfriamiento y su posterior pesaje
5. Esta medida, considerando el peso de la cápsula, nos permite determinar los **ST**
6. Calcinación de la muestra en una mufla a 550°C durante 1 h
7. Almacenaje de las muestras en un desecador para su enfriamiento y su posterior pesaje
8. Esta medida, considerando el peso de la cápsula y los sólidos totales ya medidos, nos permite determinar los **SF** y **SV**

Para estimar la eficacia de los procesos de digestión se debe caracterizar la muestra antes y después de cada proceso, para así estimar las variaciones de sólidos en cada proceso.

4.3. HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA:

4.3.1 FUNDAMENTO:

La finalidad de esta instalación es valorar la digestión aerobia como pretratamiento de los residuos vegetales para un proceso de metanización, ya que se espera que los residuos vegetales, cuya degradación es lenta debido a la complejidad de las moléculas que los estructuran, sean hidrolizados a partir de este proceso, dando como resultado un subproducto más fácil de degradar.

La aplicación de este procedimiento es para proporcionar una serie de muestras digeridas que van a utilizarse en el proceso de digestión anaerobia y que cuya efectividad va a medirse a partir de dicho proceso.

4.3.2 MATERIALES:

Los materiales y equipos necesarios son los siguientes:

- Baño termostático, medidor de burbuja, bomba, cronómetro, taladro, tapas de rosca, frascos de vidrio de 1L, tuberías de goma de 4 mm y superiores, mangueras de diámetros superiores, accesorios tipo codo y tipo T.

- pHmetro, embudo buchner, filtros.
- Bomba de vacío, tijeras, cuchillos, probetas, vasos de precipitado, pipetas.

4.3.3 PROCEDIMIENTO:

El experimento consta de los siguientes pasos:

1. Caracterización inicial de sólidos en los residuos
2. Caracterización inicial de azúcares en los residuos
3. Preparación de muestras
4. Preparación y arranque de la instalación
5. Seguimiento diario de la instalación y toma de datos
6. Separación de los residuos resultantes, tratamiento y almacenaje
7. Caracterización final de sólidos en los residuos
8. Caracterización final de azúcares en los residuos
9. Uso en la digestión anaerobia

Se fijaron los siguientes parámetros para el proceso de hidrólisis enzimática que corresponden con los mayoritariamente utilizados en la bibliografía:

- Condiciones Termofílicas (53°C)
- Condiciones Ácidas (pH 4-6)
- Ayudada por Bacilo (0,036 g/g muestra)
- Sustrato troceado (1-3 cm)
- Tiempo de retención corto (3 días)
- Caudal de aire estable (4-18 mL/s)

A diferencia del proceso de metanización, no se usaron inóculos, ni se usaron residuos orgánicos.

4.3.4 DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN:

La instalación está provista de un baño termostático que trabaja a 53°C, en el que se insertan los digestores²⁶. Estos digestores son aireados mediante una bomba de forma que trabajen en condiciones aerobias y el caudal que circula por estos es medido mediante un medidor de burbuja. Los digestores son conectados a unos colectores de líquido para evitar las pérdidas de muestra por evaporación. En la Imagen 3 se muestra la instalación.

²⁶ **Digestores:** frascos en los que se insertan los residuos para que se desarrolle la degradación de estos

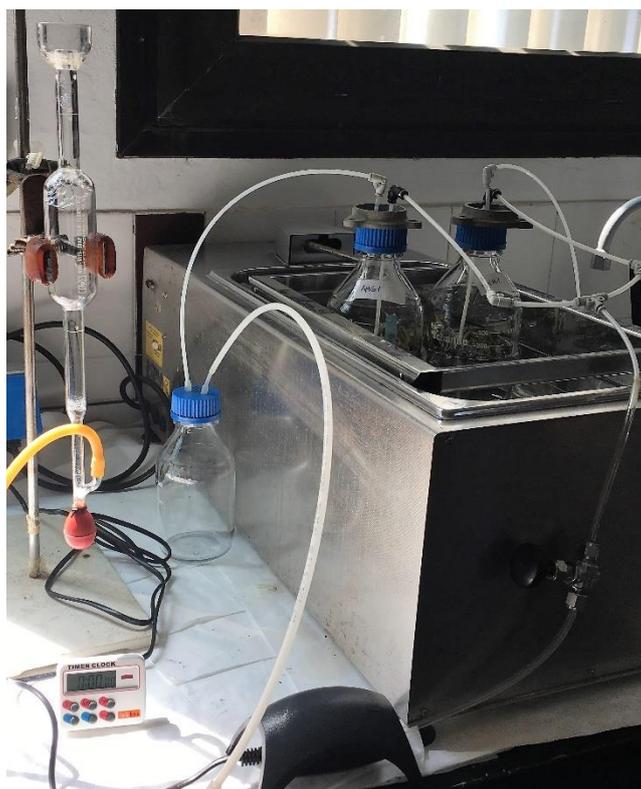


IMAGEN 3. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL PARA DIGESTIÓN AEROBIA

4.3.5 PREPARACIÓN DE MUESTRAS:

Se prepararon diferentes muestras en función de los estudios que se pretendían realizar. Cada muestra estaba prevista de un residuo vegetal, una bacteria comercial y agua destilada.

La preparación de las muestras consta de los siguientes pasos:

1. Recolección de los residuos vegetales y domésticos en estado de no degradación.
2. Trituración de residuos vegetales hasta un tamaño pequeño de partícula.
3. Tarado de envases para finalmente contabilizar las pérdidas por evaporación.
4. Preparación de las muestras: añadir al digester 540 mL de agua destilada, 60g de residuos y 2,16g de bacilo.
5. Ajuste de pH: se midió el pH, que a diferencia de las muestras para la metanización eran ácidos y no alcalinos. Se intento alcalinizar para tener unas condiciones de partida similares a las de la metanización, pero tras añadir lentejas de hidróxido de sódico se comprobó que era muy difícil alcalinizar el medio, de modo que se partió con esas condiciones.
6. Pesado de muestras para finalmente contabilizar las pérdidas por evaporación.

4.3.6 PREPARACIÓN DE LA INSTALACIÓN:

Para preparar la instalación se realizaron los siguientes pasos:

1. Preparación de las tapas de los recipientes. Estas tapas deben cumplir dos funciones: sellar los recipientes e incluir las líneas por las que circulan los fluidos. Estas tapas, de rosca, se adaptaron a partir de las incluidas en los recipientes. Primero se perforaron con un taladro y después se insertaron las líneas correspondientes, asegurando la estanqueidad de la conexión al recubrir la línea con otra más elástica, de modo que al introducirla en la tapa quedara lo más sellada posible.
2. Preparación de los digestores. En los digestores se conectó una línea de entrada que llegara hasta el fondo del recipiente con la finalidad de burbujear el aire de la manera más homogénea posible.

Se colocó otra línea más corta que no estuviera en contacto con el líquido de manera que se pudiera evacuar el aire manteniendo la presión en el recipiente y con la finalidad de poder medir el caudal de aire en el recipiente.

3. Preparación de los colectores de agua. Se instalaron unos recipientes con la finalidad de evitar la pérdida de agua por evaporación, de modo el vapor producido debido a la alta temperatura del baño iba a condensar al ser transportado al siguiente recipiente. En los colectores se instaló una línea de entrada conectada con el digestor y una de salida para mantener la presión constante y para poder conectar el medidor de burbuja en caso de querer medir el caudal de aire de entrada. Estos colectores de líquido se muestran en la Imagen 4.
4. Comprobación de fugas. Se comprobaron las fugas en digestores con sus líneas y en colectores con sus líneas. Para ello se enjabonaron las conexiones y se conectó la bomba a la instalación para ver si en algún elemento se producen pompas de jabón. En tal caso cambiar el elemento o asegurar con silicona y volver a realizar la comprobación mientras las pompas estén presentes.
5. Conexión del sistema. Se sumergen los digestores en el baño termostático, colocándoles unos pesos para que no floten. Se conecta la bomba de aire usando una distribución de líneas en paralelo para suministrar aireación a todos los digestores de manera simultánea. Se conectan las líneas de salida a los colectores de agua.
6. Medida del caudal en cada digestor. Se conecta el medidor de burbuja a cada colector de uno en uno, de manera que con un cronómetro se pueda medir el caudal de aire en cada digestor.



IMAGEN 4. COLECTORES DE LÍQUIDO

4.4. DIGESTIÓN ANAEROBIA:

4.4.1 FUNDAMENTO:

Los residuos se descomponen en el interior de los digestores y este proceso de descomposición es seguido diariamente a través del gas producido, para lo cual es necesario medir la cantidad producida diariamente y su composición:

- La cantidad producida se mide a través de los medidores de volumen habilitados en la instalación.
- La composición se mide analizando mediante un cromatógrafo de gases una muestra del gas almacenado en el digestor.

Estos datos nos permitirán obtener la curva de **distribución de la producción de gas** y la curva de **distribución de la calidad de dicho gas** para cada una de las muestras, con el fin de ser analizadas y comparadas posteriormente para determinar las mejores condiciones de producción de biogás a partir de residuos vegetales.

4.4.2 MATERIALES:

Los materiales y equipos necesarios son los siguientes:

- Cromatógrafo de gases, jeringuilla para gases de 1 mL.
- Baño termostático, taladro, tapas de rosca, frascos de vidrio de 0,25L, 1L y 6L, tuberías de goma de 4 mm y superiores, mangueras de diámetros superiores, toma-muestra, válvulas de cierre, accesorios tipo codo y tipo T, papel graduado.
- pHmetro, embudo buchner, filtros.
- Bomba de vacío, tijeras, cuchillos, probetas, vasos de precipitado, pipetas.

4.4.3 PROCEDIMIENTO:

El experimento consta de los siguientes pasos:

1. Caracterización inicial de sólidos en los residuos.
2. Preparación de muestras.
3. Preparación y arranque de la instalación
4. Seguimiento diario de la instalación y toma de datos.
5. Caracterización final de sólidos en los residuos.
6. Análisis de las distribuciones obtenidas.

Las condiciones son las siguientes:

- Condiciones Mesofílicas (38°C).
- Condiciones Alcalinas (pH 7-9).
- Ayudada por inóculo: una parte de las muestras se inoculó para lo que se empleó la cantidad de inóculo necesaria para que hubiese la misma cantidad de sólidos volátiles aportados por el inóculo que el contenido en la muestra (1 g SV inóculo/g SV estructurante²⁷).
- Ayudada por FORSU (0,75 g/g muestra).
- Ayudada por Bacilo (0,018 g/g muestra).
- Sustrato troceado (1-3 cm).
- Estabilizada por reguladores de pH.
- Tiempo de retención largo (al menos 2 ciclos de reactivación²⁸).

4.4.4 DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN:

La instalación está provista de un baño termostático que trabaja a 38°C, en el que se insertan los digestores. Los digestores trabajan por duplicado de muestras, de modo que uno permita la toma de muestras y el otro la medida de volumen sin que la toma de muestra interfiera en ello.

Estos digestores trabajan de manera estanca y por ellos circula una conducción que transporta el gas producido a lo largo de la instalación. El gas circula desde el digestor hasta el medidor de volumen y el líquido desplazado por este se colecta en unos botellones. La línea está provista de un toma-muestra a partir de la cual utilizando una jeringuilla se extrae gas para ser analizado. En la línea también se encuentra una válvula que permite cerrar la instalación una vez es quitado el medidor de volumen para rellenarse de líquido. En el Esquema 2 se describe el funcionamiento de la instalación de digestión anaerobia.

²⁷ **Estructurante:** residuo utilizado como materia prima en el proceso de digestión anaerobia, como puede ser el residuo vegetal natural o predigerido o el FORSU, pero no ningún activante o estabilizador como son el inóculo, el bacilo o los estabilizadores de pH. En este estudio el estructurante hace referencia al FORSU junto con el residuo vegetal natural o predigerido

²⁸ **Reactivación:** en la página 30 se explica en que consiste



ESQUEMA 2. DESCRIPCIÓN DE INSTALACIÓN PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

El medidor de volumen está graduado de forma que mediante el empuje del gas que entra por la parte de arriba, el líquido se desplaza y se puede medir dicha altura desplazada. Esa diferencia de altura nos indica el gas generado en ese día y conocidas las dimensiones del medidor se puede calcular el volumen del gas generado en las condiciones de estudio. Los medidores de volumen están provistos de una disolución de ácido clorhídrico 0,01M para evitar la disolución de CO₂ procedente de los gases de digestión, evitando así una lectura incorrecta en la medición de volumen. En la Imagen 5 se muestra la instalación completa.



IMAGEN 5. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL PARA DIGESTIÓN ANAEROBIA

Diariamente se debe rellenar el nivel de líquido del baño para compensar las pérdidas por evaporación, además de tomar la lectura de las alturas de líquido de cada medidor y tomar una muestra de cada toma. Cuando sea necesario rellenar los medidores con ácido clorhídrico, se podrá preparar en el laboratorio o

utilizando el desplazado hasta los botellones una vez haya sido limpiado mediante filtración al vacío y su pH reajustado a 1 mediante ácido clorhídrico.

4.4.5 PREPARACIÓN DE MUESTRAS:

Se prepararon diferentes muestras en función de los estudios que se pretendían llevar a cabo, realizando un duplicado por muestra. Cada muestra estaba prevista de un residuo vegetal, una bacteria comercial, agua destilada y los oportunos reguladores de pH, además de la posibilidad de incluir residuos orgánicos domésticos o inóculo. En la Imagen 6 se muestra una de las muestras estudiadas.

La preparación de las muestras consta de los siguientes pasos:

1. Recolección de los residuos vegetales y domésticos en estado de no degradación.
2. Recolección del inóculo en condiciones anaerobias.
3. Trituración de residuos vegetales hasta un tamaño pequeño de partícula.
4. Preparación de las muestras: añadir al digestor 145 mL de agua destilada, 30g de residuos (residuo vegetal/digestato vegetal y/o FORSU según proporciones anteriormente indicadas), 1,08 de bacilo y en el caso necesario inóculo (según proporción indicada anteriormente).
5. Homogeneización y añadir reguladores de pH: 2,4 g de cloruro de amonio, 270 mg de carbonato de calcio y 5 mL de disolución buffer comercial.
6. Ajuste de pH entre 7-9 midiendo con pHmetro y usando lentejas de hidróxido de sodio o disolución de ácido clorhídrico.
7. Asegurar atmósfera inerte en el digestor: primero cerrar el digestor y acoplar las correspondientes líneas y válvulas, después extraer el oxígeno mediante la conexión bomba de vacío durante 5 minutos y cerrar la válvula, seguidamente se volvió a abrir para burbujear nitrógeno durante un minuto, posteriormente se cerró y abrió para eliminar la sobrepresión de nitrógeno y finalmente se cerró la válvula.



IMAGEN 6. PREPARACIÓN DE DIGESTORES

4.4.6 PREPARACIÓN DE MUESTRAS:

Para preparar la instalación se realizaron los siguientes pasos:

1. Preparación de las tapas de los recipientes. Estas tapas deben cumplir dos funciones: sellar los recipientes e incluir las líneas por las que circulan los fluidos. Estas tapas, de rosca, se adaptaron a partir de las incluidas en los recipientes. Primero se perforaron con un taladro y después se

- insertaron las líneas correspondientes, asegurando la estanqueidad de la conexión al recubrir la línea con otra más elástica, de modo que al introducirla en la tapa quedara lo más sellada posible.
- Preparación de muestras y de medidores de volumen, según se ha indicado. Los medidores de volumen tienen una línea de entrada que no está en contacto con el líquido por la que entra el gas procedente de los digestores, y tienen una salida sumergida en el líquido que permite la salida de este al ser empujado por el gas.
 - Inertización de atmósfera en digestores y medidores mediante la bomba de vacío y la línea de nitrógeno como ya se ha indicado.
 - Comprobación de fugas en digestores y medidores conectándoles la línea de nitrógeno y sumergiéndolos completamente en agua para ver si en algún elemento se producen burbujas. En tal caso cambiar el elemento o asegurar con silicona y volver a realizar la comprobación mientras las burbujas estén presentes. Eliminar exceso de presión.
 - Conexión del sistema. Se sumergen los digestores en el baño termostático, colocándoles unos pesos para que no floten y se conectan sus líneas a los medidores de volumen. A continuación, se conecta la salida de los medidores con los botellones de descarga de líquido. Las descargas de los medidores de volumen fueron conectadas en paralelo a una misma línea y está desembocaba en los botellones para simplificar la operación.

4.4.7 ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL GAS PRODUCIDO:

Las muestras extraídas de la instalación fueron analizadas en un cromatógrafo de gases. El procesamiento de los cromatogramas generados por el equipo, como el que se muestra en la Imagen 7, permitía determinar la composición de las muestras.

Los pasos realizados fueron los siguientes:

- Insertar la muestra en el cromatógrafo y arrancar el análisis en línea.
- Esperar 5 minutos hasta que salieran todos los picos característicos del tipo de muestra que estábamos analizando. En caso de ver alguna anomalía dejar más tiempo el análisis.
- Identificar los picos en función de la bibliografía correspondiente en laboratorio para este tipo de muestras.
- Calcular las áreas cromatográficas y descartar los elementos no correspondientes.
- Determinar los porcentajes finales de gases según las áreas calculadas.

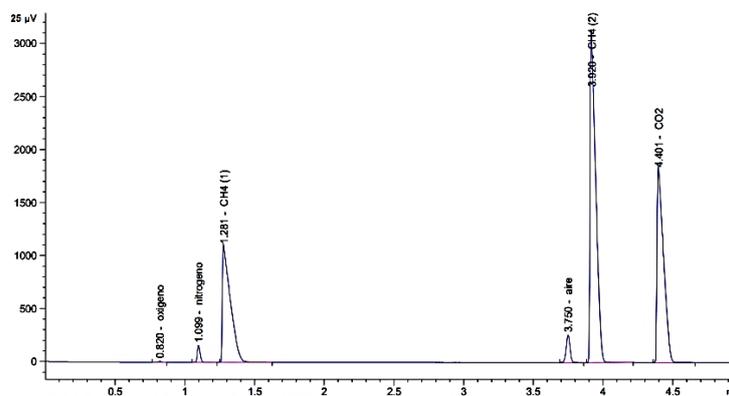


IMAGEN 7. CROMATOGRAMA CORRESPONDIENTE A UNA MUESTRA DE GAS

4.4.8 REACTIVACIÓN DE DIGESTORES:

En los casos en los que la producción de gas de una muestra cesase durante unos 5 días se comprueba si el pH está en los valores de operación, ya que un cambio brusco de pH podría ser la causa de la inactividad de la muestra.

Siguiendo para ello los siguientes pasos:

1. Cierre de la válvula del digestor y desconexión posterior del sistema.
2. Apertura de la tapa y medida de pH mediante el pHmetro, como se indica en la Imagen 8.
3. Ajuste de PH mediante ácido clorhídrico o pastillas de hidróxido de calcio hasta que le pH estuviese entre los valores de operación. Removiendo el digestor para homogeneizar la mezcla o hasta la disolución de las pastillas hidróxido de calcio y posteriormente ser medida.
4. Cierre del digestor e inertización de atmósfera mediante previo vacío y posterior conexión de la línea de nitrógeno como ya se ha indicado.
5. Conexión al sistema y apertura de válvula.



IMAGEN 8. PHMETRO Y MEDIDA DE PH

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1. INTRODUCCIÓN:

El propósito de esta investigación ha supuesto la realización de 3 experiencias principalmente: en primer lugar, la caracterización de sólidos en los residuos, a continuación, la realización de la digestión aerobia (hidrólisis enzimática) para una parte de las muestras y finalmente la digestión anaerobia de todas las muestras con el seguimiento de las medidas de la cantidad y calidad de los gases producidos en la descomposición de los residuos.

Como residuo se utilizó césped y una mezcla de residuos vegetales. Se prepararon dos muestras por cada residuo siendo la mitad inoculadas. Todas las muestras anteriores se duplicaron y la mitad fueron sometidas previamente a digestión aerobia de manera que para la digestión anaerobia se tuvieron disoluciones de los residuos²⁹ y digestatos de los residuos³⁰. En la Tabla 15 se detallan todas las muestras preparadas.

	Descripción	Composición	Muestras
Experimento 1:	Disolución de césped	25% residuo vegetal 75% FORSU 2% bacilo	1 y 2
Experimento 2:	Disolución de césped con inóculo	3% residuo vegetal 10% FORSU 0,25% bacilo 86% inóculo	3 y 4
Experimento 3:	Disolución de mezcla	25% residuo vegetal 75% FORSU 2% bacilo	5 y 6
Experimento 4:	Disolución de mezcla con inóculo	3% residuo vegetal 10% FORSU 0,25% bacilo 86% inóculo	7 y 8
Experimento 5:	Digestato de césped	25% residuo digerido 75% FORSU 2% bacilo	9 y 10
Experimento 6:	Digestato de césped con inóculo	3% residuo vegetal 10% FORSU 0,25% bacilo 86% inóculo	11 y 12
Experimento 7:	Digestato de mezcla	25% residuo digerido 75% FORSU 2% bacilo	13 y 14
Experimento 8:	Digestato de mezcla con inóculo	3% residuo vegetal 10% FORSU 0,25% bacilo 86% inóculo	15 y 16

TABLA 15. MUESTRAS DE TRABAJO

El experimento principal de digestión anaerobia se desarrolló durante 69 días tomando valores a diario de la cantidad del gas producido y analizando su composición. Durante el experimento se produjeron una serie de incidencias, las cuales se recogen en la Tabla 16. **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y se desarrollan a continuación. El primer día de producción se perdió y en ese día además de mantenerse por debajo de la temperatura de trabajo, se pudieron dar condiciones aerobias debido a que al preparar los 16 digestores el mismo día no dio tiempo a realizar la conexión del sistema por lo que quedaron preparados para que al día siguiente se inertizaran y se conectaran al sistema. Se produjeron fugas de gas en alguno de

²⁹ **Disolución de residuo:** hace referencia a las muestras cuyo residuo vegetal no ha sido digerido previamente

³⁰ **Digestato de residuo:** hace referencia a las muestras cuya parte vegetal proviene de una muestra ya sometida a digestión aerobia

los digestores, pero una vez detectadas fueron reparadas aplicando silicona en las juntas de las tapas o cambiando el accesorio defectuoso. Debido a la presencia de estas fugas, la pérdida del primer día de producción y situaciones en las que los digestores desplazaron todo el líquido del medidor de volumen se pudo perder una parte de la producción de gas. En algunos digestores no se pudieron registrar medida de volumen ya que mantenían el nivel del medidor de volumen siempre al mínimo y al rellenarlos se vaciaban en cuestión de poco tiempo si se conectaban al sistema, indicando así una alta producción de gases. Otros sin embargo no registraban medida de volumen ya que el nivel del medidor de volumen se mantuvo siempre al máximo. Entre los días 2 y 5 y entre los días 8 y 15 se produjo un descenso excesivo del nivel de líquido del baño termostático debido a la coincidencia de que se haya producido algún día que no se haya acudido al laboratorio o fin de semana, con que el día previo no se haya dejado rebosando el baño a su máximo nivel, de manera que alguno de esos días la temperatura de las muestras pudo estar por debajo de la temperatura de trabajo.

		Fugas de gas	Vaciado del medidor de volumen	Inactividad digestor
Experimento 1:	1			
	2			
Experimento 2:	3	II	x	x
	4	I	I	
Experimento 3:	5			
	6	I	x	
Experimento 4:	7		II	
	8		III	
Experimento 5:	9	I		x
	10		I	
Experimento 6:	11			
	12		x	
Experimento 7:	13			
	14	II	x	
Experimento 8:	15	I	II	
	16		II	

TABLA 16. RELACIÓN DE INCIDENCIAS EN LA EXPERIMENTACIÓN

Tras esta relación de incidencias se puede decir que los digestores 3, 6, 9, 12, 14 son muestras problemáticas, ya que al observarlos y subsanar las posibles deficiencias durante todo el experimento nunca se lograron corregir, ni si quiera tras la reactivación de dichas muestras. El digestor 3 se vaciaba solo y después se mantuvo sin moverse; los digestores 6, 12, 14 se vaciaban solos; y el digestor 9 prácticamente se mantuvo sin moverse. La inactividad del reactor 9 podría deberse a una línea obstruida, ya que al reparar la fuga seguía registrando inactividad, pero al tomar muestra para la medida de composición la jeringuilla se llenaba sola de gas indicando una gran cantidad de gas acumulado en el digesto. El vaciado instantáneo de los medidores de volumen de los digestores 3, 6, 12 y 14 podría explicarse a través de una producción de gas muy alta en los mismos, para lo cual se necesitarían medidores de mucha mayor capacidad para comprobarlo. El cambio del digestor 3 de no poder medir su producción de gas a su inactividad podría deberse a que la producción cesó completamente, mientras que en los siguientes continuó hasta el final del experimento. Bajo estas interpretaciones y después de analizar las medidas detenidamente se concluye que se desconoce completamente la producción de gas en el digestor 9 debido a que nunca se pudo extraer de él gas, sin embargo, se puede observar que el digestor 3 y el 12 dieron toda su producción en los primeros días deteniéndose posteriormente, ya que el gas producido no fue capaz de vaciar completamente el medidor de volumen. En los digestores 6 y 14 se desconoce la cantidad de gas producido debido a que después del día 8 que vaciaron el medidor de volumen se dejaron de rellenar. Es de destacar que en todas las réplicas

problemáticas se consiguió ajustar a un pH de 8 unidades y se diferenciaban en la mayor parte de los experimentos con al menos un punto de pH con su otra réplica. Cabe considerar la posibilidad de que haya tenido lugar algún fenómeno que produjera el vaciado de los medidores de volumen como puede ser el de vasos comunicantes, debido a la interconexión de las líneas de descarga de los medidores de volumen.

Se destaca la dificultad en la mayoría de las muestras para ajustar el pH y esta dificultad era mayor al reactivar, por lo que se tomó como criterio añadir lentejas hasta que el pH estuviera en valores entre 7-9. Algunas muestras se ajustaron rápidamente a estos valores con pocas lentejas de hidróxido sodio mientras que otras requirieron de hasta 8 lentejas para ello. El pH de algunas muestras no cambiaba al añadir las lentejas, pero otras producían un cambio inmediato en el pH algunas veces pequeño y otros bruscos. La dificultad del ajuste supuso que algunos experimentos no alcanzaran un pH inicial de 7, así que entre réplicas del mismo experimento los pH iniciales no fueron del mismo orden y que solo en un experimento se haya conseguido ajustar el pH tras la reactivación.

Una vez finalizado cada experimento se utilizaron los datos de volumen y composición para comparar la cantidad y calidad del gas producido de los experimentos entre sí. Estos datos se procesaron y se representaron en Excel para obtener la distribución de la producción³¹ de gas de cada experimento y la distribución de su calidad³². Los resultados obtenidos de producción de gas se encuentran en el anexo I y los de composición en el anexo II. A continuación, se analizan los resultados obtenidos experimento por experimento primero analizando sus réplicas, después describiendo la curva de producción y finalmente describiendo la curva de composición. Se analiza la tendencia de cada curva, las reactivaciones, el periodo de producción y se descartarán los casos erróneos, valorando los errores de experimentación, las fugas, el descenso del nivel del líquido, la reactivación tardía de las muestras, el estado de maduración de las muestras, las condiciones experimentales, la posibilidad de interferencias entre productos, etc.

La composición del gas producido en los experimentos se ha analizado mediante un cromatógrafo de gases, analizando directamente el gas que se almacena dentro de los digestores, por lo que el grado de certeza es mayor que el obtenido para la producción, al no ser afectada directamente por factores como fugas, vasos comunicantes, u otros que pueden afectar a la producción. No obstante, la medida de composición está sujeta a una dispersión debida a pequeños errores experimentales, como: la variación de la temperatura de digestión debido al descenso del nivel de líquido de los baños termostáticos, la posible toma de muestras con pequeñas gotas de líquido o pérdidas de gas en la jeringa de inyección.

Se comparan las distribuciones de composición obtenidas de calidad y producción. Primero hay que tener en cuenta que el porcentaje de los componentes del gas producido que se mide está referido al almacenado en el digestor. El gas producido se va acumulando al previamente producido y se almacena en el digestor, al medir la composición no se logra representar la composición puntual sino la global en ese momento. También hay que tener en cuenta el comportamiento de la composición del gas cuando no hay producción, ya que debería mantenerse constante. Una alta dispersión en las medidas podría indicar la posible presencia de fugas en el digestor o un mal muestreo, por lo que no se contabiliza bien ni la producción, ni la calidad.

En los análisis de composición se reveló un componente no observado anteriormente en otros análisis similares. Durante los primeros días de experimentación se obtuvieron cromatogramas muy similares a los obtenidos en los estudios previamente realizados por el grupo de investigación, como el observado en el Gráfico 5.

³¹ **Distribuciones de producción:** curva que representa la evolución de la producción de gas con el tiempo. La producción es evaluada como el volumen específico acumulado de gas en condiciones normales

³² **Distribuciones de calidad:** curva que representa la evolución de la calidad del gas con el tiempo. La calidad del gas es evaluada a partir del porcentaje de CH₄ contenido en el digestor

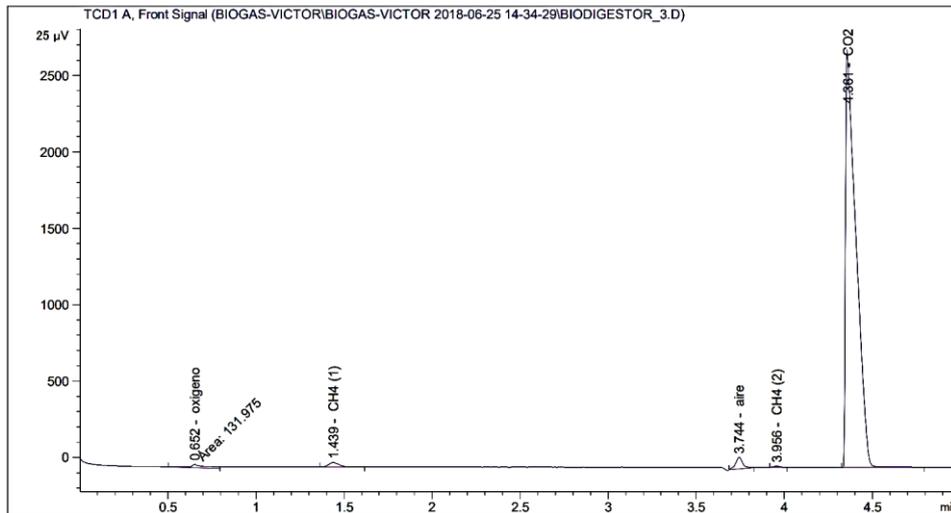


GRÁFICO 5. CROMATOGRAMAS INICIALES

Al décimo día del estudio se observó un comportamiento anómalo en el cromatograma cuando se comparaba con el obtenido por el grupo de investigación para otras muestras de biogás. Se trataba de un pico que aparecía con un tiempo de retención mucho más bajo de lo observado en el resto de los estudios realizados anteriormente, como se aprecia en el Gráfico 6.

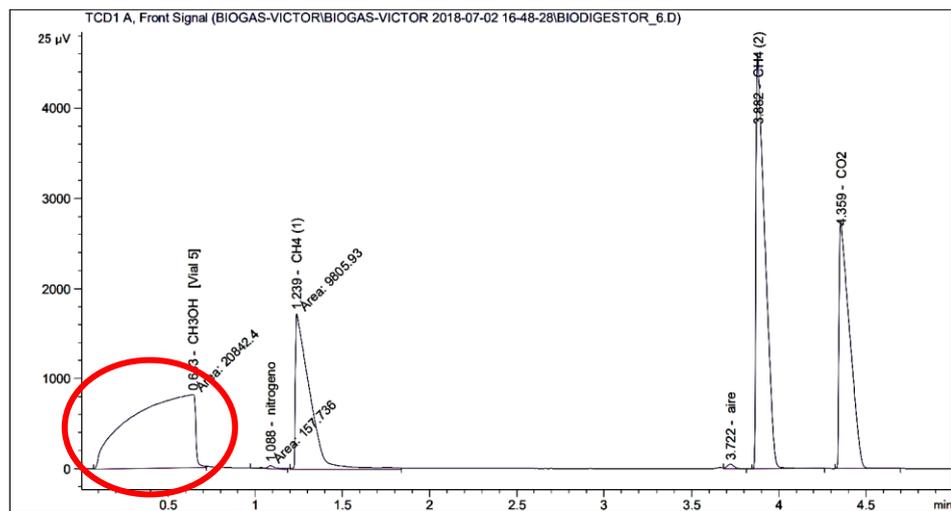


GRÁFICO 6. APARICIÓN DE UN PICO ANÓMALO

Tras repetirse este comportamiento varias veces, se probó a cambiar la duración de los análisis de los 5 a 8 minutos para comprobar si se trataba de un pico procedente de la muestra inyectada de forma previa. El cambio de duración de los análisis mostró que efectivamente se trataba de un solapamiento con la muestra previa, verificando así la presencia de hasta dos componentes diferentes que aparecían después de los 5 minutos y que no habían sido detectados previamente en ningún experimento de producción de biogás del grupo de investigación, como se puede observar en el Gráfico 7.

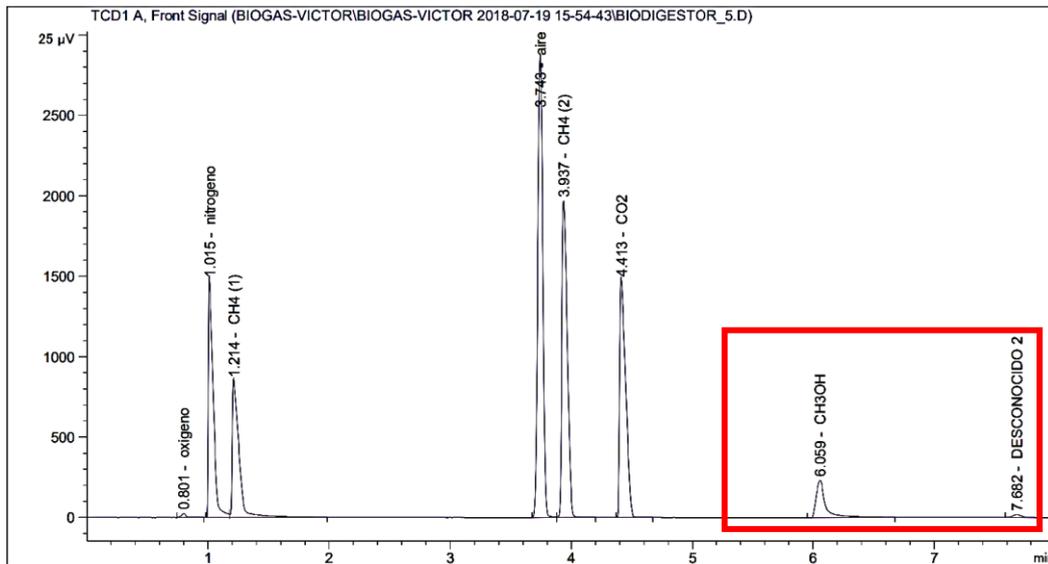


GRÁFICO 7. CROMATOGRAMAS FINALES

El primer componente se manifestaba como un pico en forma de aleta de tiburón y con un tiempo de retención entre los 5,7 y 6,4 minutos, cuya producción era considerable en los casos en los que se presentaba. El segundo componente se manifestaba como un pico en forma de una pequeña protuberancia y con un tiempo de retención entre los 7,2 y 7,7 minutos, pero que se descartó al ser su producción muy pequeña y menos frecuente. Debido a la naturaleza de las muestras es probable que sea algún tipo de alcohol, que debería identificarse en estudios posteriores.

Estos picos comenzaron a aparecer de manera frecuente a partir del día 15 en todos los experimentos, aunque normalmente de manera discontinua. Mediante las áreas cromatográficas y siguiendo la misma metodología que para el resto de los componentes se estimaron los porcentajes de este posible alcohol. Las distribuciones de “alcohol” fueron analizadas y comparadas con las de metano.

5.2. EXPERIMENTO 1:

5.2.1 ANÁLISIS DE RÉPLICAS:

El Experimento 1 corresponde a la disolución de césped sin inóculo. Esta muestra tiene 1 parte de césped y 3 partes de FORSU, además del bacilo y los correspondientes estabilizadores de pH. Ninguno de los componentes parecía especialmente deteriorado. El césped tiene una composición del 30% en sólidos, de los cuales el 86% son volátiles y el FORSU tiene una composición del 30% en sólidos, de los cuales el 96% son volátiles.

El pH medido de la muestra corresponde a 6,9 y 6,6 para cada réplica. Se ajustó a condiciones entre 7-9 añadiendo lentejas de hidróxido de sodio, alcanzando 7,3 y 8,2 unidades de pH para cada réplica. Cabe destacar la dificultad para ajustar el pH de la muestra, ya que en una réplica se usaron hasta 7 lentejas para ajustar el a pH a valores de 8 unidades, de modo que por este motivo al estar sobre las 7 unidades se paró el ajuste de pH.

Se realizó el experimento anaerobio obteniéndose la siguiente producción de gas para cada una de sus réplicas, como se presenta en el Gráfico 8.

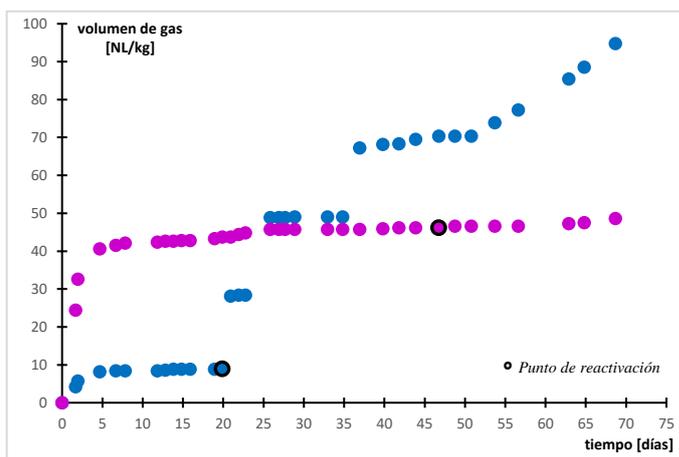


GRÁFICO 8. ANÁLISIS DE CURVAS DE PRODUCCIÓN: MUESTRA 1 Y 2

La **primera réplica M1** con un pH inicial de 7,3, sigue una tendencia escalonada, produciendo 95 NL de gas, dicha producción sigue en aumento hasta finalizar el experimento. La muestra se estabilizó a los 14 días después de una pequeña producción. El día 20 fue reactivada y tras esta reactivación se produjo un aumento en la producción que tuvo lugar en dos etapas, una primera producción muy rápida seguida de un periodo de inactividad para después de nuevo reactivarse por sí misma y no volverse a estabilizar. La reactivación muestra un descenso en el

pH durante la primera etapa de producción hasta 5,5, que se ajustó a un valor de 7,1 para volver a activar el sistema.

La **segunda réplica M2** con un pH inicial de 8,2, sigue una tendencia estándar, produce 48 NL de gas y parece tender a estabilizarse o seguir dando una producción, pero muy pequeña al finalizar el experimento. La muestra se empezó a estabilizar a partir del día 8 después de una notable producción inicial, pero a partir del día 16 aparece una pequeña producción que se termina de estabilizar el día 43. El día 47 fue reactivada y tras esta reactivación no se observa ningún cambio significativo en la producción, sólo un ligero aumento al final del experimento. La reactivación muestra un descenso en el pH durante la primera etapa de producción hasta 5,3, que se ajustó a un valor de 7,5 para volver a activar el sistema.

Aunque una curva tiene forma escalonada y la otra más continua puede apreciarse un comportamiento algo similar con diferencia en la suavidad en la que se producen los cambios de producción. Si se consideran las bajas producciones de M2 después del día 8 la primera estabilización de ambas réplicas se produce de manera parecida, las dos réplicas responden a la reactivación, aunque no en la misma magnitud y además no llegan a estabilizar su producción después de 69 días. Las diferencias de comportamiento entre dichas curvas y la gran diferencia de producción no se pueden justificar por medio de algún error experimental, ya

que no se encontraron incidencias que afecten a dichos digestores (Tabla 16). Como posibles causas se puede destacar la extracción de muestra de M1 y la diferencia inicial de pH entre las réplicas observando que la réplica 1, con un pH más ácido, tiene un mayor retardo y una producción menos continua, pero que produce casi el doble de gas. Además, la variabilidad experimental que surge con este tipo de muestras y experimentos puede sugerir la necesidad de tomar más réplicas.

Tras no observarse ninguna incidencia experimental y ante las justificaciones anteriores se procede a definir la curva de producción del experimento 1 como la media de sus dos réplicas.

5.2.2 PRODUCCIÓN DE GAS:

A continuación, a partir del Gráfico 9, se analiza la producción de gas del experimento 1 mediante la descripción de la curva de producción media obtenida de las muestras M1 y M2:

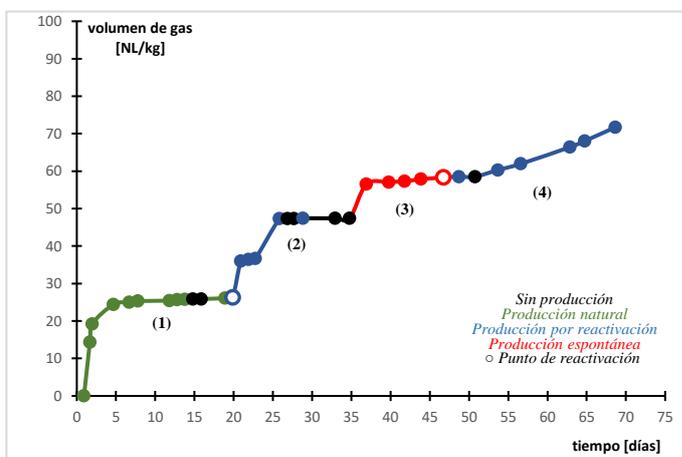


GRÁFICO 9. CURVA DE PRODUCCIÓN: EXPERIMENTO 1

(1) La degradación de la muestra produce una primera etapa de metanización en la que se obtienen 26 NL de gas. La distribución de gas sigue una tendencia estándar donde se observa producción de gas desde el inicio, es decir no hay un periodo de inducción, comenzando a estabilizarse a los 5 días, por lo que se decide reactivar tras 15 días sin observar producción.

(2) La reactivación de la muestra produce una respuesta directa del sistema. Se da una nueva producción en la que se obtienen 21 NL de gas. La distribución

de gas sigue una tendencia con forma de doble escalón, observando que ambos escalones tienen comportamientos similares y se encuentran muy próximos entre sí. Esta distribución se podría justificar como un doble pico de producción debido a la reactivación y que se estabiliza en 9 días. Este comportamiento fue observado por Bodelón C. 2018 y Chocho A. 2016 para otras mezclas.

(3) Posteriormente a los 6 días después de la estabilización total de la etapa anterior se da un aumento en la producción, que ocurre de forma espontánea sin ayuda de ninguna reactivación, y en la que se obtienen 11 NL de gas. La distribución sigue una tendencia en escalón parecida al caso anterior, pero en la que se observa un retardo con respecto a los anteriores escalones y una estabilización más lenta.

(4) Tras una segunda reactivación se da una nueva producción de 13 NL de gas, pero esta reactivación ocurre en M2 mientras que la producción se da en M1, por lo que esta producción no se puede justificar con dicha reactivación, sino que es de forma espontánea. La distribución de gas sigue una tendencia creciente que se extiende durante 18 días sin que llegue a detenerse.

Por tanto, se asume que el tercer tramo puede ser un pico de producción perteneciente a la segunda etapa producción que aparece con un retardo, mientras que el cuarto tramo puede indicar la autoreactivación del digestato tras la activación de nuevas bacterias por algún cambio en las condiciones internas de la muestra. La distribución parece fiable si la acotamos hasta el día 51, eliminando su último tramo y asumiendo que la producción se para después de dicha estabilización, pero sería interesante el estudio de muestras similares dejando dichas muestras durante más tiempo, para comprobar esto.

5.2.3 COMPOSICIÓN DE METANO EN EL GAS:

A continuación, se analiza la calidad del gas producido en el experimento 1 mediante la descripción de la curva de composición en metano de la muestra M1 presentada en Gráfico 10:

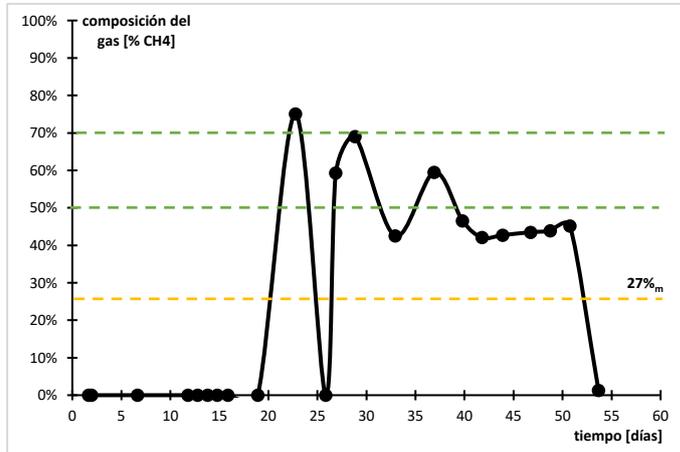


GRÁFICO 10. CURVA DE CALIDAD: EXPERIMENTO 1

La muestra tarda 23 días en producir metano, dándose una producción media del 44% en la zona de producción. La producción crece rápidamente para alcanzar un máximo del 75% y a partir de ahí sigue una tendencia decreciente que oscila entre el 40 y 70%. La curva se empieza a estabilizar a partir del día 42 en torno al 40% de metano. Al comienzo de la producción de metano se da una caída que se recupera de manera rápida y que puede ser debida a una fuga en la jeringa donde se toma la muestra. Este comportamiento también se observa el último día.

5.2.4 RELACIÓN ENTRE PRODUCCIÓN Y COMPOSICIÓN:

Finalmente, a partir del Gráfico 11, se analiza la relación entre la producción y los cambios en la composición muestra, tanto de metano como del posible alcohol.

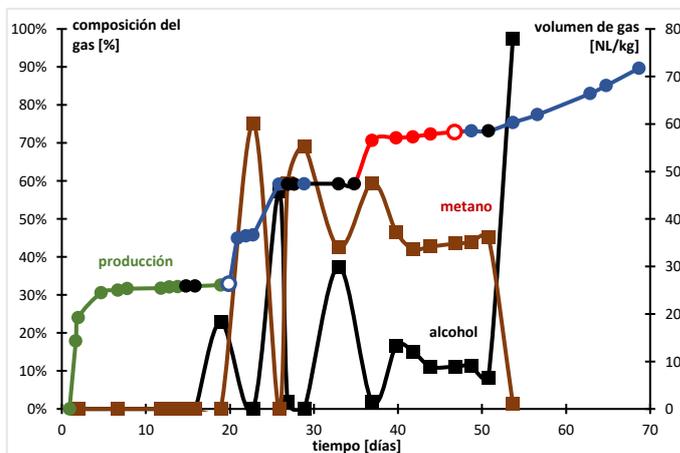


GRÁFICO 11. COMPARATIVA ENTRE COMPOSICIÓN Y PRODUCCIÓN: EXPERIMENTO 1

La muestra no produce metano en la primera fase de degradación, es después de la reactivación cuando comienza la producción de metano y alcohol. La producción de metano disminuye mientras que la de alcohol sigue un comportamiento más oscilante. La producción media de alcohol en todo el experimento es del 14%, con un máximo del 97% y un mínimo del 0%. Se puede destacar que las dos caídas en la producción de metano coinciden con los dos picos de producción de alcohol y que pueden deberse a un cambio en los procesos internos de la muestra, ya que esos días coinciden con periodos de producción, de manera que el gas producido puede desplazar todo el gas contenido anteriormente en el digestor, esto sería de gran interés corroborarlo en futuros estudios.

5.3. EXPERIMENTO 2:

5.3.1 ANÁLISIS DE RÉPLICAS:

El Experimento 2 corresponde a la disolución de césped con inóculo. Se trata de la misma muestra que el experimento 1, con el césped y FORSU en la misma proporción, el bacilo y los correspondientes estabilizadores de pH, pero a la que se le añade inóculo. Como inóculo se añade el equivalente lodo de depuradora como para conseguir la misma cantidad de SV que el residuo. Ninguno de los componentes parecía especialmente deteriorado. El césped y el FORSU tienen la misma composición que en el experimento 1, mientras que el inóculo tiene una composición del 7% en sólidos, de los cuales el 69% son volátiles.

El pH medido de la muestra corresponde a 7,1 y 7,3 para cada réplica. Se ajustó a condiciones entre 7-9 añadiendo lentejas de hidróxido de sodio, alcanzando 8,9 y 8,5 unidades de pH para cada réplica.

Se realizó el experimento anaerobio obteniéndose la siguiente producción de gas para cada una de sus réplicas, como se presenta en el Gráfico 12 Gráfico 8.

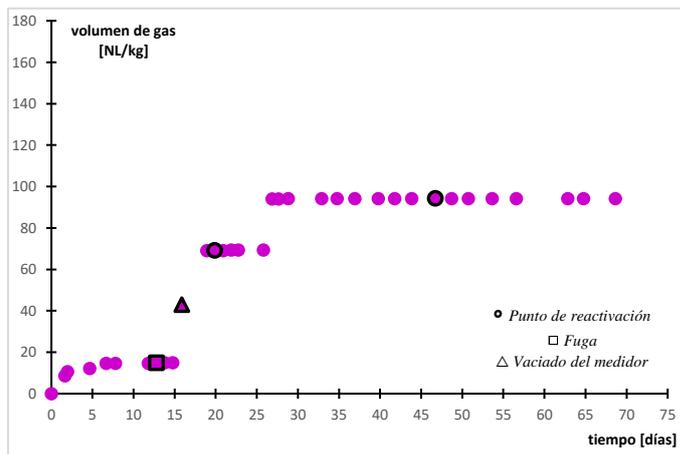


GRÁFICO 12. ANÁLISIS DE CURVAS DE PRODUCCIÓN: MUESTRA 3 Y 4

La primera réplica M3 no se tomó en cuenta ya que fue una de las muestras problemáticas, como se detalla en la introducción experimental. Si se interpreta su producción como se concluye en dicha introducción se observa una degradación muy rápida en la cual se produce todo el gas en apenas 7 días. Durante todos esos días se pudo perder una parte de la producción del gas debido a que continuamente se encontraron los medidores de volumen vaciados. Se encontraron fugas que se corrigieron en los días 7 y el 13. El día 20 y 33 se intentó reactivar sin éxito.

La segunda réplica M4 con un pH inicial de 8,5, sigue una tendencia escalonada, produce 94 NL de gas y su producción cesa desde el día 28. La muestra se empezó a estabilizar a partir del día 7 después de una pequeña producción, pero el día 15 se produjo un pico de producción que se estabilizó rápidamente. El día 20 fue reactivada y después de un retardo de 7 días tras la activación, se produjo un pico de producción para finalmente estabilizarse. La reactivación indica un descenso en el pH durante la primera etapa de producción hasta 6,2, que se ajustó a un valor de 7,1 para volver a activar el sistema. El día 47 se intentó reactivar de nuevo la muestra, pero al observar que no se había acidificado se conectó de nuevo al sistema y esta no volvió a producir. La segunda reactivación indica un aumento en el pH durante la segunda etapa de producción hasta 7,9. Se pudo perder parte de la producción debido a que el día 13 se corrigió una fuga y el 16 se encontró al mínimo el nivel del medidor de volumen.

Tras el descarte de la réplica M3, se procede a definir la curva de producción del experimento 2 a partir de la réplica M4. La única incidencia significativa que pudo haber afectado a este experimento es la detección de una fuga en el digestor 4, aunque la distribución sigue un comportamiento aceptable.

5.3.2 PRODUCCIÓN DE GAS:

A continuación, a partir del Gráfico 13, se analiza la producción de gas del experimento 2 mediante la descripción de la curva de producción de la muestra M4:

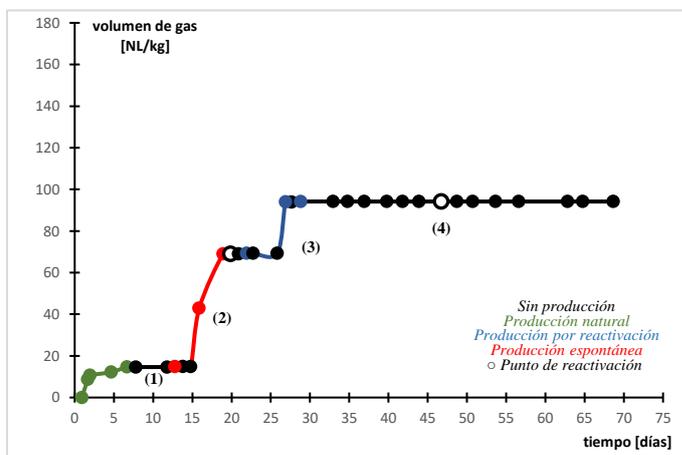


GRÁFICO 13. CURVA DE PRODUCCIÓN: EXPERIMENTO 2

(1) La degradación de la muestra produce una primera etapa de metanización en la que se obtienen 15 NL de gas. La distribución de gas sigue una tendencia estándar y se estabiliza a los 8 días.

(2) Unos días después de la estabilización total de la anterior etapa se da una producción que ocurre espontáneamente sin ayuda de ninguna reactivación y en la que se obtienen 54 NL de gas. Primero se da una producción puntual muy pequeña que ocurre a los 5 días y 3 días después de esta se da una

fuerte producción en forma de escalón que ocurre de manera brusca y que se estabiliza rápidamente. Esta tendencia fue observada por Bodelón C. 2018 y Chocho A. 2016.

(3) Nada más terminar la etapa de producción anterior se lleva a cabo la reactivación de la muestra, produciendo una respuesta con un pequeño retardo en el sistema. Se da una nueva producción en la que se obtienen 25 NL de gas. Primero se da una producción puntual muy pequeña que ocurre a los 3 días de la reactivación y después se da una producción en forma de escalón que ocurre a los 7 días, de manera brusca y que se estabiliza rápidamente.

(4) Se realiza una segunda reactivación 20 días después de la última producción, pero no se logra obtener producción, por lo que parece que la muestra está desactivada.

En este experimento se pueden destacar las producciones puntuales que ocurren, las cuales siguen un comportamiento similar: primero se da una pequeña producción puntual y posteriormente se produce una producción en escalón que se estabiliza rápidamente. Las producciones puntuales podrían deberse a una agitación diferente de la muestra que no haya permitido escapar al gas producido anteriormente, pero como siempre preceden a una posterior etapa de producción parecen indicar el comienzo de una nueva etapa de degradación de otros componentes presentes en la muestra con mayor dificultad de degradación. Por lo tanto, se puede asumir que la segunda etapa de producción ocurre debido al comienzo de la degradación de otros residuos en la muestra o a la autoreactivación del digestato como fenómeno ya observado en el experimento anterior.

5.3.3 COMPOSICIÓN DE METANO EN EL GAS:

A continuación, se analiza la calidad del gas producido en el experimento 2 mediante la descripción de la curva de composición en metano de la muestra M3 presentada en el Gráfico 14.

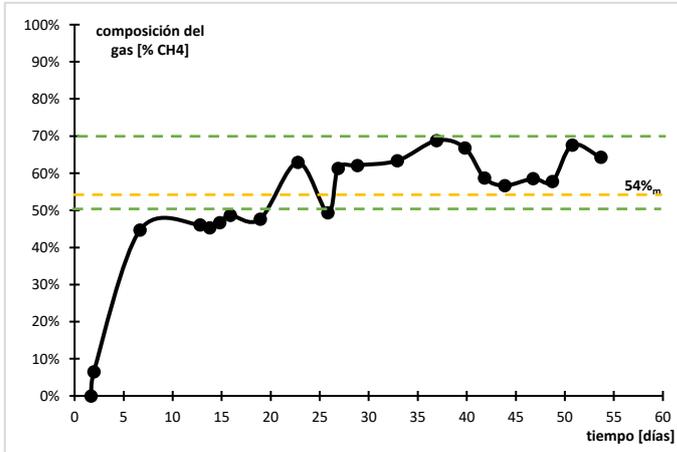


GRÁFICO 14. CURVA DE CALIDAD: EXPERIMENTO 2

50 y 70%, alcanzando un máximo del 69%.

El muestreo de este experimento se realizó sobre la réplica M3 a partir de la cual no se pudo realizar el estudio de producción. El comportamiento de esta muestra asegura una gran producción hasta el día 7 y una parada prácticamente instantánea después, como se detalla en la introducción. La muestra produce metano desde el principio y se da una producción media del 54%, de manera que el gas producido en el experimento se puede considerar “biogás”. La producción crece rápidamente y a partir del día 7 sigue una tendencia ligeramente creciente que oscila entre el

5.3.4 RELACIÓN ENTRE PRODUCCIÓN Y COMPOSICIÓN:

Finalmente, a partir de Gráfico 15, se analiza la relación entre la producción y los cambios en la composición muestra, tanto de metano como del posible alcohol.

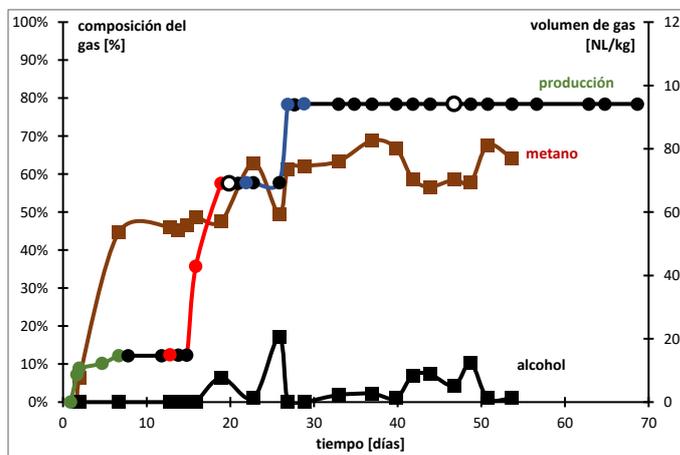


GRÁFICO 15. COMPARATIVA ENTRE COMPOSICIÓN Y PRODUCCIÓN: EXPERIMENTO 2

un comportamiento en promedio más o menos regular de las dos distribuciones de componentes, sin la presencia de picos ni caídas.

Hay que resaltar que la producción y la composición son tomadas de réplicas diferentes, pero esta comparación puede servir como una aproximación. La muestra produce metano en la primera fase de degradación, mientras que no es hasta la segunda etapa cuando se empieza a producir alcohol. La producción de metano aumenta mientras que la de alcohol se mantiene estable. La composición de la mezcla se estabiliza con la parada de la producción. La producción media de alcohol en todo el experimento es del 5%, con un máximo del 17% y un mínimo del 0%. Se destaca

5.4. EXPERIMENTO 3:

5.4.1 ANÁLISIS DE RÉPLICAS:

El Experimento 3 corresponde a la disolución de la mezcla de residuos vegetales sin inóculo. Esta muestra tiene 1 parte de la mezcla vegetal y 3 partes de FORSU, además del bacilo y los correspondientes estabilizadores de pH. Ninguno de los componentes parecía especialmente deteriorado. La mezcla vegetal tiene una composición del 27% en sólidos, de los cuales el 85% son volátiles y el FORSU tiene la misma composición que en los experimentos anteriores.

El pH medido de la muestra corresponde a 6,6 y 6,5 para cada réplica. Se ajustó a condiciones entre 7-9 añadiendo lentejas de hidróxido de sodio, alcanzando 7,0 y 8,6 unidades de pH para cada réplica.

Se realizó el experimento anaerobio obteniéndose la siguiente producción de gas para cada una de sus réplicas, como se presenta en el Gráfico 16.

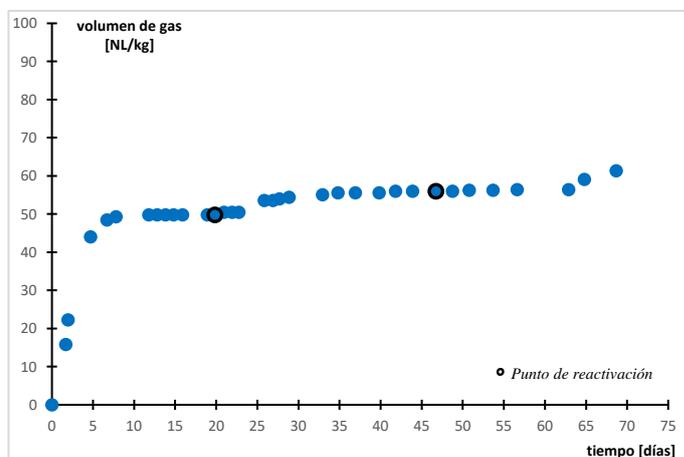


GRÁFICO 16. ANÁLISIS DE CURVAS DE PRODUCCIÓN: MUESTRA 5 Y 6

descenso en el pH durante la primera etapa de producción hasta 5,5, que se ajustó a un valor de 7,2 para volver a activar el sistema. Tras la segunda reactivación y después de un retardo de 14 días se produjo una producción notable y decreciente que no se vuelve a estabilizar. La segunda reactivación nos indica un descenso en el pH durante la primera etapa de producción hasta 5,6, que se ajustó a un valor de 8,5 para volver a activar el sistema.

La **segunda réplica M6** no se tomó en cuenta ya que fue una de las muestras problemáticas, como se detalla en la introducción experimental. De acuerdo con dicha introducción se concluye que se desconoce la distribución de producto, así como su producción total, ya que después del día 8 en el que se vació el medidor de volumen se dejó de rellenar. El día 33 se intentó reactivar y al conectar el sistema seguía produciendo el mismo efecto instantáneo en los medidores de volumen.

Tras el descarte de la réplica M6, se procede a definir la curva de producción del experimento 3 a partir de la réplica M5.

La **primera réplica M5** con un pH inicial de 7,0, sigue una tendencia estándar, produce 61 NL de gas y sigue dando una producción considerable al finalizar el experimento. La muestra se estabilizó a los 13 días después de una producción notable. El día 20 fue reactivada y tras esta reactivación, se produjo de manera directa una activación del sistema primero aumentando un poco y posteriormente en forma de pequeñas producciones de manera discontinua y que continuaron en el tiempo hasta la segunda reactivación en el día 47. La primera reactivación nos indica un

5.4.2 PRODUCCIÓN DE GAS:

A continuación, a partir del Gráfico 17, se analiza la producción de gas del experimento 3 mediante la descripción de la curva de producción de la muestra M5:

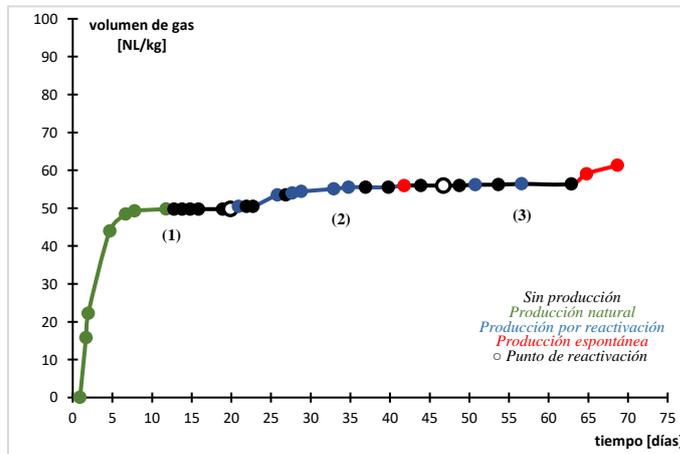


GRÁFICO 17. CURVA DE PRODUCCIÓN: EXPERIMENTO 3

(1) La degradación de la muestra produce una primera etapa de metanización en la que se obtienen 50 NL de gas. La distribución de gas sigue una tendencia estándar que se estabiliza a los 13 días.

(2) 7 días después de la estabilización de la producción se lleva a cabo la reactivación de la muestra, produciendo una respuesta directa del sistema. Se da una nueva producción en la que se obtienen 7 NL de gas. La distribución de gas alterna periodos de producción puntuales con periodos de producción

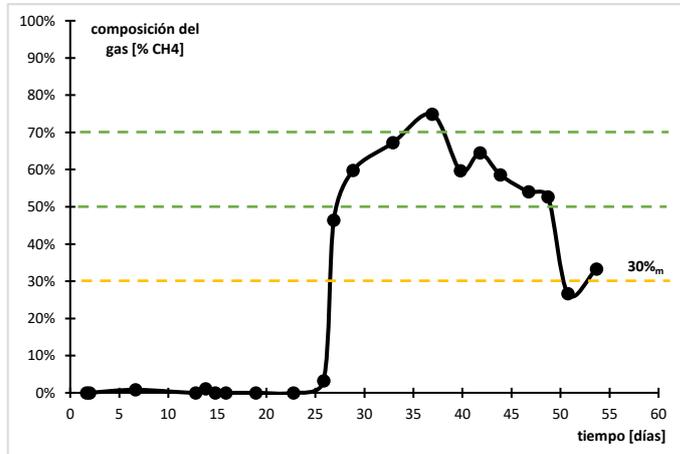
suaves. Primero se da una producción puntual muy pequeña, después, a los pocos días se da una producción más notable que se detiene con rapidez, posteriormente y de manera casi seguida a la anterior, se da una producción muy suave que tarda en estabilizarse completamente varios días y finalmente varios días después se da otra producción puntual muy pequeña.

(3) Varios días después de la estabilización de la muestra y la última producción puntual se realiza una segunda reactivación. La reactivación provoca dos producciones puntuales muy pequeñas, que preceden a una producción suave y decreciente que ocurre durante 6 días sin que se estabilice. La reactivación y todas estas producciones se distribuyen de manera regular con 5-6 días de separación entre ambas. Las producciones puntuales dan como resultado un total de 0,5 NL de gas, mientras que la producción final 5 NL.

Al igual que en el experimento anterior se observan varias producciones puntuales que preceden a una etapa posterior de producción. La segunda etapa de producción de acuerdo con la forma de la curva podría explicarse como una producción continua debida a la reactivación de la muestra, si se atribuyen las pequeñas paradas de producción a la agitación de la muestra. La tercera etapa parece no ser debida a la reactivación por el gran retardo de producción, sin embargo, las producciones puntuales y la separación entre las producciones de esta etapa parecen indicar la degradación de componentes de la muestra con mayor dificultad de degradación.

5.4.3 COMPOSICIÓN DE METANO EN EL GAS:

A continuación, se analiza la calidad del gas producido en el experimento 3 mediante la descripción de la curva de composición en metano de la muestra M5 presentada en el Gráfico 18:

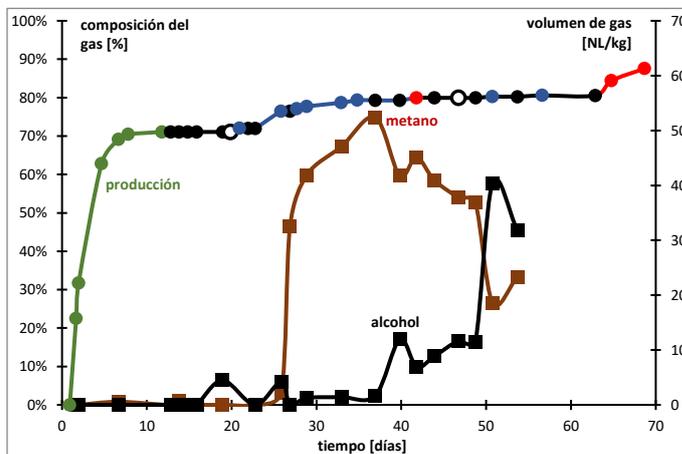


La muestra tarda 26 días en producir metano, ya que, aunque se dan dos producciones del 1% anteriormente, son pequeñas y aisladas y pueden deberse al error experimental. La producción media en zona de producción es del 50%. La producción sigue una tendencia convexa que crece rápidamente para alcanzar un máximo del 75% y posteriormente decrecer.

GRÁFICO 18. CURVA DE CALIDAD: EXPERIMENTO 3

5.4.4 RELACIÓN ENTRE PRODUCCIÓN Y COMPOSICIÓN:

Finalmente, a partir del Gráfico 19, se analiza la relación entre la producción y los cambios en la composición muestra, tanto de metano como del posible alcohol.



La muestra no produce metano en la primera fase de degradación, es después de la reactivación cuando comienza la producción de metano y alcohol. Primero la producción de metano aumenta mientras que la de alcohol se mantiene estable. Posteriormente la producción de metano decrece mientras que la de alcohol aumenta. La producción media de alcohol en todo el experimento es del 10%, con un máximo del 58% y un mínimo del 0%.

GRÁFICO 19. COMPARATIVA ENTRE COMPOSICIÓN Y PRODUCCIÓN: EXPERIMENTO 3

5.5. EXPERIMENTO 4:

5.5.1 ANÁLISIS DE RÉPLICAS:

El Experimento 4 corresponde a la disolución de la mezcla de residuos vegetales con inóculo. Se trata de la misma muestra que el experimento 3, con los residuos vegetales y FORSU en la misma proporción, el bacilo y los correspondientes estabilizadores de pH, pero a la que se inóculo según se describe en los anteriores experimentos con inóculo. Ninguno de los componentes parecía especialmente deteriorado. La mezcla vegetal y el FORSU tienen la misma composición que en el experimento 3 y el inóculo tiene la misma composición que la de los experimentos con inóculo anteriores.

El pH medido de la muestra corresponde a 7,1 para ambas réplicas. Se ajustó a condiciones entre 7-9 añadiendo lentejas de hidróxido de sodio, alcanzando 7,3 y 7,2 unidades de pH para cada réplica.

Se realizó el experimento anaerobio obteniéndose la siguiente producción de gas para cada una de sus réplicas, como se presenta en el Gráfico 20:

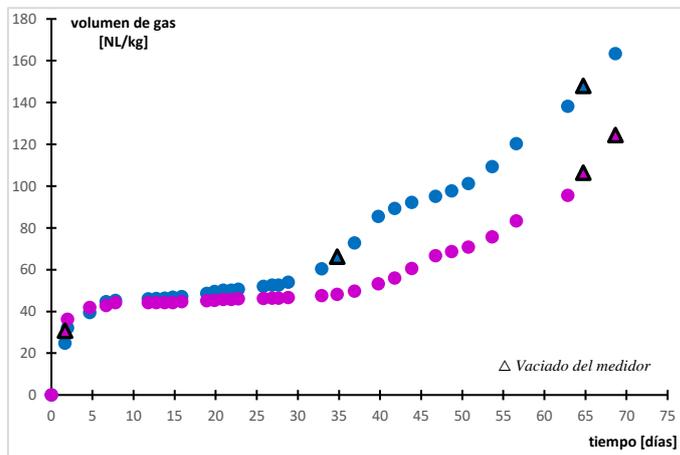


GRÁFICO 20. ANÁLISIS DE CURVAS DE PRODUCCIÓN: MUESTRA 7 Y 8

La primera réplica M7 con un pH inicial de 7,3, sigue una tendencia estándar al principio y después ascendente, produce 163 NL de gas y sigue dando una alta producción al finalizar el experimento. La muestra se empezó a estabilizar a partir de la segunda semana tras una notable producción, pero después de la tercera semana se da una producción ascendente que se mantuvo hasta el final del experimento. Al no llegarse a estabilizar no precisó reactivación. Se pudo perder parte de la producción debido a que el día 35 y 65 se encontró

al mínimo el nivel del medidor de volumen, lo que evidencia la alta producción de gas en esta muestra.

La segunda réplica M8 con un pH inicial de 7,2, sigue una tendencia estándar al principio y después ascendente, produce 124 NL de gas y sigue dando una alta producción al finalizar el experimento. La muestra se empezó a estabilizar a partir de la segunda semana tras una notable producción, pero después de la tercera semana se da una producción ascendente que se mantuvo hasta el final del experimento. Al no llegarse a estabilizar no precisó reactivación. Se pudo perder parte de la producción debido a que el día 2, 65 y 69 se encontró al mínimo el nivel del medidor de volumen, evidenciándose nuevamente la alta producción de gas de la muestra.

La tendencia de la curva y la producción máxima es similar entre las réplicas, aunque el ascenso de M8 se produzca de una manera un poco más suave y su producción sea menor (destacando que el medidor de volumen se vació una vez más en esta). Se procede a definir la curva de producción del experimento 4 como la media de sus dos réplicas, donde la segunda parte de ambas curvas indican una autoreactivación del digestato.

5.5.2 PRODUCCIÓN DE GAS:

A continuación, a partir del Gráfico 21 se analiza la producción de gas del experimento 4 mediante la descripción de la curva de producción media obtenida de las muestras M7 y M8.

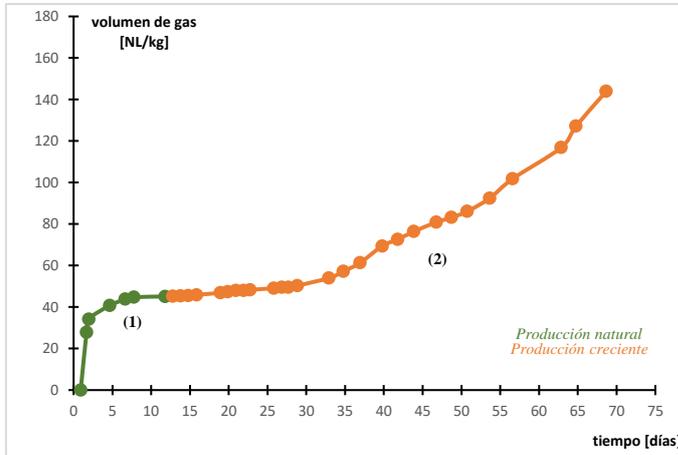


GRÁFICO 21. CURVA DE PRODUCCIÓN: EXPERIMENTO 4

(1) La degradación de la muestra produce una primera etapa de metanización en la que se obtienen 45 NL de gas. La distribución de gas sigue una tendencia estándar que se empieza a estabilizar a los 7 días, pero que no se llega a detener.

(2) A partir del día 12 sin que la etapa anterior se haya estabilizado, se da una producción espontánea que ocurre sin ayuda de ninguna reactivación y en la que se obtienen 99 NL de gas. La distribución sigue una tendencia ascendente que se mantuvo hasta el final

del experimento. La producción tiene una forma análoga a las encontrada por Martín C. 2018 para residuos vegetales, además de observar en dicho trabajo que la producción se mantiene unos días más.

No fue necesario reactivar la muestra, ya que la producción nunca se detuvo.

5.5.3 COMPOSICIÓN DE METANO EN EL GAS:

A continuación, se analiza la calidad del gas producido en el experimento 4 mediante la descripción de la curva de composición en metano de la muestra M7 presentada en el Gráfico 22:

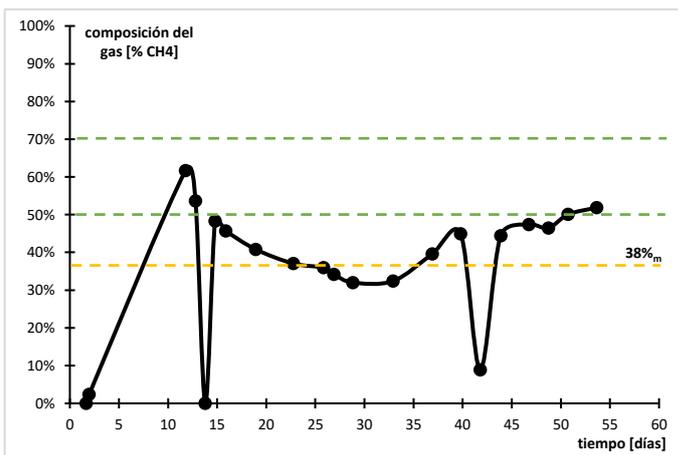


GRÁFICO 22. CURVA DE CALIDAD: EXPERIMENTO 4

La muestra parece producir metano desde el comienzo del experimento y se da una producción media del 38%. La producción crece rápidamente para alcanzar un máximo del 62% y a partir de ahí sigue una tendencia cóncava bastante regular que alcanza un mínimo del 32%. Existen dos puntos de baja concentración de metano que pueden ser debido al error de la medida con la jeringa de gases. La curva se empieza a estabilizar a partir del día 40 en torno al 50% de metano.

5.5.4 RELACIÓN ENTRE PRODUCCIÓN Y COMPOSICIÓN:

Finalmente, a partir del Gráfico 23, se analiza la relación entre la producción y los cambios en la composición muestra, tanto de metano como del posible alcohol.

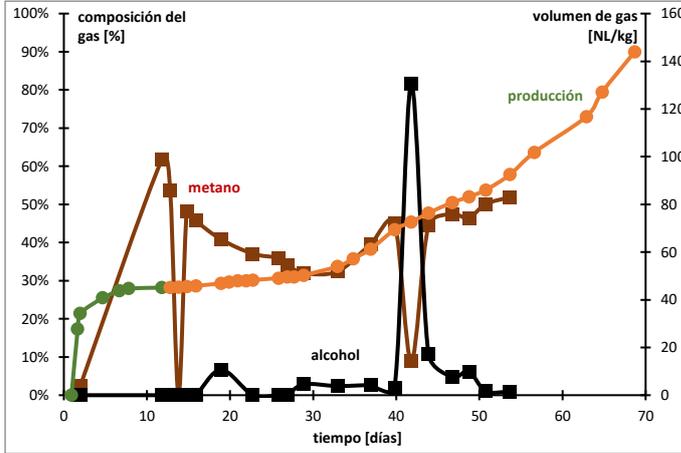


GRÁFICO 23. COMPARATIVA ENTRE COMPOSICIÓN Y PRODUCCIÓN: EXPERIMENTO 4

La muestra produce metano en la primera fase de degradación, mientras que no es hasta la segunda etapa cuando se empieza a producir “alcohol”. La producción de metano sigue una tendencia descendente y después ascendente en la segunda etapa, mientras que la de alcohol se mantiene estable. La producción media de alcohol en todo el experimento es del 6%. Al final del experimento la concentración de metano parece seguir en aumento de manera análoga a la producción total, mientras que la de alcohol parece estar detenida. Se puede destacar que la primera caída en la producción de metano no coincide

con ningún pico de alcohol por lo que posiblemente se deba a errores en el análisis cromatográfico, mientras que la segunda caída si coincide, pudiéndose explicar cómo en el experimento 1 al coincidir con un periodo de alta producción.

5.6. EXPERIMENTO 5:

5.6.1 ANÁLISIS DE RÉPLICAS:

El Experimento 5 corresponde al digestato de césped sin inóculo. El digestato es obtenido a partir de la degradación aerobia de una disolución de césped con bacilo. La muestra anaerobia tiene una 1 parte de la fracción sólida del digestato y 3 partes de FORSU, además del bacilo y los correspondientes estabilizadores de pH. Ninguno de los componentes parecía especialmente deteriorado. Partimos de césped que tiene una composición del 30% en sólidos, de los cuales el 86% son volátiles, obteniendo una fracción sólida digerida con un 11% en sólidos, de los cuales el 93% son volátiles. El FORSU, tiene la misma composición que en los experimentos anteriores.

Para la digestión aerobia previa, el pH medido de la muestra corresponde a 9,0 y se ajustó a condiciones próximas a 5 añadiendo ácido sulfúrico, alcanzando 4,8 unidades de pH. Tras finalizar el experimento se alcanzó un pH de 5,1. Para la digestión anaerobia el pH medido de la muestra corresponde a 6,2 para ambas réplicas. Se ajustó a condiciones entre 7-9 añadiendo lentejas de hidróxido de sodio, alcanzando 8,1 y 7,2 unidades de pH para cada réplica.

Se realizó el experimento anaerobio obteniéndose la siguiente producción de gas para cada una de sus réplicas, como se presenta en el Gráfico 24.

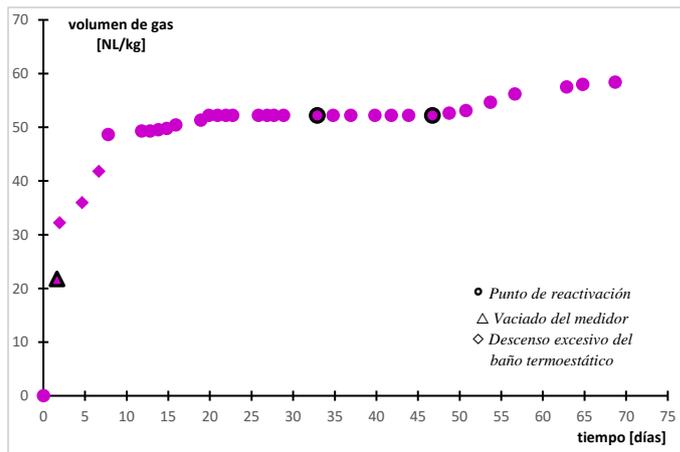


GRÁFICO 24. ANÁLISIS DE CURVAS DE PRODUCCIÓN: MUESTRA 9 Y 10

La muestra se estabilizó a los 21 días después de una notable producción. El día 33 fue reactivada y tras esta reactivación no se produjo producción, por lo que se volvió a reactivar el día 47. Tras la segunda reactivación se produjo de manera instantáneamente una producción que se fue suavizando pero que no se estabiliza. Con la reactivación se observó un descenso en el pH hasta 5,2, que se ajustó a un valor de 7,1 para volver a activar el sistema. Se pudo perder parte de la producción debido a que el día 2 se encontró al mínimo el nivel del medidor de volumen.

Tras el descarte de la réplica M9, se procede a definir la curva de producción del experimento 5 a partir de la réplica M10.

La primera réplica M9 no se tomó en cuenta ya que fue una de las muestras problemáticas, como se detalla en la introducción experimental. Se desconoce completamente su producción de gas al no haberse podido extraer gas de este nunca, ni siquiera después de haberse intentado reactivar el día 20 ni de la reparación de una fuga detectada el día 40.

La segunda réplica M10 con un pH inicial de 7,2, sigue una tendencia estándar, produce 58 NL de gas y sigue dando una pequeña producción al hasta

5.6.2 PRODUCCIÓN DE GAS:

A continuación, a partir del Gráfico 25 se analiza la producción de gas del experimento 5 mediante la descripción de la curva de producción de la muestra M10:

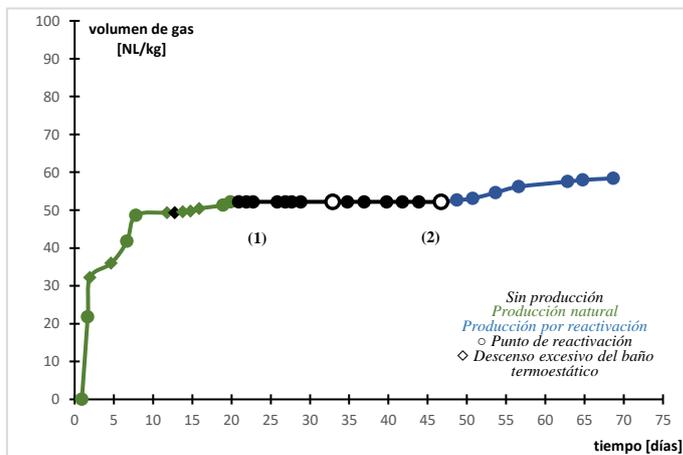


GRÁFICO 25. CURVA DE PRODUCCIÓN: EXPERIMENTO 5

(1) La degradación de la muestra produce una primera etapa de metanización en la que se obtienen 52 NL de gas. La distribución de gas sigue una tendencia estándar, aunque un poco irregular y se estabiliza a los 21 días. Mientras que en el resto de los experimentos la producción inicial tiene una forma de escalón que se estabiliza gradualmente, en este experimento se aprecia un comportamiento más irregular con forma una forma cóncava antes de la estabilización que se puede relacionar con el descenso excesivo del nivel de líquido del baño termostático

que ocurrió durante esos días y que pudo frenar la producción. También se da una parada de producción puntual aislada que podría deberse a la agitación de la muestra.

(2) Tras 12 días de estabilización se prueba a reactivar la muestra, pero tras esta no se consigue volver a producir, por lo que parece que la muestra está desactivada. Después de 26 días de la reactivación se intenta reactivar de nuevo observando una respuesta directa del sistema. Se da una nueva producción en la que se obtienen 6 NL de gas. La distribución de gas sigue una tendencia suave que se extiende por 16 días y que no se llega a estabilizar.

La curva de producción tiene un comportamiento análogo al de otros experimentos. La dificultad para activar la muestra de nuevo junto con la respuesta suave que produce parece indicar que queda poco sustrato disponible en la muestra.

5.6.3 COMPOSICIÓN DEL GAS:

A continuación, se analiza la calidad del gas producido en el experimento 5 mediante la descripción de la curva de composición en metano de la muestra M9 presentada en el Gráfico 26.

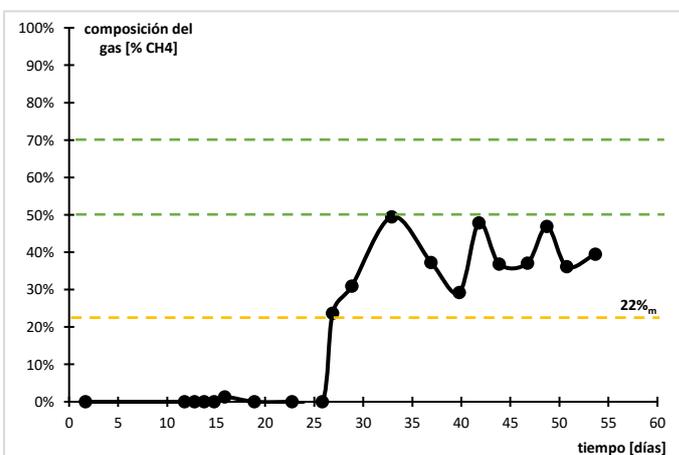


GRÁFICO 26. CURVA DE CALIDAD: EXPERIMENTO 5

El muestreo de este experimento se realizó sobre la réplica M9 a partir de la cual no se pudo realizar el estudio de producción. El comportamiento de esta muestra asegura la producción de gas, pero no como se distribuye, de acuerdo con como se explica en la introducción. La muestra tarda 27 días en producir metano, ya que, aunque se da una producción del 1% anteriormente, es pequeña y aislada y pueden deberse al error experimental. La producción media en zona de producción es del 38%. La producción crece rápidamente para

alcanzar un máximo del 49% y a partir de ahí sigue una tendencia constante que oscila entre el 30 y 50%. La curva se empieza a estabilizar a partir del día 42 en torno al 40%.

5.6.4 RELACIÓN ENTRE PRODUCCIÓN Y COMPOSICIÓN:

Finalmente, a partir del Gráfico 27, se analiza la relación entre la producción y los cambios en la composición muestra, tanto de metano como del posible alcohol.

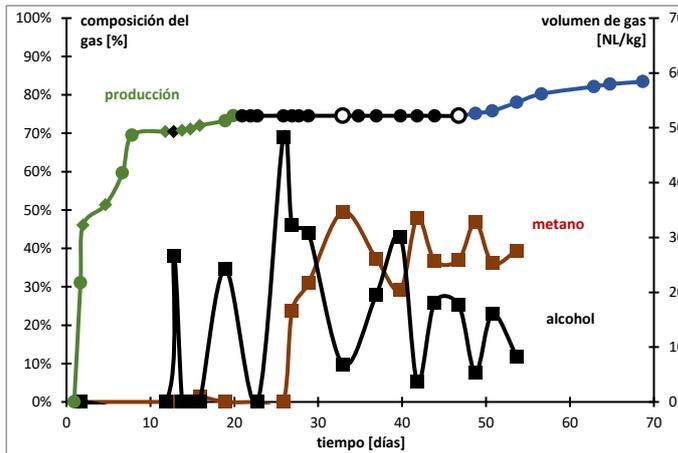


GRÁFICO 27. COMPARATIVA ENTRE COMPOSICIÓN Y PRODUCCIÓN: EXPERIMENTO 5

Hay que resaltar que la producción y la composición son tomadas de réplicas diferentes, pero esta comparación puede servir como una aproximación. La muestra no produce metano en la primera fase de degradación, sólo “alcohol” cuando empieza a estabilizarse. El metano se empieza a observar en una etapa de producción cero debido a que la producción de gas no fue tomada de la misma muestra de la que se analizó su composición. La producción de metano sigue un comportamiento estable mientras que la de alcohol sigue un comportamiento más oscilante. La producción media de

alcohol en todo el experimento es del 22%, con un máximo del 69% y un mínimo del 0%. La producción de alcohol y metano se mantiene más estable al final del experimento, con la segunda reactivación. Se puede atribuir la gran oscilación que surge en la composición de alcohol hasta el día 40 a la fuga detectada ese día. Además, la gran caída que surge en el día 20 se puede deber a la reactivación, ya que el digestor parece almacenar todo el gas y al abrir se puede producir un gran cambio en la composición.

5.7. EXPERIMENTO 6:

5.7.1 ANÁLISIS DE RÉPLICAS:

El Experimento 6 corresponde al digestato de césped con inóculo. Se trata de la misma muestra que el experimento 5, con la fracción sólida del digestato de césped y el FORSU en la misma proporción, el bacilo y los correspondientes estabilizadores de pH, pero a la que se le añade inóculo según se describe en los anteriores experimentos con inóculo. Ninguno de los componentes parecía especialmente deteriorado. La fracción sólida digerida del césped tiene la misma composición que la del experimento 5, el FORSU tiene la misma composición que en los experimentos anteriores y el inóculo tiene la misma composición que la de los experimentos con inóculo anteriores.

El pH obtenido de la muestra en la digestión aerobia es el mismo que el del experimento anterior. Para la digestión anaerobia el pH medido de la muestra corresponde a 7,0 para ambas réplicas. Se ajustó a condiciones entre 7-9 añadiendo lentejas de hidróxido de sodio, alcanzando 7,8 y 7,2 unidades de pH para cada réplica.

Se realizó el experimento anaerobio obteniéndose la siguiente producción de gas para cada una de sus réplicas, como se presenta en el Gráfico 28.

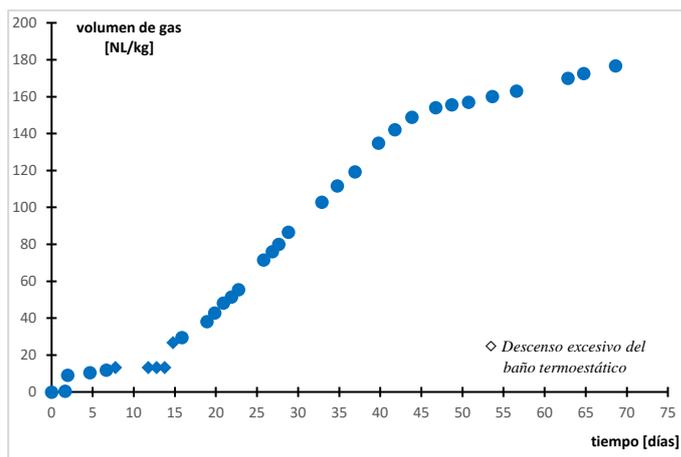


GRÁFICO 28. ANÁLISIS DE CURVAS DE PRODUCCIÓN: MUESTRA 11 Y 12

La **primera réplica M11** con un pH inicial de 7,8, sigue una tendencia estándar al principio y después en forma de un gran escalón, produce 177 NL de gas y sigue dando una producción considerable al finalizar el experimento. La muestra se empezó a estabilizar a partir de la primera semana tras una pequeña producción, pero después de la segunda semana se da una gran producción que duró hasta el final del experimento. La etapa de estabilización se puede relacionar con una posible parada de producción debida al descenso excesivo del nivel de líquido

del baño termostático, ya que esta ocurrió durante esos días, o podría deberse a un periodo de inducción en la muestra. Tras el día 47 se observa que la pendiente de crecimiento en la producción de gas disminuye notablemente, pero sigue siendo todavía alta. Al no llegarse a estabilizar no precisó reactivación.

La **segunda réplica M12** no se tomó en cuenta ya que fue una de las muestras problemáticas, como se detalla en la introducción. Si se interpreta su producción como se concluye en la introducción se observa una degradación muy rápida en la cual se produce todo el gas en apenas 8 días. Durante todos esos días se pudo perder una parte de la producción del gas debido a que continuamente se encontraron los medidores de volumen vaciados. El día 33 se intentó reactivar sin éxito.

Tras el descarte de la réplica M12, se procede a definir la curva de producción del experimento 6 a partir de la réplica M11.

5.7.2 PRODUCCIÓN DE GAS:

A continuación, a partir del Gráfico 29, se analiza la producción de gas del experimento 6 mediante la descripción de la curva de producción de la muestra M11:

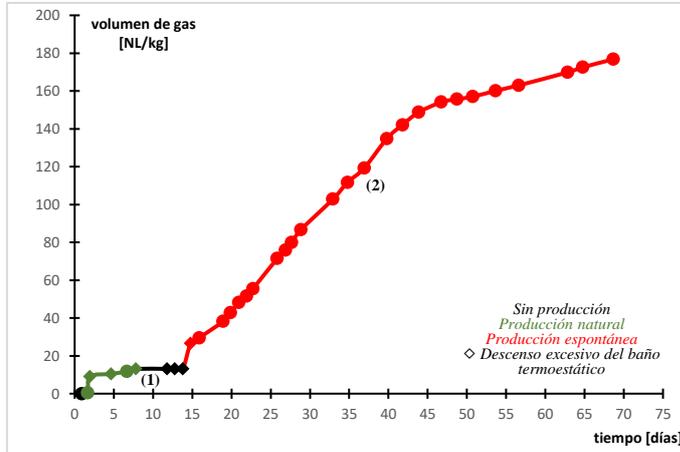


GRÁFICO 29. CURVA DE PRODUCCIÓN: EXPERIMENTO 6

(1) La degradación de la muestra produce una primera etapa de metanización en la que se obtienen 13 NL de gas. La distribución de gas sigue una tendencia estándar, aunque un poco irregular y se estabiliza a los 8 días. La producción inicial es muy pequeña y además se observa la estabilización que presente en el experimento anterior y que puede coincidir con el descenso excesivo del nivel de líquido del baño termostático.

(2) Luego de 6 días después de la estabilización total de la etapa anterior

se da una producción espontánea que ocurre sin ayuda de una reactivación de la que se obtienen 163 NL de gas. La distribución sigue una tendencia de doble rampa que se mantuvo hasta el final del experimento. La velocidad de producción es al inicio en un tramo hasta el día 44 más alta y después en un segundo tramo más baja.

No fue necesario reactivar la muestra, ya que la producción nunca se detuvo. La curva de producción se caracteriza principalmente por un comportamiento en forma de rampas ininterrumpidas con pendiente decreciente que abarcan la mayor parte de la producción, de forma similar al experimento 8, aunque esta última tiene un comportamiento más gradual y continuo.

5.7.3 COMPOSICIÓN DE METANO EN EL GAS:

A continuación, se analiza la calidad del gas producido en el experimento 6 mediante la descripción de la curva de composición en metano de la muestra M11 presentada en el Gráfico 30.

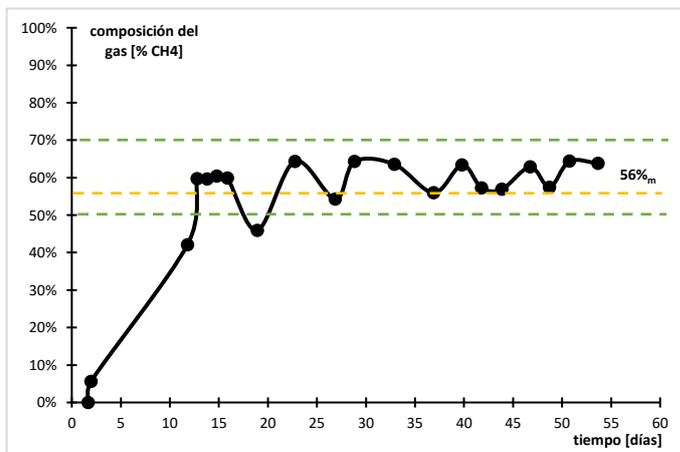


GRÁFICO 30. CURVA DE CALIDAD: EXPERIMENTO 6

La muestra produce metano desde el principio y se da una producción media del 56%, de manera que el gas producido en el experimento se puede considerar “biogás”. La producción crece rápidamente y a partir del día 13 sigue una tendencia constante que oscila entre el 50 y 65% que se va estabilizando poco a poco en torno al 60%. Se alcanza un máximo del 64%.

5.7.4 RELACIÓN ENTRE PRODUCCIÓN Y COMPOSICIÓN:

Finalmente, a partir del Gráfico 31, se analiza la relación entre la producción y los cambios en la composición muestra, tanto de metano como del posible alcohol.

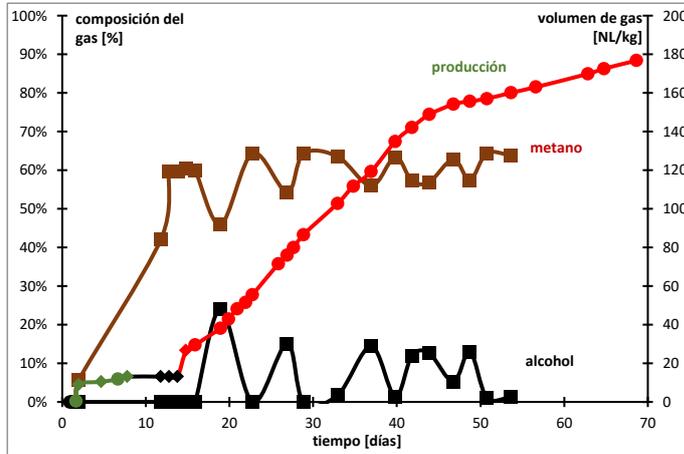


GRÁFICO 31. COMPARATIVA ENTRE COMPOSICIÓN Y PRODUCCIÓN: EXPERIMENTO 6

La muestra produce metano en la primera fase de degradación, mientras que no es hasta la segunda etapa cuando se empieza a producir alcohol. La producción de metano y alcohol se mantienen estable durante todo el experimento, aunque esta última sigue un comportamiento ligeramente decreciente. La producción media de alcohol en todo el experimento es del 5%, con un máximo del 24% y un mínimo del 0%. Se destaca el comportamiento más o menos regular de las dos distribuciones de componentes.

5.8. EXPERIMENTO 7:

5.8.1 ANÁLISIS DE RÉPLICAS:

El Experimento 7 corresponde al digestato de la mezcla de residuos vegetales sin inóculo. El digestato es obtenido a partir de la degradación aerobia de la mezcla vegetal con bacilo. La muestra anaerobia tiene 1 parte de la fracción sólida del digestato y 3 partes de FORSU, además del bacilo y los correspondientes estabilizadores de pH. Ninguno de los componentes parecía especialmente deteriorado. Partimos de la mezcla vegetal que tiene una composición del 27% en sólidos, de los cuales el 85% son volátiles, obteniendo una fracción sólida digerida con un 11% en sólidos, de los cuales el 93% son volátiles. El FORSU, tiene la misma composición que en los experimentos anteriores.

Para la digestión aerobia el pH medido de la muestra corresponde a 8,9 y se ajustó a condiciones próximas a 5 añadiendo ácido sulfúrico, alcanzando 4,9 unidades de pH. Tras finalizar el experimento se alcanzó un pH de 5,2. Para la digestión anaerobia el pH medido de la muestra corresponde a 8,0 y 6,5 para cada réplica, ajustando la última réplica a condiciones entre 7-9 añadiendo lentejas de hidróxido de sodio, para lo que se consigue un pH de 8,8 unidades de pH para cada réplica.

Se realizó el experimento anaerobio obteniéndose la siguiente producción de gas para cada una de sus réplicas, como se presenta en el Gráfico 32.

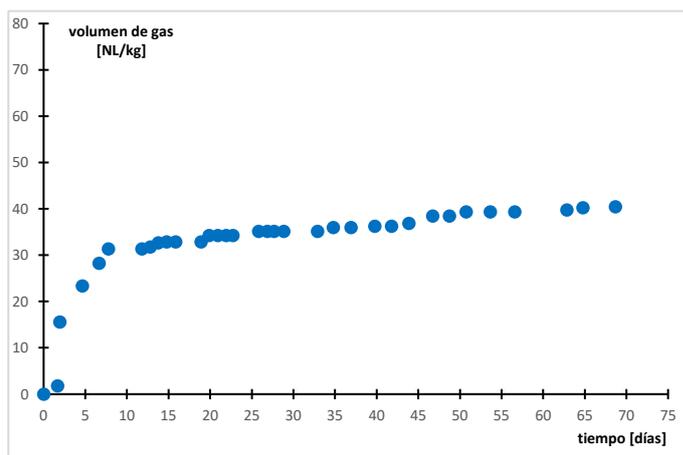


GRÁFICO 32. ANÁLISIS DE CURVAS DE PRODUCCIÓN: MUESTRA 13 Y 14

La **primera réplica M13** con un pH inicial de 8,0, sigue una tendencia estándar con producciones de gas pequeñas que se mantuvieron durante todo el experimento, produce 40 NL de gas y sigue dando una pequeña producción al finalizar el experimento. La muestra se empezó a estabilizar a los 10 días después de una producción notable, pero sigue produciendo a través de pequeños periodos de producción y estabilización hasta que finaliza el experimento. Al no estabilizarse completamente no hizo falta ninguna reactivación.

La **segunda réplica M14** no se tomó en cuenta ya que fue una de las muestras problemáticas, como se detalla en la introducción experimental. De acuerdo con dicha introducción se concluye que se desconoce la distribución de producto, así como su producción total, ya que después del día 8 en el que se vació el medidor de volumen se dejó de rellenar. El día 33 se intentó reactivar y al conectar el sistema seguía produciendo el mismo efecto instantáneo en los medidores de volumen.

Tras el descarte de la réplica M14, se procede a definir la curva de producción del experimento 7 a partir de la réplica M13.

5.8.2 PRODUCCIÓN DE GAS:

A continuación, a partir del Gráfico 33, se analiza la producción de gas del experimento 7 mediante la descripción de la curva de producción de la muestra M13:

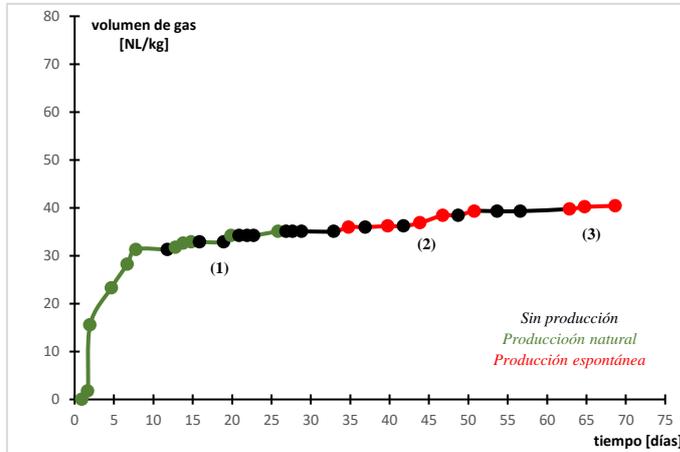


GRÁFICO 33. CURVA DE PRODUCCIÓN: EXPERIMENTO 7

(1) La degradación de la muestra produce una primera etapa de metanización en la que se obtienen 35 NL de gas. La distribución de gas sigue una tendencia estándar con una estabilización irregular y que se estabiliza a los 13 días. La muestra se empieza a estabilizar después del día 8, dándose una producción discontinua con pequeños periodos de producción y estabilización.

(2) Después de 9 días de la última producción de gas se da una producción que ocurre sin ayuda de ninguna

reactivación, es decir de forma espontánea y en la que se obtienen 4 NL de gas. La distribución de gas alterna cada 3-4 días periodos de producción puntuales con un periodo de producción suave hasta que deja de producir. Tras 12 días de inactividad se vuelve a dar una producción que ocurre sin ayuda de ninguna reactivación y en la que se obtiene 1 NL de gas. La distribución de gas es suave y decreciente y se extiende durante 6 días sin llegarse a estabilizar.

La muestra no fue reactivada al no llegarse a estabilizar completamente, pero considerando las bajas producciones desde el día 8 se podría haber medido el pH para determinar si la muestra estaba completamente digerida o necesitaba ser reactivada. Las producciones puntuales podrían surgir debido a la mala agitación, como se explica en anteriores experimentos, y de manera que esto justifique una tendencia más continua en el tramo 1 y 2. Observando la curva se aprecian varios periodos de estabilidad siendo el periodo del final de la etapa 1 y el de la etapa 2 los más largos, lo que sugiere que la curva entra en nuevas etapas de degradación que quizás requieran de una reactivación.

5.8.3 COMPOSICIÓN DE METANO EN EL GAS:

A continuación, se analiza la calidad del gas producido en el experimento 7 mediante la descripción de la curva de composición en metano de la muestra M13 presentada en el Gráfico 34.

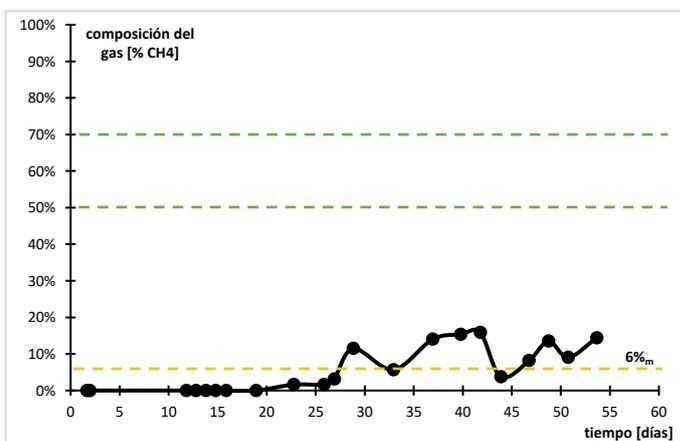


GRÁFICO 34. CURVA DE CALIDAD: EXPERIMENTO 7

La muestra tarda 23 días en producir metano, dándose una producción media del 9% en la zona de producción. La producción crece suavemente y sigue una tendencia constante que oscila entre el 0 y 15%, alcanzando un máximo del 16%.

5.8.4 RELACIÓN ENTRE PRODUCCIÓN Y COMPOSICIÓN:

Finalmente, a partir del Gráfico 35, se analiza la relación entre la producción y los cambios en la composición muestra, tanto de metano como del posible alcohol.

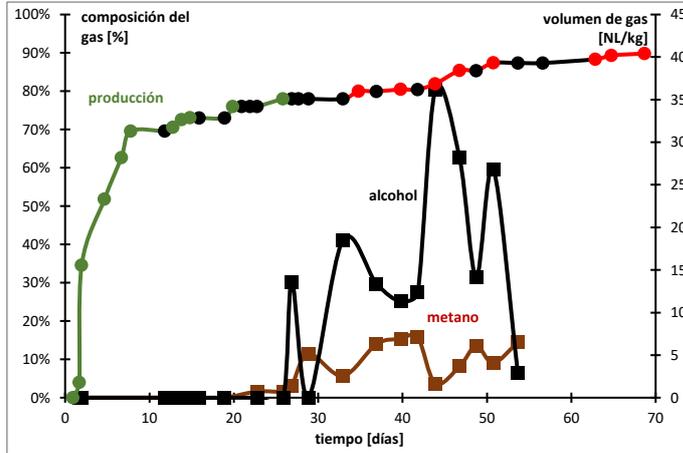


GRÁFICO 35. COMPARATIVA ENTRE COMPOSICIÓN Y PRODUCCIÓN: EXPERIMENTO 7

La muestra no produce metano en la primera fase de degradación, es al final de la etapa de estabilización cuando comienza la producción de metano y alcohol. La producción de metano se mantiene estable mientras que la de alcohol sigue un comportamiento creciente, más oscilante y con una producción mucho mayor. La producción media de alcohol en todo el experimento es del 20%, con un máximo del 80% y un mínimo del 0%.

5.9. EXPERIMENTO 8:

5.9.1 ANÁLISIS DE RÉPLICAS:

El Experimento 8 corresponde al digestato de la mezcla de residuos vegetales con inóculo. El digestato es obtenido a partir de la degradación aerobia de una disolución de la mezcla vegetal con bacilo. Se trata de la misma muestra que el experimento 7, con la fracción sólida del digestato de los residuos vegetales y el FORSU en la misma proporción, el bacilo y los correspondientes estabilizadores de pH, pero a la que se le añade inóculo según se describe en los anteriores experimentos con inóculo. La fracción sólida digerida de los residuos vegetales tiene la misma composición que la del experimento 7, el FORSU tiene la misma composición que en los experimentos anteriores y el inóculo tiene la misma composición que la de los experimentos con inóculo anteriores. Ninguno de los componentes parecía especialmente deteriorado.

El pH obtenido de la muestra en la digestión aerobia es el mismo que el del experimento anterior. Para la digestión anaerobia el pH medido de la muestra corresponde a 7,0 para ambas réplicas. Se ajustó a condiciones entre 7-9 añadiendo lentejas de hidróxido de sodio, alcanzando 7,2 y 7,0 unidades de pH para cada réplica.

Se realizó el experimento anaerobio obteniéndose la siguiente producción de gas para cada una de sus réplicas, como se presenta en el Gráfico 36.

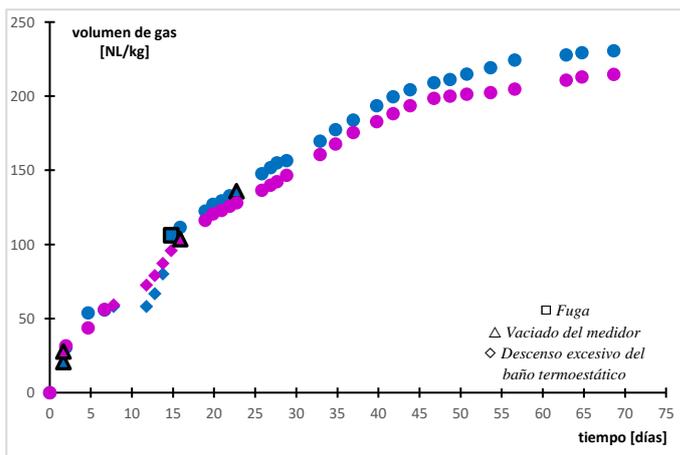


GRÁFICO 36. ANÁLISIS DE CURVAS DE PRODUCCIÓN: MUESTRA 15 Y 16

estabilizar no precisó reactivación.

La primera réplica M15 con un pH inicial de 7,2, sigue una tendencia de forma cóncava, produce 231 NL de gas y sigue dando una producción considerable al finalizar el experimento. La muestra se empezó a estabilizar a partir de la segunda semana tras una producción notable, pero pocos días después se da una gran producción con tendencia decreciente que duró hasta el final del experimento. Se pudo perder parte de la producción debido a que el día 15 se corrigió una fuga y el día 2 y 23 se encontró al mínimo el nivel del medidor de volumen. Al no llegarse a

La segunda réplica M16 con un pH inicial de 7,0, sigue una tendencia de forma cóncava, produce 215 NL de gas y sigue dando una producción considerable al finalizar el experimento. La muestra sin llegar a entrar en una etapa de estabilización produce una gran producción con tendencia decreciente que duró hasta el final del experimento. Se pudo perder parte de la producción debido a que el día 2 y 16 se encontró al mínimo el nivel del medidor de volumen. Al no llegarse a estabilizar no precisó reactivación.

La tendencia de la curva y la producción máxima coincide entre las réplicas y aunque se observe un descenso de producción más brusco en M16 se puede justificar con la fuga reparada en este digestor, por lo que se procede a definir la curva de producción del experimento 8 como la media de sus dos réplicas. En ambas curvas se puede observar durante la segunda semana un pequeño descenso de producción que se puede relacionar con el descenso excesivo del nivel de líquido del baño termostático que ocurrió durante esos días.

5.9.2 PRODUCCIÓN DE GAS:

A continuación, a partir del Gráfico 37, se analiza la producción de gas del experimento 8 mediante la descripción de la curva de producción media obtenida de las muestras M15 y M16:

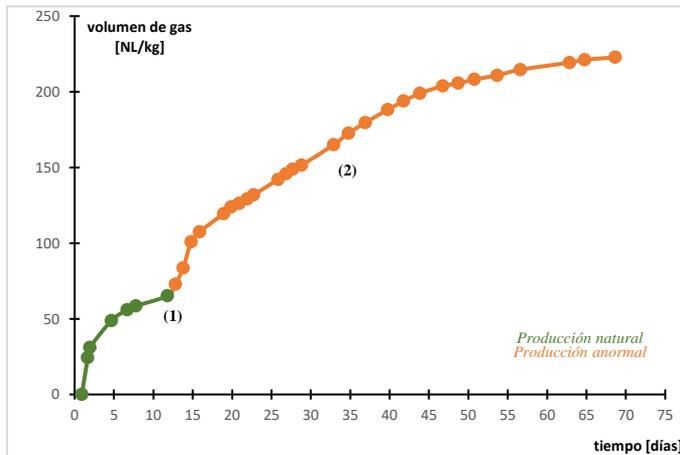


GRÁFICO 37. CURVA DE PRODUCCIÓN: EXPERIMENTO 8

con pendiente decreciente hasta el final del experimento. La primera rampa se mantuvo durante 3 días, la siguiente durante 28, después durante 10 y la final con una pendiente mucho menor que parece empezar a estabilizar la producción.

(1) La degradación de la muestra produce una primera etapa de metanización en la que se obtienen 65 NL de gas. La distribución de gas sigue una tendencia estándar, que se empieza a estabilizar a los 12 días, pero que no se llega a detener.

(2) Justo al comienzo de la estabilización de la anterior etapa se da una producción que ocurre sin ayuda de ninguna reactivación, parecido a como ocurre en el experimento 4 y en la que se obtienen 158 NL de gas. La distribución sigue una tendencia de rampas sucesivas

No fue necesario reactivar la muestra, ya que la producción nunca se detuvo. La curva podría tener un comportamiento prácticamente cóncavo en todo el experimento considerando el descenso excesivo del nivel de líquido del baño termostático, la fuga detectada y el vaciado del nivel del medidor de volumen que afectaron en la primera fase del experimento, sin embargo, el comportamiento de la curva es similar al del experimento 6. El comportamiento de la curva es significativamente entre sus dos etapas, a pesar de que se podrían considerar prácticamente cóncavas y decrecientes, ya que la producción de la segunda es mucho mayor, al igual que su extensión y el periodo de estabilización.

5.9.3 COMPOSICIÓN DE METANO EN EL GAS:

A continuación, se analiza la calidad del gas producido en el experimento 8 mediante la descripción de la curva de composición en metano de la muestra M15 presentada en el Gráfico 38.

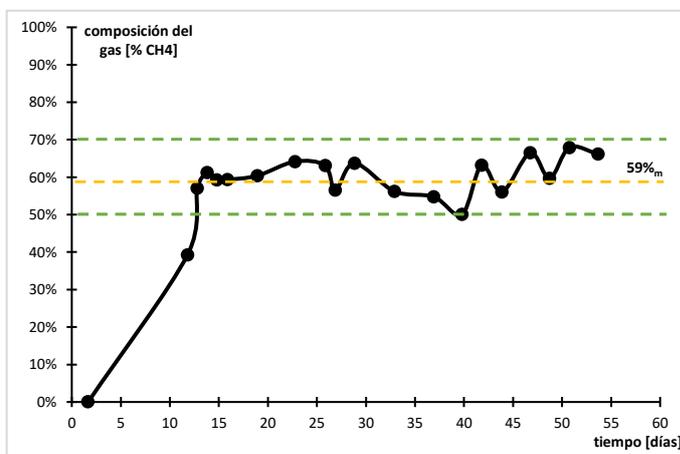


GRÁFICO 38. CURVA DE CALIDAD: EXPERIMENTO 8

La muestra produce metano desde el principio y se da una producción media del 59%, de manera que el gas producido en el experimento se puede considerar “biogás”. La producción crece rápidamente y a partir del día 13 sigue una tendencia constante que oscila entre el 50 y 70%, alcanzando un máximo del 68%.

5.9.4 RELACIÓN ENTRE PRODUCCIÓN Y COMPOSICIÓN:

Finalmente, a partir del Gráfico 39, se analiza la relación entre la producción y los cambios en la composición muestra, tanto de metano como del posible alcohol.

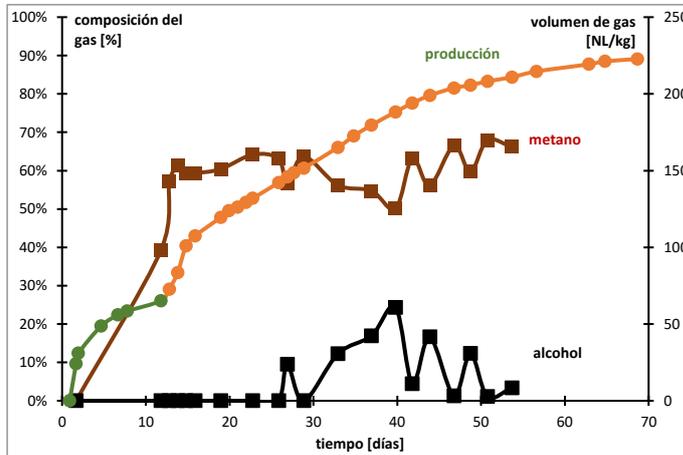


GRÁFICO 39. COMPARATIVA ENTRE COMPOSICIÓN Y PRODUCCIÓN: EXPERIMENTO 8

La muestra produce metano en la primera fase de degradación, mientras que no es hasta la segunda etapa cuando se empieza a producir alcohol. La producción de metano y alcohol se mantienen estable durante todo el experimento, aunque a la mitad de la segunda etapa se produce un aumento considerable de alcohol que después se va estabilizando poco a poco. La producción media de alcohol en todo el experimento es del 5%, con un máximo del 24% y un mínimo del 0%. Se destaca el comportamiento más o menos regular de las dos distribuciones de componentes.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. INTRODUCCIÓN:

En este capítulo se pretende valorar cualitativa y cuantitativamente la influencia del tipo de residuo, así como los tratamientos de inoculación e hidrólisis enzimática en el proceso de metanización.

En primer lugar, se hará un análisis general de las diferentes curvas obtenidas en los experimentos anteriores: producción, concentración de metano y concentración de alcohol, comparando todos los experimentos entre sí y analizando la influencia del residuo, del inóculo y de la hidrólisis sobre la forma de cada curva.

Posteriormente se compararán los resultados obtenidos de producción total, concentración media³³, dispersión media³⁴ y retardo en la producción de los gases producidos en función del tipo de residuo y los tratamientos utilizados. Cada aspecto será evaluado por separado, calculando la efectividad³⁵ caso por caso para determinar que será mejor en cada situación y posteriormente, calculando la efectividad global³⁶ para determinar que será mejor de manera general: primero se evaluará la influencia del tipo de residuo en el proceso, después la eficacia del inóculo como agente activante y finalmente la eficacia del pretratamiento de hidrólisis enzimática.

6.2. ANÁLISIS GENERAL DE LAS CURVAS DE PRODUCCIÓN:

En una digestión anaerobia la curva de producción de gas se caracteriza por la presencia de una o más etapas de producción, los periodos de estabilización y la posible presencia de retardos. Las diferentes etapas de producción ocurren tras la estabilización total de la producción en la etapa anterior, aunque pueden ocurrir simultáneamente sin que la anterior etapa se haya estabilizado completamente o tras una reactivación. Los retardos pueden darse al inicio de la digestión, entre diferentes etapas de producción o tras una reactivación. A continuación, en el Gráfico 40 se muestran las curvas de producción obtenidas de todos los experimentos anteriores:

³³ **Concentración media:** se tomará en la zona de producción, o sea cuando empieza la producción de metano o alcohol

³⁴ **Dispersión media:** será cuantificada como la desviación promedio de los datos de concentración obtenidos en cada curva de composición. Se tomará en la zona de producción, o sea cuando empieza la producción de metano o alcohol

³⁵ **Efectividad η :** definida como la variación relativa entre los valores comparados

³⁶ **Efectividad global:** definida como la variación relativa entre las medias de los valores comparados

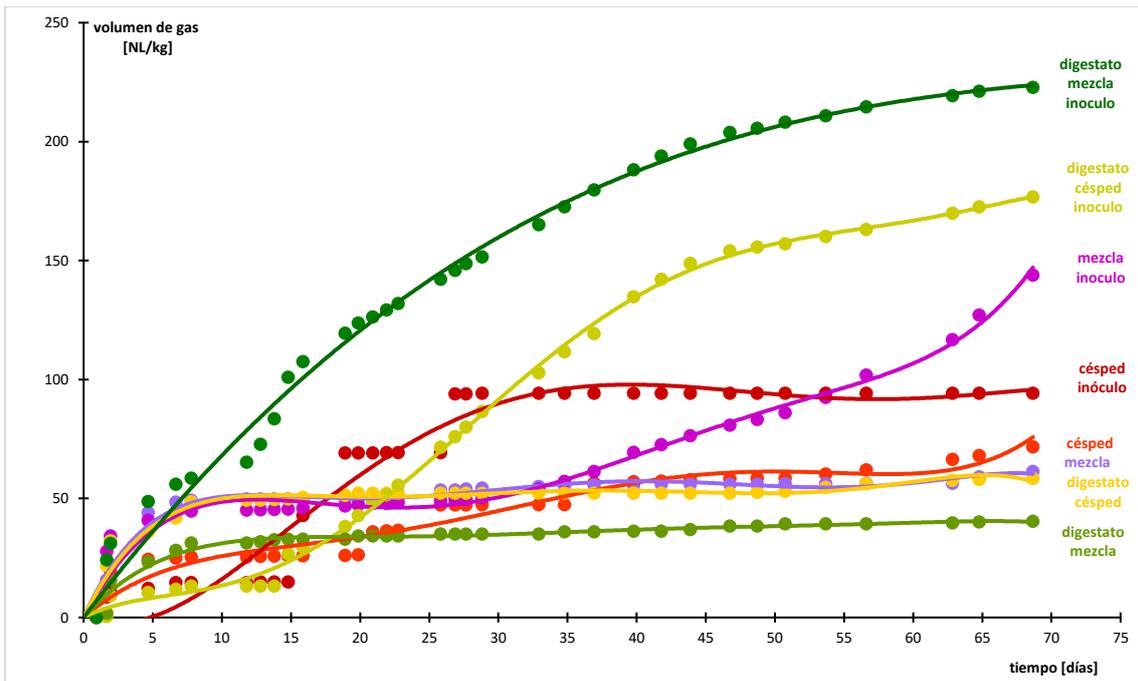


GRÁFICO 40. RELACIÓN DE CURVAS DE PRODUCCIÓN

Entre las diferentes curvas de producción obtenidas en los experimentos se distinguen 4 comportamientos: típica, escalonada, decreciente y creciente. En el Gráfico 41 se muestran las producciones que siguen un comportamiento más común en la digestión anaerobia. La tendencia típica se caracteriza por una producción pronunciada que se suaviza de forma rápida hasta que se detiene, mientras que la tendencia escalonada se caracteriza por una producción a partir de varios picos de tamaño considerable que se suavizan rápidamente hasta que se detienen y que se producen de manera secuencial.

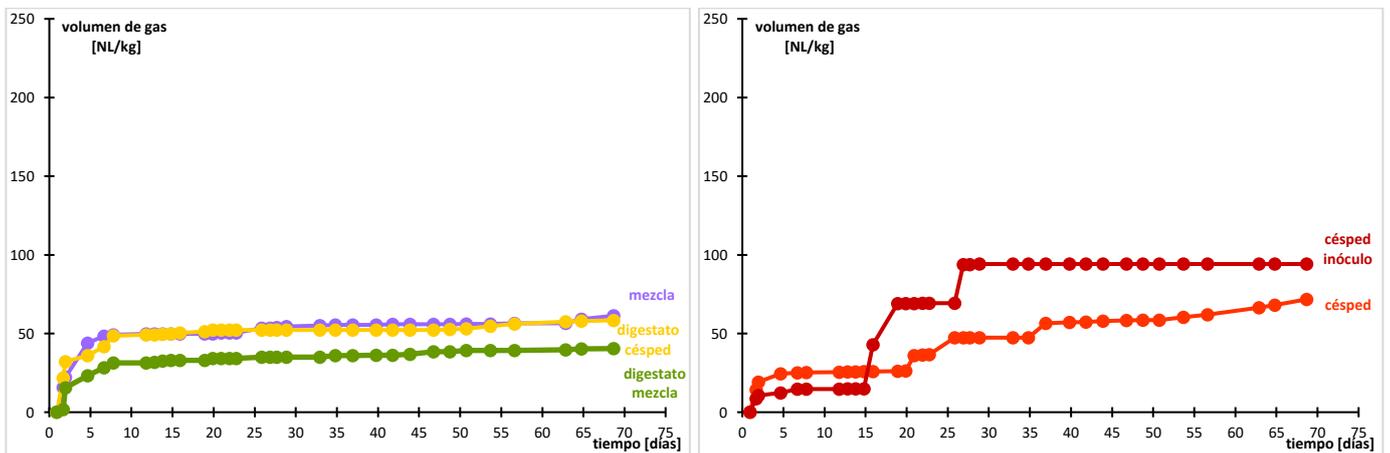


GRÁFICO 41. RELACIÓN DE CURVAS DE PRODUCCIÓN MÁS COMUNES (TENDENCIA NORMAL VS TENDENCIA ESCALONADA)

En el Gráfico 42 se muestran las producciones que siguen un comportamiento menos frecuente en la digestión anaerobia. La tendencia decreciente se caracteriza por una producción continua y pronunciada que se suaviza de forma lenta y que se prolonga durante mucho tiempo, mientras que la tendencia creciente se caracteriza por una producción pequeña que va aumentando gradualmente y que se prolonga durante mucho tiempo.

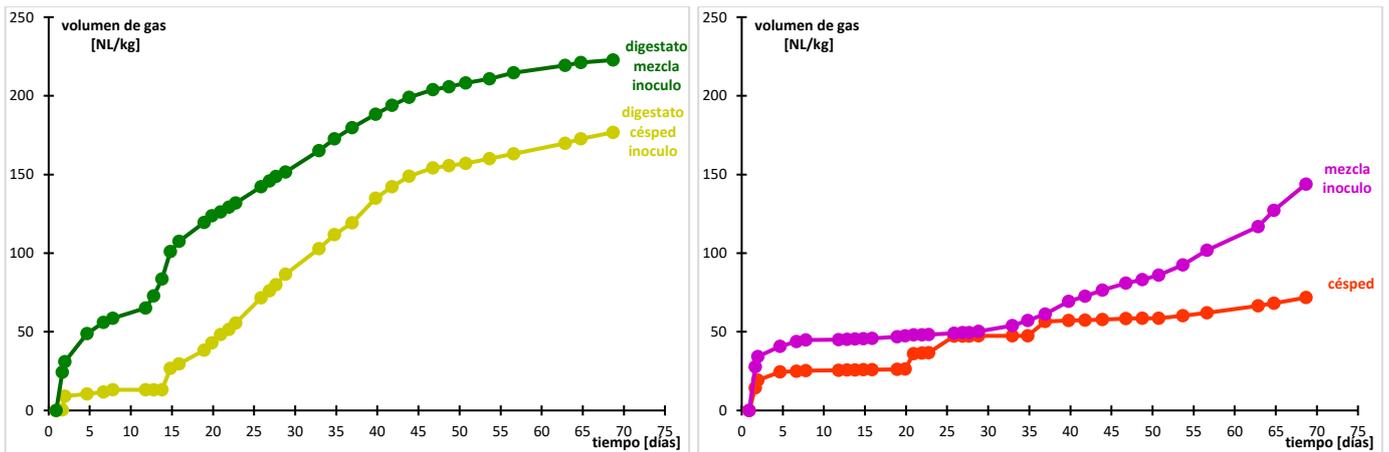


GRÁFICO 42. RELACIÓN DE CURVAS DE PRODUCCIÓN MENOS FRECUENTES (TENDENCIA DECRECIENTE VS CRECIENTE)

Se puede observar que las muestras pre-digeridas dan producciones típicas, que las muestras inoculadas dan producciones dispersas que muestran el efecto acelerante del inóculo y que las muestras sometidas a ambos tratamientos dan producciones con una forma característica.

6.3. ANÁLISIS GENERAL DE LAS CURVAS DE METANO:

A continuación, en el Gráfico 43 se muestran los datos de concentración de metano obtenidos de todos los experimentos anteriores y observando la nube de puntos se observa un amplio rango de valores de concentración, aunque la mayor parte de los datos se concentran entre un 30 y 75%, además se observa una dispersión no muy amplia dentro de cada muestra a excepción de unos pocos valores:

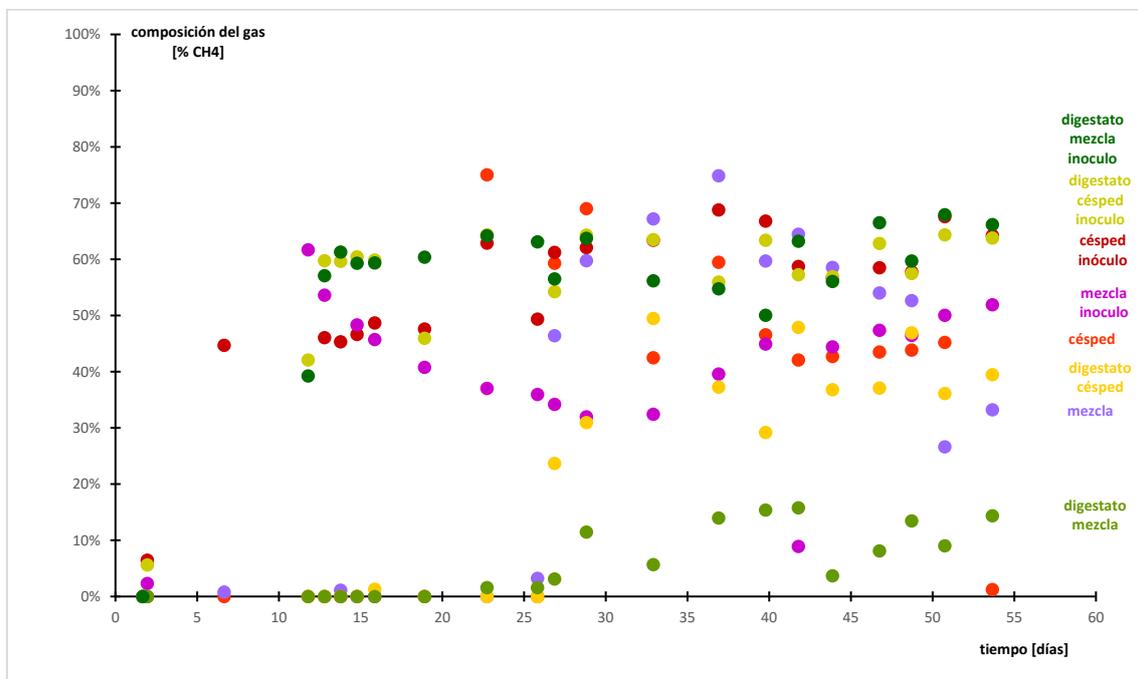


GRÁFICO 43. NUBE DE PUNTOS DE CONCENTRACIÓN EN METANO

Entre las diferentes curvas de composición obtenidas en los experimentos se distinguen 4 comportamientos: ascendente, descendente, constante y curvo. En el Gráfico 44 se muestran las curvas que siguen un comportamiento ascendente frente a las que siguen un comportamiento descendente:

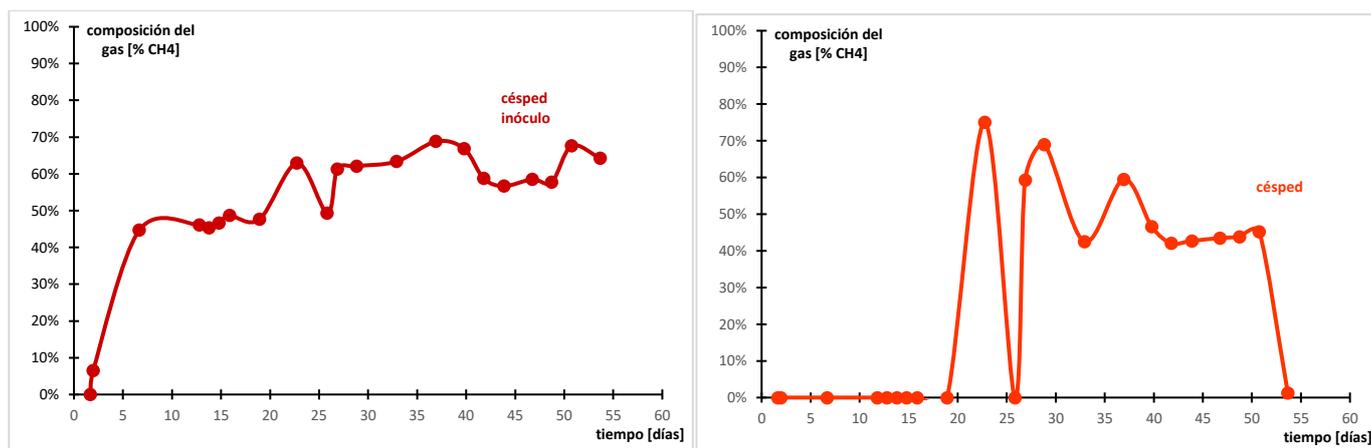


GRÁFICO 44. RELACIÓN DE CURVAS DE CONCENTRACIÓN DE METANO CON TENDENCIA CRECIENTE VS DECRECIENTE

En el Gráfico 45 se muestran las curvas que siguen un comportamiento constante frente a las que siguen un comportamiento curvo:

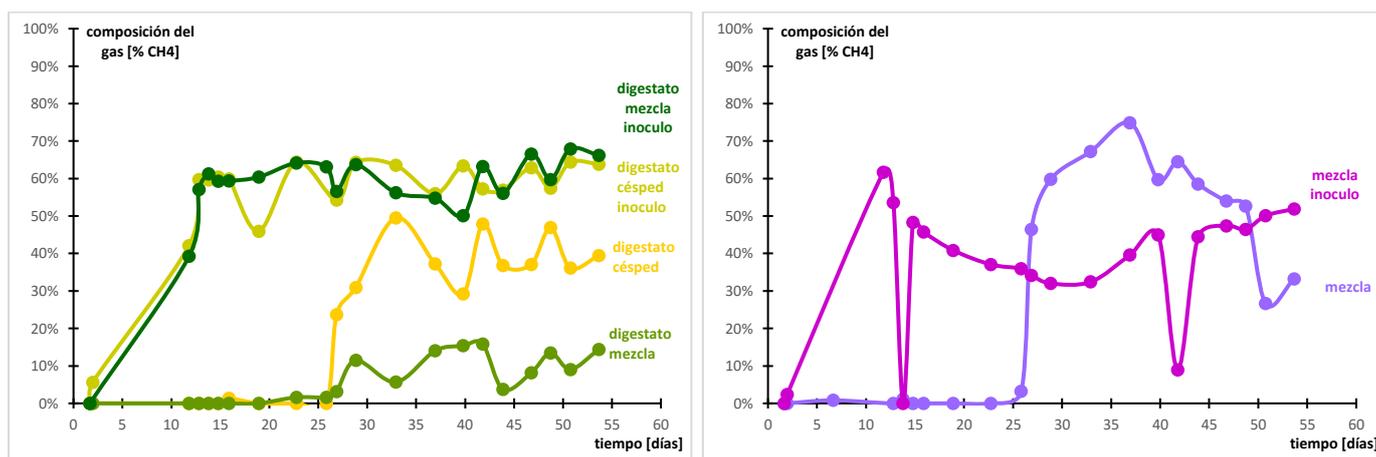


GRÁFICO 45. RELACIÓN DE CURVAS DE CONCENTRACIÓN DE METANO CON TENDENCIA CONSTANTE VS CURVA

Las distribuciones de la concentración de metano tienen formas más o menos continuas y si se justifican con picos como se explica en los experimentos se puede apreciar un comportamiento muy regular. Se puede observar que las muestras pre-digeridas producen un comportamiento característico regular y constante, aunque con producciones más bajas si no son inoculadas, mientras que la inoculación de las muestras naturales produce un comportamiento contrario. Para el césped la tendencia es descendiente mientras que si se inocula es ascendente y para la mezcla es convexo mientras que si se inocula es cóncavo. En todos los casos el inóculo mejora la composición final a la que tienden los experimentos.

6.4. ANÁLISIS GENERAL DE LAS CURVAS DE ALCOHOL:

A continuación, en el Gráfico 46 se muestran los datos de concentración de alcohol obtenidos de todos los experimentos anteriores y observando la nube de puntos se observa un amplio rango de valores de concentración, aunque se observa la mayor concentración de valores por debajo del 30%, además se observa una dispersión bastante mayor dentro de cada muestra que la obtenida para el metano y una mayor presencia de unos valores anómalos: unos picos y otros caídos:

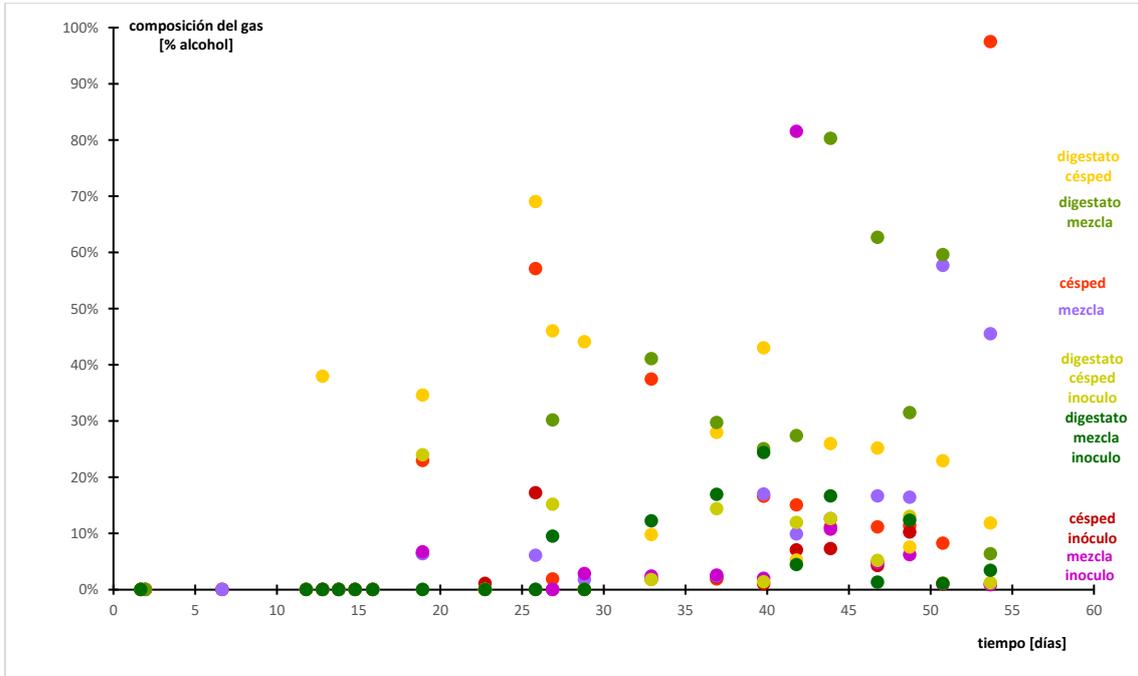


GRÁFICO 46. NUBE DE PUNTOS DE CONCENTRACIÓN EN ALCOHOL

Entre las diferentes curvas de composición obtenidas en los experimentos se distinguen 4 comportamientos: ascendente, descendente, constante y curvo. En el Gráfico 47 se muestran las curvas que siguen un comportamiento ascendente frente a las que siguen un comportamiento descendente:

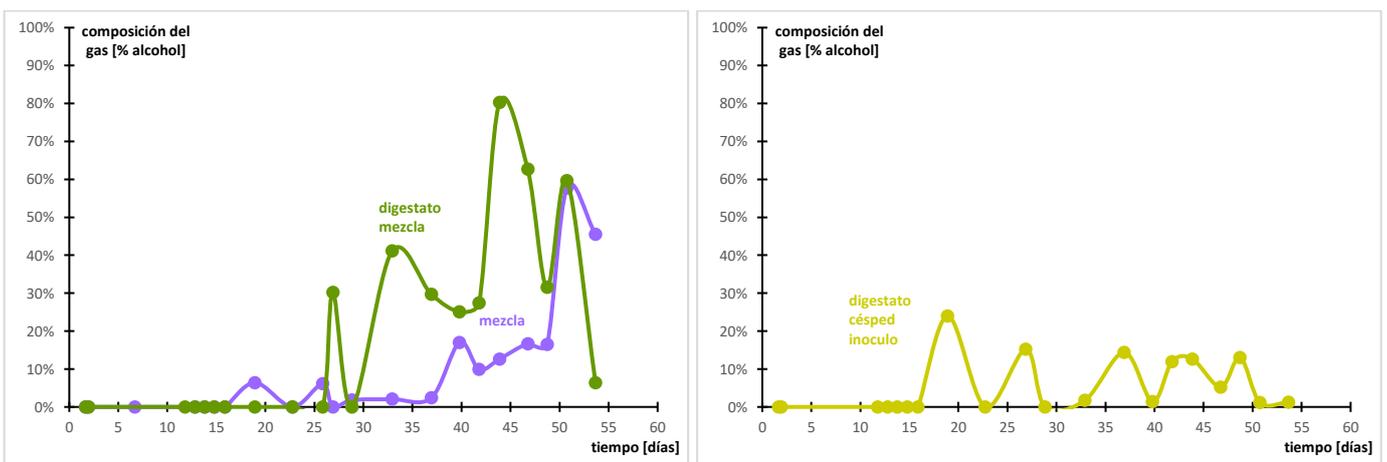


GRÁFICO 47. RELACIÓN DE CURVAS DE CONCENTRACIÓN DE ALCOHOL CON TENDENCIA CRECIENTE VS DECRECIENTE

En el Gráfico 48 se muestran las curvas que siguen un comportamiento constante frente a las que siguen un comportamiento curvo:

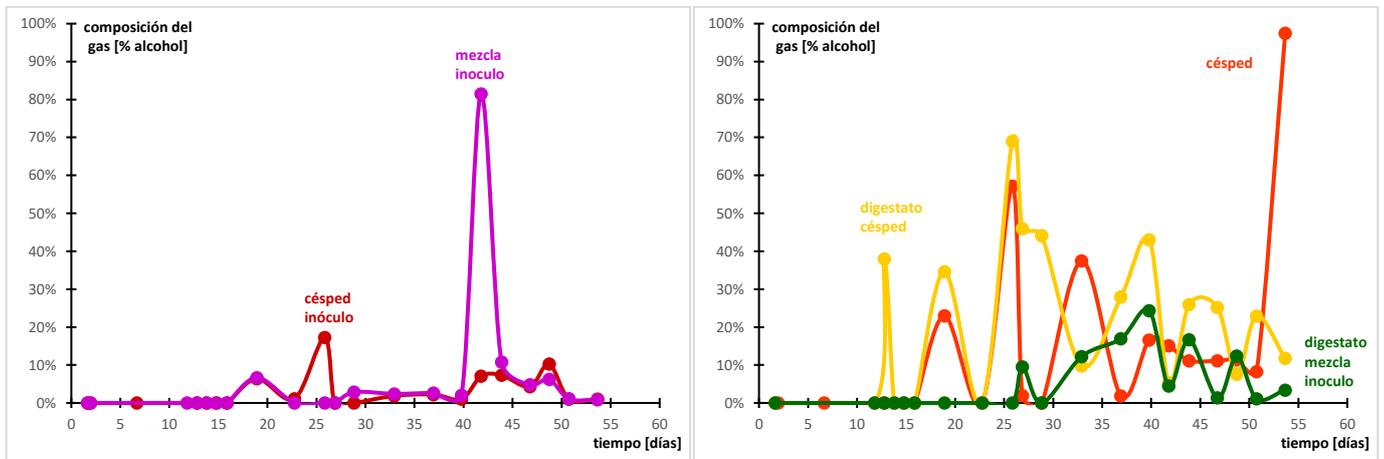


GRÁFICO 48. RELACIÓN DE CURVAS DE CONCENTRACIÓN DE ALCOHOL CON TENDENCIA CONSTANTE VS CURVA

Las distribuciones de la concentración de alcohol tienen formas mucho menos regular que las de metano con oscilaciones mucho más marcadas. Por la mayor cantidad de puntos anómalos hace más difícil que todos se puedan justificar. La producción de alcohol es mucho menos predecible que la de metano aun así utilizando alguno de los tratamientos, pues la aplicación de estos tiene efectos diferentes. Se puede observar que la inoculación da una producción menor y un comportamiento mucho más regular en todos los casos, aunque si se usa sola los efectos son mayores. También se observa que si se utiliza solo el pretratamiento aeróbico la distribución sigue la misma tendencia, pero con una producción un poco mayor.

6.5. INFLUENCIA DEL TIPO RESIDUO:

En este apartado se analizará que mezcla de residuo tiene un mejor comportamiento para la obtención de biogás, comparando un residuo frente al otro para todos los casos: sin tratar, inoculado, pretratado o sometido a ambos tratamientos.

Inicialmente se presentan en el Gráfico 49 las curvas de producción, metano y alcohol ordenadas en función del tipo de residuo, como se indica anteriormente, y a partir de las cuales se puede apreciar la influencia de un residuo frente al otro:

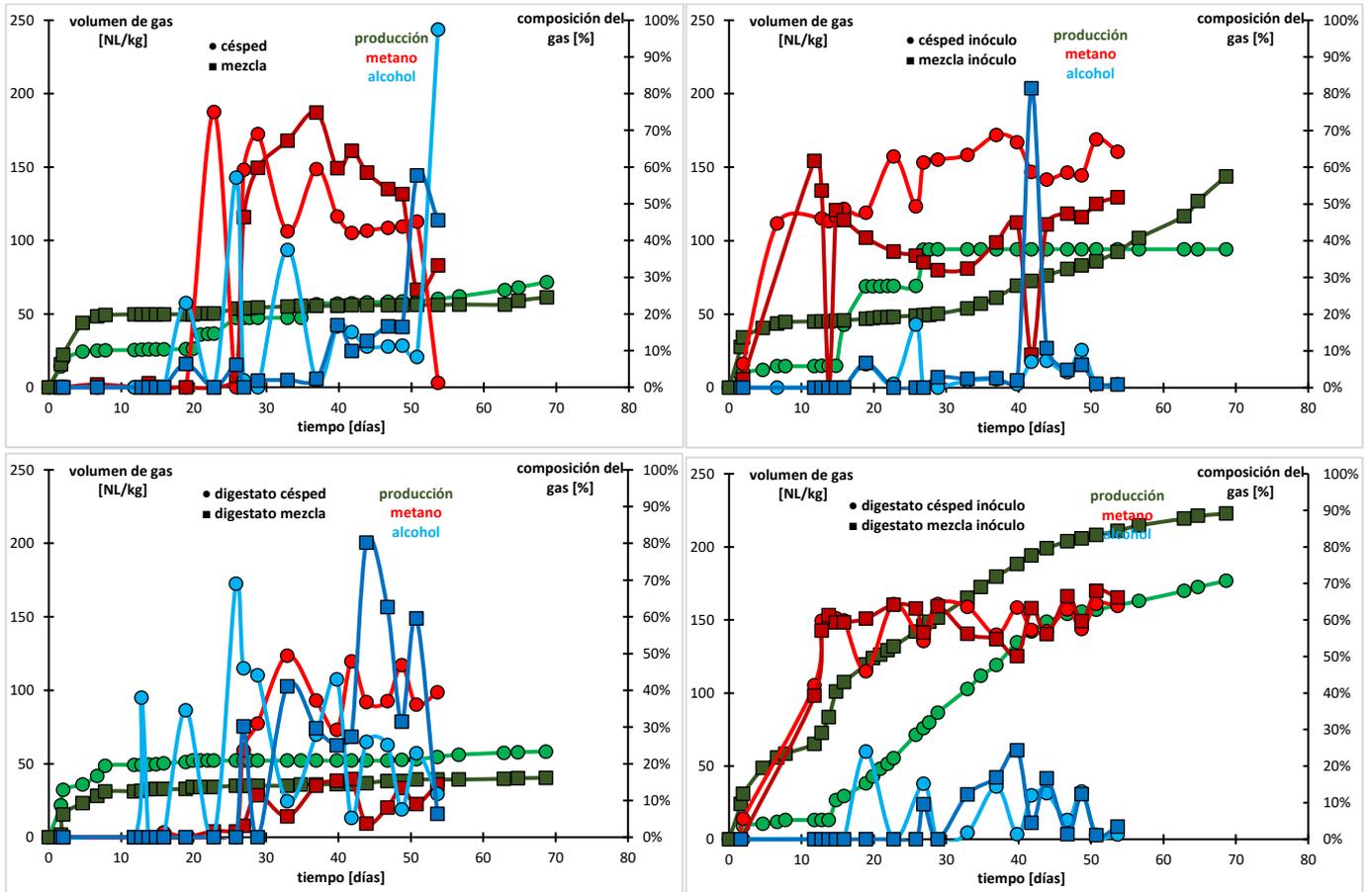


GRÁFICO 49. RELACIÓN DE CURVAS OBTENIDAS CLASIFICADAS SEGÚN EL TIPO DE RESIDUO (DE IZQUIERDA A DERECHA: EXP1-3, EXP2-4, EXP5-7, EXP6-8)

En la Tabla 17 se compara la producción la producción de gas alcanzada en cada experimento en función del tipo de residuo y se calcula la efectividad individual y global de un residuo frente al otro:

	Producción alcanzada (NL/kg)		
	Césped	Mezcla	η
Natural:	72	61	-15%
Inoculada:	94	144	53%
Pretratada:	58	40	-31%
Pretratada e inoculada:	176	223	27%
Total:	100	117	17%

TABLA 17. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE RESIDUO EN LA PRODUCCIÓN DE GAS

Los resultados son dispares, aunque la mezcla da una producción media relativa un 17% mayor que la del césped. Cuando se usa inóculo la mezcla funciona mejor que el césped, mientras que cuando el residuo se usa fresco o solo pretratado funciona mejor el césped.

En la Tabla 18 se compara la concentración, dispersión y retardo en la producción de metano de cada experimento en función del tipo de residuo y se calcula la efectividad individual y global de un residuo frente al otro:

	Retardo en la producción (días)			Promedio de metano			Dispersión de producción		
	Césped	Mezcla	η	Césped	Mezcla	η	Césped	Mezcla	η
Natural:	22	25	-14%	44%	50%	14%	14%	15%	-7%
Inoculada:	1	1	0%	54%	38%	-30%	10%	12%	-20%
Pretratada:	26	22	15%	38%	9%	-76%	6%	5%	17%
Pretratada e inoculada:	1	11	-1000%	56%	59%	6%	8%	5%	38%
Total:	13	15	-18%	48%	39%	-19%	10%	9%	3%

TABLA 18. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE RESIDUO EN LA PRODUCCIÓN DE METANO

Los resultados indican que la mezcla produce una mayor concentración de metano que el césped cuando el residuo es sometido a un solo tratamiento, mientras que ocurre al revés cuando el residuo está en estado natural o es sometido a los dos tratamientos, destacando que la mayor diferencia entre ambos residuos se produce cuando el residuo es únicamente pretratado, observando una reducción relativa en la concentración de metano del 76% para la mezcla. Por otro lado, ambos residuos tardan tiempos similares en producir metano excepto cuando el residuo es sometido a los dos tratamientos, observando que el césped solo tarda un día en producir metano mientras que la mezcla 11 días. Finalmente se observa que ambos residuos producen dispersiones parecidas cuando se someten a mismas condiciones, siendo mejor el césped cuando el residuo está en estado natural o inoculado y siendo mejor la mezcla siempre que el residuo es sometido al pretratamiento aeróbico.

En la Tabla 19 se compara la concentración, dispersión y retardo en la producción de alcohol de cada experimento en función del tipo de residuo y se calcula la efectividad individual y global de un residuo frente al otro:

	Retardo de producción (días)			Concentración media de metano			Dispersión media de producción		
	Césped	Mezcla	η	Césped	Mezcla	η	Césped	Mezcla	η
Natural:	18	18	0%	21%	14%	-33%	19%	12%	37%
Inoculada:	18	18	0%	5%	9%	80%	4%	11%	-175%
Pretratada:	12	26	-117%	23%	36%	57%	16%	18%	-13%
Pretratada e inoculada:	18	26	-44%	8%	9%	13%	7%	7%	0%
Total:	17	22	-33%	14%	17%	19%	12%	12%	-4%

TABLA 19. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE RESIDUO EN LA PRODUCCIÓN DE ALCOHOL

Los resultados indican que la mezcla generalmente produce una mayor concentración de alcohol que el césped mientras que tiene un efecto generalmente negativo en el retardo y la dispersión cuando se compara con el césped. Se aprecia un porcentaje de metano del mismo orden de magnitud entre los dos residuos y se destaca que el único caso en el que la mezcla produce una menor concentración de alcohol que el césped es cuando el residuo se utiliza sin ningún tipo de tratamiento. El retardo empeora al utilizar la mezcla excepto cuando el residuo es sometido al pretratamiento aeróbico, en el que se mantiene igual. La dispersión es más variable y se destaca la mejora de la dispersión de la mezcla con respecto al césped cuando el residuo se utiliza sin ningún tratamiento, mientras que por el contrario empeora mucho cuando el residuo es inoculado.

6.6. EFECTIVIDAD DEL INÓCULO:

En este apartado se analizará si el inóculo funciona como agente activante, comparando cada muestra pura frente a la inoculada: para el césped fresco, el césped digerido, la mezcla fresca y la mezcla digerida.

Inicialmente se presentan en el Gráfico 50 las curvas de producción, metano y alcohol ordenadas según la presencia del inóculo, como se indica anteriormente, y a partir de las cuales se puede apreciar la influencia de la inoculación:

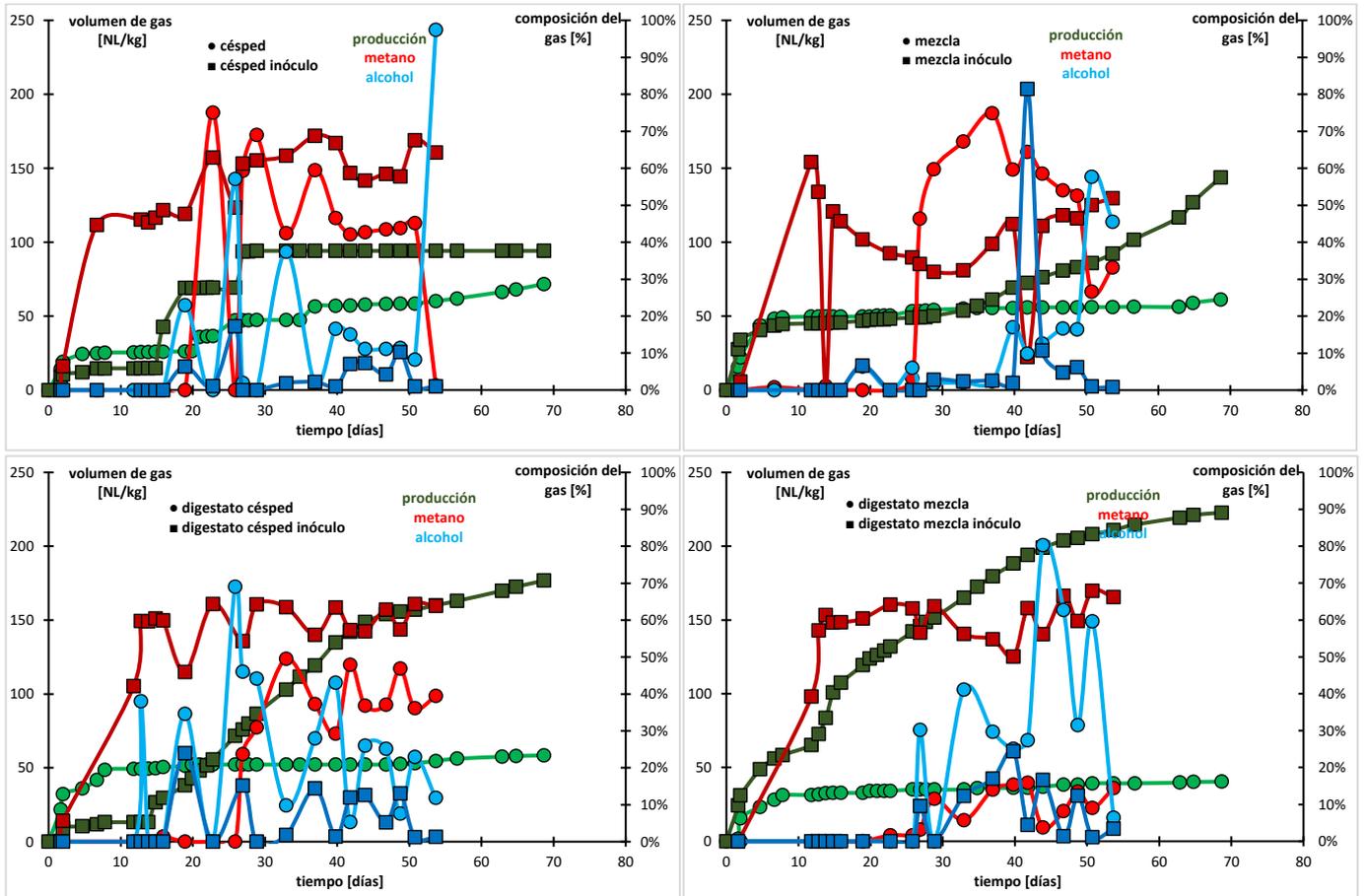


GRÁFICO 50. RELACIÓN DE CURVAS OBTENIDAS CLASIFICADAS SEGÚN LA PRESENCIA DEL INÓCULO (DE IZQUIERDA A DERECHA: EXP1-2, EXP3-4, EXP5-6, EXP7-8)

En la Tabla 20 se compara la producción de gas alcanzada en cada experimento según la presencia del inóculo y se calcula la efectividad individual y global de la inoculación:

	Producción alcanzada (NL/kg)		
	Sin inóculo	Inoculado	η
Césped:	72	94	31%
Mezcla:	61	144	136%
Césped digerido:	58	176	203%
Mezcla digerida:	40	223	458%
Total:	58	159	176%

TABLA 20. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL INÓCULO EN LA PRODUCCIÓN DE GAS

Los resultados indican que la producción aumenta con el uso de inóculo en todas las muestras, obteniéndose una efectividad global del 176%. Los mayores aumentos de producción se consiguen en los digestatos, alcanzando un incremento relativo del 458% en la mezcla digerida.

En Tabla 21 se compara la concentración, dispersión y retardo en la producción de metano de cada experimento según la presencia del inóculo y se calcula la efectividad individual y global de la inoculación:

	Retardo de producción (días)			Concentración media de metano			Dispersión media de producción		
	Sin inóculo	Inoculado	η	Sin inóculo	Inoculado	η	Sin inóculo	Inoculado	η
Césped:	22	1	95%	44%	54%	23%	14%	10%	29%
Mezcla:	25	1	96%	50%	38%	-24%	15%	12%	20%
Césped digerido:	26	1	96%	38%	56%	48%	6%	8%	-33%
Mezcla digerida:	22	11	50%	9%	59%	558%	5%	5%	0%
Total:	24	4	85%	35%	52%	47%	10%	9%	13%

TABLA 21. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL INÓCULO EN LA PRODUCCIÓN DE METANO

Los resultados indican que el uso de inóculo mejora generalmente la producción de metano, aumentando la concentración obtenida, reduciendo el tiempo necesario para su generación y su dispersión. La inoculación produce una generación directa de metano, menos en el caso de la mezcla digerida que, aunque mejora su retardo, requiere de 11 días para empezar a producir. La concentración de metano mejora con el uso del inóculo en todos los casos, menos en el caso de la mezcla y se destaca el gran aumento producido en el césped digerido, que es el único experimento en el que apenas se produce metano, generando un aumento relativo del 558%. La dispersión no mejora con el uso del inóculo en el caso de las muestras digeridas, dándose un aumento relativo de la dispersión en el caso del césped digerido del 33% y no produciendo efecto sobre la dispersión en la mezcla digerida.

En la Tabla 22 se compara la concentración, dispersión y retardo en la producción de alcohol de cada experimento según la presencia del inóculo y se calcula la efectividad individual y global de la inoculación:

	Retardo de producción (días)			Concentración media de metano			Dispersión media de producción		
	Sin inóculo	Inoculado	η	Sin inóculo	Inoculado	η	Sin inóculo	Inoculado	η
Césped:	18	18	0%	21%	5%	-76%	19%	4%	79%
Mezcla:	18	18	0%	14%	9%	-36%	12%	11%	8%
Césped digerido:	12	18	-50%	23%	8%	-65%	16%	7%	56%
Mezcla digerida:	26	26	0%	36%	9%	-75%	18%	7%	61%
Total:	19	20	-8%	24%	8%	-67%	16%	7%	55%

TABLA 22. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL INÓCULO EN LA PRODUCCIÓN DE ALCOHOL

Los resultados indican que el uso de inóculo inhibe generalmente la producción de alcohol reduciendo notablemente la concentración obtenida y aumentando o manteniendo el retardo en su aparición, mientras que mejora su dispersión. La inoculación mantiene el retardo en la producción de alcohol en todos los casos menos en el césped digerido, que produce un aumento relativo del 50% en el tiempo necesario para que se empiece a producir. La concentración de alcohol disminuye con el uso del inóculo en todos los casos hasta alcanzar valores menores del 10%, incluso en el césped digerido en el que se daba un 36% de concentración. El uso de inóculo produce disminuciones relativas de la dispersión en torno al 50-80% menos en el caso de la mezcla en la que solo es del 8%.

6.7. EFECTIVIDAD DE LA HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA:

En este apartado se analizará si el pretratamiento aeróbico funciona como potenciador de la etapa hidrolítica del proceso, comparando cada muestra fresca frente a la digerida: para el césped, el césped inoculado, la mezcla y la mezcla inoculada.

Inicialmente se presentan en el Gráfico 51 las curvas de producción, metano y alcohol ordenadas según aplicación del pretratamiento aeróbico, como se indica anteriormente, y a partir de las cuales se puede apreciar la influencia su hidrolítica:

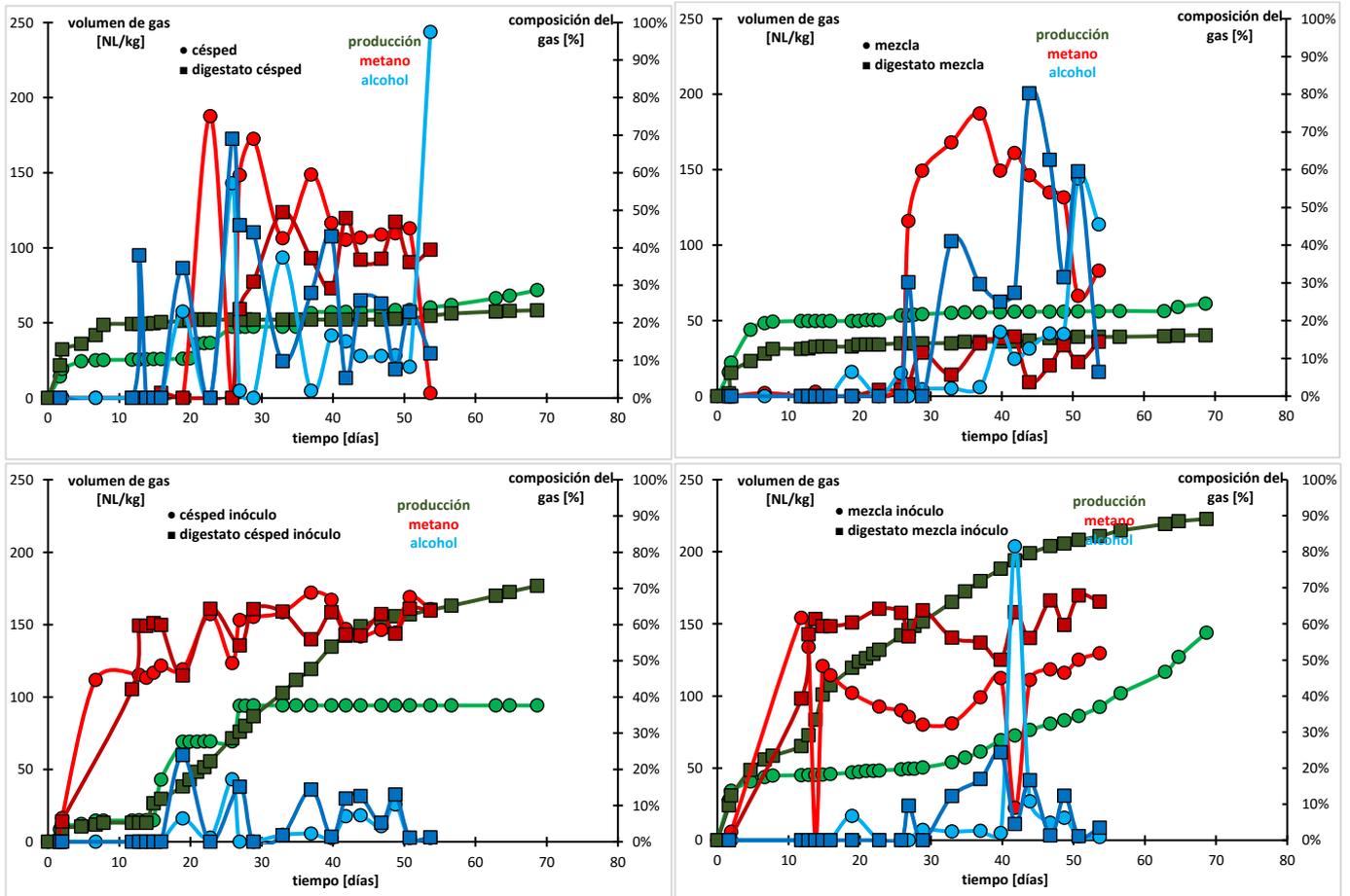


GRÁFICO 51. RELACIÓN DE CURVAS OBTENIDAS CLASIFICADAS SEGÚN LA APLICACIÓN DEL PRETRATAMIENTO (DE IZQUIERDA A DERECHA: EXP1-5, EXP3-7, EXP2-6, EXP4-8)

En la Tabla 23 se compara la producción de gas alcanzada en cada experimento según aplicación del pretratamiento aeróbico y se calcula la efectividad individual y global de la hidrólisis enzimática:

	Producción alcanzada (NL/kg)		
	Natural	Pretratado	η
Césped:	72	58	-19%
Mezcla:	61	40	-34%
Césped inoculado:	94	176	87%
Mezcla inoculada:	144	223	55%
Total:	93	124	34%

TABLA 23. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL PRETRATAMIENTO AEROBIO EN LA PRODUCCIÓN DE GAS

Aunque la efectividad global del pretratamiento sea del 34%, en unos casos aumenta la producción notablemente mientras que en otros la disminuye ligeramente. Cuando la muestra digerida es inoculada la producción aumenta mientras que cuando no lo es la producción disminuye.

En la Tabla 24 se compara la concentración, dispersión y retardo en la producción de metano de cada experimento según aplicación del pretratamiento aeróbico y se calcula la efectividad individual y global de la hidrólisis enzimática:

	Retardo de producción (días)			Concentración media de metano			Dispersión media de producción		
	Natural	Pretratado	η	Natural	Pretratado	η	Natural	Pretratado	η
Césped:	22	26	-18%	44%	38%	-14%	14%	6%	57%
Mezcla:	25	22	12%	50%	9%	-82%	15%	5%	67%
Césped inóculo:	1	1	0%	54%	56%	4%	10%	8%	20%
Mezcla inóculo:	1	11	-1000%	38%	59%	56%	12%	5%	58%
Total:	12	15	-22%	47%	40%	-13%	13%	6%	53%

TABLA 24. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL PRETRATAMIENTO AEROBIO EN LA PRODUCCIÓN DE METANO

Los resultados indican que el pretratamiento aeróbico mejora la concentración de metano solo cuando la muestra digerida es inoculada, mientras que la disminuye cuando no es inoculada y por otro lado el pretratamiento mejora la dispersión, pero tiene un efecto variable sobre el retardo. De igual modo que para la producción, la concentración de metano en el gas es favorecida por el pretratamiento solo para las muestras inoculadas, destacando el bajo porcentaje de metano obtenido en la mezcla cuando es pretratada. En el caso de los retardos, los valores obtenidos son del mismo orden de magnitud menos el obtenido en la mezcla inoculada que pasa de 1 día a 11 cuando es pretratada. La dispersión mejora en todos los casos al pretratar, situando a la dispersión por debajo del 10%, lo que parece indicar que las muestras son más estables una vez tratadas.

En la Tabla 25 se compara la concentración, dispersión y retardo en la producción de alcohol de cada experimento según aplicación del pretratamiento aeróbico y se calcula la efectividad individual y global de la hidrólisis enzimática:

	Retardo de producción (días)			Concentración media de metano			Dispersión media de producción		
	Natural	Pretratado	η	Natural	Pretratado	η	Natural	Pretratado	η
Césped:	18	12	33%	21%	23%	10%	19%	16%	16%
Mezcla:	18	26	-44%	14%	36%	157%	12%	18%	-50%
Césped inóculo:	18	18	0%	5%	8%	60%	4%	7%	-75%
Mezcla inóculo:	18	26	-44%	9%	9%	0%	11%	7%	36%
Total:	18	21	-14%	12%	19%	55%	12%	12%	-4%

TABLA 25. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL PRETRATAMIENTO AEROBIO EN LA PRODUCCIÓN DE ALCOHOL

Los resultados indican que el pretratamiento aeróbico mejora la concentración obtenida de alcohol, mientras que tiene un efecto variable sobre el retardo y la dispersión. La concentración de alcohol aumenta con el pretratamiento en todas las muestras menos en la mezcla inoculada que se mantiene igual al pretratar, destacando el aumento producido en la concentración de alcohol con una efectividad del 157%. El retardo empeora siempre al pretratar la muestra mientras que sólo mejora al pretratar el césped puro. En el caso de la dispersión el comportamiento es más variable y a diferencia de lo que pasaba con el metano el pretratamiento no parece estabilizar la producción de alcohol.

6.8. RESUMEN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES:

En la Tabla 26 se muestra un resumen de los resultados experimentales obtenidos:

		1	2	3	4	5	6	7	8
		Césped	Césped inoculado	Mezcla	Mezcla inoculada	Césped predigerido	Césped predigerido inoculado	Mezcla predigerida	Mezcla predigerida inoculada
CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA	Incidencias	--	fugas, vaciado, inactividad	--	--	fugas, inactividad	--	--	fugas
		--	fugas	vaciado	--	--	vaciado	fugas, vaciado	--
	Sólidos³⁷ (%ST / %SV)	30/86 30/96	30/86 30/96 7/69	27/85 30/96	27/85 30/96 7/69	11/93 30/96	11/93 30/96 7/69	11/93 30/96	11/93 30/96 7/69
	PH	6,9 - 7,3 - 5,5 - 7,1	7,1 - 8,9 - 5,7 - 7,1	6,6 - 7,0 - 5,5 - 7,2 - 5,6 - 8,5	7,1 - 7,3	6,2 - 8,1 - 5,3 - 7,8	7,0 - 7,8	8,0	7,0 - 7,2
Anaerobia:	6,6 - 8,2 - 5,3 - 7,5	7,3 - 8,5 - 6,2 - 7,1 - 7,9	6,5 - 8,6	7,1 - 7,2	6,2 - 7,2 - 5,2 - 7,1	7,0 - 7,2	6,5 - 8,8	7,0 - 7,0	
Aerobia:	--	--	--	--	9,0 - 4,8 - 5,1	9,0 - 4,8 - 5,1	8,9 - 4,9 - 5,2	8,9 - 4,9 - 5,2	
PRODUCCIÓN DE GAS	Tendencia	ESCALONADA	ESCALONADA	TÍPICA	CRECIENTE	TÍPICA	DECRECIENTE	TÍPICA	DECRECIENTE
	Periodo de producción (días)	+69	28	+69	+69	+69	+69	+69	+69
	Producción total (NL/kg)	72	94	61	144	58	176	40	223
	Producción diaria (NL.kg.día)	1,0	3,4	0,9	2,1	0,8	2,6	0,6	3,2
	Reactivaciones (efectivas/total)	2 / 2	1 / 2	2 / 2	--	1/2	--	--	--
	Periodo de reactivación (día)	20 47	-- 20, 47	20, 47 --	-- --	-- 33, 47	-- --	-- --	-- --
COMPOSICIÓN EN METANO	Tendencia	DECRECIENTE	CRECIENTE	CONVEXA	CONCAVA	CONSTANTE	CONSTANTE	CONSTANTE	CONSTANTE
	Retardo de producción (días)	22	1	25	1	26	1	22	11
	Composición media (%)	27	54	30	38	22	56	6	59
	Composición media en producción (%)	44	54	50	38	38	56	9	59
	Dispersión media en producción (%)	±14	±10	±15	±12	±6	±8	±5	±5
	Composición máxima (%)	75	69	75	62	49	64	16	68
	Composición mínima (%)	0	6	0	0	24	6	2	39
COMPOSICIÓN EN ALCOHOL	Tendencia	CONCAVA	CONSTANTE	CRECIENTE	CONSTANTE	CONCAVA	DECRECIENTE	CRECIENTE	CONCAVA
	Retardo de producción (días)	18	18	18	18	12	18	26	26
	Composición media (%)	14	3	10	6	22	5	20	5
	Composición media en producción (%)	21	5	14	9	23	8	36	9
	Dispersión media en producción (%)	±19	±4	±12	±11	±16	±7	±18	±7
	Composición máxima (%)	97	17	58	82	69	24	80	24
	Composición mínima (%)	0	0	0	0	0	0	0	0

TABLA 26. RELACIÓN DE RESULTADOS DE CADA EXPERIMENTO
(SE MUESTRA ARRIBA LOS VALORES DE LA PRIMERA RÉPLICA Y ABAJO LOS DE LA SEGUNDA)

³⁷ **Medida de sólidos en los digestatos:** se realiza en la fracción sólida previamente filtrada al vacío

7. CONCLUSIONES / CONCLUSIONS

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

1. Los experimentos nos permiten sacar las siguientes conclusiones en relación con el pH:
 - a. Todos los experimentos una vez han sido parados para su reactivación, mostraron descensos en su pH hasta niveles ácidos.
 - b. Mientras en la digestión anaerobia el sistema se desactiva al llegar a niveles ácidos, en la digestión aerobia el sistema puede transcurrir en medio ácido.
 - c. Añadir el bacilo alcaliniza el medio en un punto de pH.
2. Hay poca diferencia entre usar un residuo individual y una mezcla de ellos, aunque se pueden destacar ciertas diferencias:
 - a. La alta producción obtenida para la mezcla cuando es inoculada de alguna forma (ya sea con el uso único del inóculo o conjunto con el pretratamiento).
 - b. La baja calidad obtenida para el césped pretratado o la mezcla con un solo tratamiento (inoculada o pretratada).
3. El uso del inóculo mejora de forma considerable la producción de gas, como su calidad, además de anticipar la metanización.
4. La hidrólisis enzimática como pretratamiento mejora la producción de gas, como su calidad en caso del uso conjunto con inóculo.
5. El análisis de composición de los gases producidos revela la aparición, a partir de la segunda semana, de un componente que no es común en este tipo de procesos, destacando lo siguiente:
 - a. Por la composición de los residuos se ha considerado como algún tipo de alcohol
 - b. Por lo general su distribución es parecida a la del metano, con una menor producción y de forma más dispersa
 - c. Parece ser que el uso de inóculo reduce considerablemente la presencia de alcoholes, lo que puede deberse a que este compuesto favorece la digestión anaerobia y este no es un producto típico de esta.
 - d. Por el contrario, la presencia de alcoholes puede explicarse en el uso del bacilo en todas las muestras, incluso en las que no forman parte de la digestión aerobia, resaltando además que la producción de alcoholes es mayor en las muestras que sí han participado en esta etapa, ya que son productos normales de digestión aerobia.

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

1. The experiments allow us to draw the following conclusions regarding pH:
 - a. All experiments once they have been stopped for reactivation, showed decreases in their pH to acidic levels.
 - b. While in anaerobic digestion the system is deactivated when it reaches acidic levels, in aerobic digestion the system can pass in acid medium.
 - c. Add the bacillus alkalizes the medium at a pH point.
2. There is little difference between using an individual residue and a mixture of them, although certain differences can be highlighted:
 - a. The high production obtained for the mixture when it is inoculated in some way (either with the single use of the inoculum or together with the pretreatment).
 - b. The low quality obtained for pre-treated grass or mixing with a single treatment (inoculated or pre-treated).
3. The use of inoculum considerably improves gas production, as well as its quality, in addition to anticipating methanization.
4. Enzymatic hydrolysis as a pretreatment improves gas production, such as its quality in case of joint use with inoculum.
5. The analysis of the composition of the gases produced reveals the appearance, from the second week of a component that is not common in this type of process, highlighting the following:
 - a. Due to the composition of the residues, it has been considered as some type of alcohol.
 - b. In general, its distribution is like that of methane, with a lower production and more dispersed form.
 - c. It seems that the use of inoculum considerably reduces the presence of alcohols, which may be because this compound favors anaerobic digestion, and this is not a typical product of this.
 - d. On the contrary, the presence of alcohols can be explained in the use of the bacillus in all samples, even in those that are not part of aerobic digestion, also highlighting that the production of alcohols is higher in samples that have participated in this stage, since they are normal products of aerobic digestion.

8. RECOMENDACIONES

El desarrollo de este trabajo permite sacar una serie de recomendaciones con las que mejorar o complementar este estudio:

- Principalmente se deduce la **necesidad de hacer multitud de réplicas** de cada experimento para conseguir resultados más fiables que nos permitan discriminar errores y tener conclusiones más sólidas para las distribuciones. Añadiéndose o repitiendo réplica cuando los resultados sean muy dispares o cuando esta no sea válida, y no tengamos suficientes réplicas como para hacer una media, que como mínimo deberían ser de dos réplicas válidas.
- Se podrían **añadir otros experimentos** en función del uso de bacilo y en diferentes estados de maduración de los residuos para complementar el estudio.
- Se podrían **añadir ensayos adicionales** para describir mejor el experimento o evitar errores experimentales, como: la caracterización de inóculos para evitar tener el proceso contrario de inhibición, la caracterización de la hidrólisis enzimática por el método de azúcares reductores para complementar el análisis de su eficacia, la caracterización de sólidos en digestatos finales para complementar el análisis de la eficacia de los procesos, el análisis de digestatos para la verificación de subproductos como el caso del alcohol, entre otros ensayos.
- Se podría **realizar diferentes estudios** para complementar el trabajo: comparación de la efectividad en la metanización de este proceso con el de otros residuos vegetales o diferentes, con otros tipos de inóculos o formas de codigestión.
- El experimento podría necesitar un **control más continuo de pH**, de forma que desde que el sistema entre en periodo de estabilización podría medirse el pH para ver si es necesario reactivar, ya que, de este modo aparte de conseguir una mejor producción, podríamos tener más medidas de pH que podrían explicar mejor el comportamiento del sistema.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Asociación de Empresas de Energías Renovables. (2018). *Renovables en España*. Obtenido de <https://www.appa.es/energias-renovables/renovables-en-espana/>
- Bodelón García, C. (2018). *Co-digestión de residuos para la obtención de biogás. Influencia de la presencia de inóculo y estructurante*. Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica de la Universidad de La Laguna.
- Cabildo de Tenerife. (2009). *Descripción del Plan Territorial Especial de Ordenación de Residuos*. Obtenido de <https://www.tenerife.es/portalcabtfe/es/temas/residuos/plan-territorial-especial-de-ordenacion-de-residuos>
- Cabildo de Tenerife. (2009). *Plan Territorial Especial de Ordenación de Residuos de Tenerife. Memoria Informativa. Capítulo 7: Variables territoriales*.
- Cabildo de Tenerife. (2009). *Plan Territorial Especial de Ordenación de Residuos de Tenerife. Memoria Informativa. Capítulo 8: Análisis de la situación actual*.
- Cabildo de Tenerife. (2009). *Plan Territorial Especial de Ordenación de Residuos de Tenerife. Memoria Justificativa. Capítulo 3: Modelos de gestión*.
- Cabildo de Tenerife. (2009). *Plan Territorial Especial de Ordenación de Residuos de Tenerife. Memoria Justificativa. Capítulo 5: Infraestructuras de gestión de residuos*.
- Cabildo de Tenerife. (2010). Texto refundido del Plan Territorial Especial de Ordenación de Residuos de Tenerife.
- Cabildo de Tenerife. (2017). *Estadísticas de residuos*. Obtenido de <http://www.tenerifemassostenible.es/gestion-de-residuos/estadisticas-de-residuos/>
- Cabildo de Tenerife. (2017). *Gestión de residuos*. Obtenido de <http://www.tenerifemassostenible.es/gestion-de-residuos/>
- Cabildo de Tenerife. (2018). *Cómo utilizar un minipunto limpio*. Obtenido de <https://www.tenerifemassostenible.es/utilizar-minipunto-limpio/>
- Cabildo de Tenerife. (2019). *Planes insulares*. Obtenido de <https://www.tenerife.es/planes/#>
- Certificados Energéticos. (2018). *Objetivos de renovables y eficiencia energética para 2030*. Obtenido de <https://www.certificadosenergeticos.com/objetivos-de-renovables-y-eficiencia-energetica-2030>
- Chocho Cabrera, A. (2016). *Valorización de residuos de Jatropha Curcas: energética, química y/o mecánica*. Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica de la Universidad de La Laguna.
- Comisión de Seguimiento de la Gestión de Residuos de Tenerife. (2017). Acta N°10.
- Comisión Europea. (2016). *Estrategias 2020, 2030, 2050 y Progreso*. Obtenido de https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies_es
- Datos abiertos. Cabildo de Tenerife. (2018-2022). *Gestión de residuos de Tenerife*. Obtenido de <https://datos.tenerife.es/es/datos/conjuntos-de-datos/gestion-de-residuos-de-tenerife?return=aHR0cHM6Ly9kYXRvcy50ZW5lcmllmZS5lcy9lcy9kYXRvcy9jb25qdW50b3MtZGUtZGF0b3M=>
- Genia Bioenergy. (s.f.). *Cómo realizar una correcta gestión de residuos Sandach*. Obtenido de <https://geniabioenergy.com/la-gestion-de-los-residuos-sandach/#:~:text=Los%20subproductos%20animales%20no%20destinados,est%C3%A1n%20destinados%20a%20consumo%20humano>
- Gobierno de Canarias. (2021). *Plan Integral de Residuos de Canarias. Tomo I: Información y Diagnóstico*.
- Gobierno de Canarias. (2021). *Plan Integral de Residuos de Canarias. Tomo II: Ordenación de residuos. Planificación*.
- H. Campaña, A. A. (2015). *Enzimas como indicadores bioquímicos de evolución de procesos de digestión anaerobia*. Facultad Regional Bahía Blanca de la Universidad Tecnológica Nacional de Argentina.
- Hoffmann. (2015). *Biogás*. Universidad Aplicada de Ciencias de Landshut.
- Instituto Canario de Estadística. (2002-2020). *Recopilación de Estadísticas sobre los Residuos / Series anuales. Canarias. 2002-2020*. Obtenido de <https://www3.gobiernodecanarias.org/aplicaciones/appsistac/jaxi-istac/menu.do?uripub=urn:uuid:13a69e41-7b47-41fe-87e4-7b79dddb60d1>
- Instituto Canario de Estadística. (2016). *Cantidad per cápita de residuos recogidos según tipos de residuo por años*. Obtenido de <http://www.gobiernodecanarias.org/istac/jaxi-istac/menu.do?uripub=urn:uuid:13a69e41-7b47-41fe-87e4-7b79dddb60d1>
- International Energy Agency. (2018). *World Energy Outlook*. Obtenido de <https://www.iea.org/weo/>

- Martín San José, C. (2018). *Obtención de biogás a partir de residuos agrícolas activados con agentes Inoculantes*. Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica de la Universidad de La Laguna.
- National Geographic. (2018). *Energía renovable para abastecer a todo el planeta*. Obtenido de https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/grandes-reportajes/energia-renovable-para-abastecer-a-todo-planeta_11706/2
- Periódico EL DÍA. (2019). *El Cabildo de Tenerife licita la gestión de residuos por un importe récord en Canarias*. Obtenido de <https://www.eldia.es/tenerife/2019/05/01/40-millones-mejorar-instalaciones/971610.html>
- Periódico EL DIARIO. (2016). *Tenerife invertirá 114 millones en instalaciones de tratamiento para avanzar hacia el vertido cero*. Obtenido de https://www.eldiario.es/canariasahora/tenerifeahora/Tenerife-invertira-millones-instalaciones-tratamiento_0_525298141.html
- Remedios, J. A. (2017). *Aprovechamiento energético de los residuos de purines de animales y lodos de depuradora*. Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica de la Universidad de La Laguna.
- Tejeda, L., Quintana, J., Pérez, J., & Young, H. (2011). *Obtención de etanol a partir de residuos de poda mediante hidrólisis ácida e hidrólisis enzimática*. Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco de Colombia.
- Toro, J. C., Moreno, J. P., & Zuluaga, B. H. (2017). *Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en bioreactores a escala laboratorio*. Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia.
- Wojtusik, M. W. (2019). *Hidrólisis enzimática de materiales lignocelulósicos*. Universidad Complutense de Madrid.

10. ANEXOS

10.1. ANEXO I: DATOS DE PRODUCCIÓN OBTENIDOS:

	M1	M2	M4	M5	M7	M8	M10	M11	M13	M15	M16
días	NL/kg										
0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,67	4,2	24,4	8,7	15,8	24,9	30,6	21,8	0,4	1,8	20,7	27,8
1,96	5,8	32,6	10,7	22,2	32,2	36,2	32,2	9,1	15,5	30,6	31,5
4,67	8,2	40,6	12,2	44,0	39,5	42,0	36,0	10,4	23,3	53,7	43,7
6,67	8,4	41,5	14,7	48,4	44,6	42,9	41,7	11,8	28,2	55,7	56,2
7,79	8,4	42,2	14,7	49,3	45,3	44,2	48,6	13,1	31,3	58,0	59,1
11,79	8,4	42,4	14,7	49,7	46,0	44,2	49,3	13,1	31,3	58,0	72,4
12,79	8,7	42,6	14,9	49,7	46,2	44,2	49,3	13,1	31,8	66,6	78,8
13,79	8,9	42,6	14,9	49,7	46,4	44,2	49,5	13,1	32,6	79,9	87,1
14,79	8,9	42,9	14,9	49,7	46,9	44,2	49,7	26,6	32,9	106,1	95,7
15,88	8,9	42,9	42,9	49,7	47,1	44,6	50,4	29,5	32,9	111,5	103,5
18,92	8,9	43,3	69,1	49,7	48,6	45,1	51,3	38,2	32,9	122,6	116,4
19,88	8,9	43,7	69,1	49,7	49,5	45,3	52,2	42,9	34,2	127,0	120,6
20,92	28,2	43,7	69,1	50,4	50,2	45,7	52,2	48,2	34,2	129,5	123,0
21,92	28,4	44,4	69,3	50,4	50,2	45,7	52,2	51,5	34,2	132,8	125,7
22,75	28,4	44,9	69,3	50,4	50,6	46,0	52,2	55,5	34,2	135,7	128,1
25,83	48,9	45,7	69,3	53,5	52,0	46,2	52,2	71,5	35,1	147,7	136,6
26,88	48,9	45,7	93,9	53,5	52,6	46,4	52,2	75,9	35,1	151,9	139,9
27,67	48,9	45,7	93,9	54,0	52,6	46,4	52,2	79,9	35,1	155,0	142,3
28,83	49,1	45,7	94,2	54,4	54,0	46,6	52,2	86,6	35,1	156,6	146,6
32,92	49,1	45,7	94,2	55,1	60,4	47,5	52,2	102,8	35,1	169,7	160,6
34,79	49,1	45,7	94,2	55,5	66,2	48,2	52,2	111,7	36,0	177,4	167,7
36,92	67,3	45,7	94,2	55,5	72,8	49,7	52,2	119,3	36,0	183,9	175,4
39,79	68,2	46,0	94,2	55,5	85,5	53,3	52,2	134,8	36,2	193,6	182,8
41,79	68,4	46,2	94,2	56,0	89,3	56,0	52,2	142,1	36,2	199,6	188,3
43,88	69,5	46,2	94,2	56,0	92,2	60,6	52,2	148,8	36,9	204,3	193,6
46,75	70,4	46,2	94,2	56,0	95,0	66,6	52,2	154,1	38,4	209,2	198,5
48,73	70,4	46,6	94,2	56,0	97,7	68,6	52,6	155,7	38,4	211,2	200,1
50,75	70,4	46,6	94,2	56,2	101,3	70,8	53,1	157,0	39,3	215,0	201,4
53,67	73,9	46,6	94,2	56,2	109,3	75,7	54,6	160,1	39,3	219,2	202,5
56,60	77,3	46,6	94,2	56,4	120,4	83,3	56,2	163,0	39,3	224,5	204,7
62,85	85,5	47,3	94,2	56,4	138,1	95,5	57,5	169,9	39,8	227,8	210,7
64,77	88,6	47,5	94,2	59,1	147,9	106,4	58,0	172,5	40,2	229,4	213,0
68,67	94,8	48,6	94,2	61,3	163,4	124,4	58,4	176,8	40,4	230,7	214,7

10.2. ANEXO II: DATOS DE COMPOSICIÓN OBTENIDOS:

días	1		2		3		4		5		6		7		8	
	% metano	% alcohol														
1,67	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,96	0,0	0,0	6,5	0,0	0,0	0,0	2,3	0,0	--	--	5,6	0,0	0,0	0,0	--	--
6,67	0,0	0,0	44,7	0,0	0,8	0,0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
11,79	0,0	0,0	--	--	--	--	61,7	0,0	0,0	0,0	42,1	0,0	0,0	0,0	39,2	0,0
12,79	0,0	0,0	46,1	0,0	0,0	0,0	53,6	0,0	0,0	38,0	59,8	0,0	0,0	0,0	57,1	0,0
13,79	0,0	0,0	45,3	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	59,6	0,0	0,0	0,0	61,3	0,0
14,79	0,0	0,0	46,6	0,0	0,0	0,0	48,3	0,0	0,0	0,0	60,4	0,0	0,0	0,0	59,3	0,0
15,88	0,0	0,0	48,7	0,0	0,0	0,0	45,7	0,0	1,3	0,0	59,9	0,0	0,0	0,0	59,4	0,0
18,92	0,0	23,0	47,6	6,4	0,0	6,4	40,8	6,7	0,0	34,6	45,9	24,0	0,0	0,0	60,4	0,0
22,75	75,1	0,0	62,9	1,1	0,0	0,0	37,0	0,0	0,0	0,0	64,4	0,0	1,6	0,0	64,2	0,0
25,83	0,0	57,1	49,3	17,2	3,2	6,1	36,0	0,0	0,0	69,0	--	--	1,6	0,0	63,1	0,0
26,88	59,3	1,9	61,3	0,0	46,4	0,0	34,2	0,0	23,7	46,0	54,3	15,2	3,2	30,2	56,5	9,5
28,83	69,0	0,0	62,1	0,0	59,8	1,8	32,0	2,9	31,0	44,1	64,3	0,0	11,5	0,0	63,7	0,0
32,92	42,5	37,4	63,4	1,9	67,2	2,0	32,4	2,4	49,5	9,8	63,5	1,8	5,7	41,1	56,2	12,2
36,92	59,5	1,9	68,8	2,2	74,9	2,4	39,6	2,6	37,3	27,9	56,0	14,4	14,0	29,7	54,8	16,9
39,79	46,6	16,6	66,8	1,0	59,7	17,0	45,0	2,0	29,2	43,0	63,4	1,4	15,4	25,1	50,1	24,4
41,79	42,1	15,1	58,7	7,0	64,5	9,9	8,9	81,5	47,9	5,3	57,2	12,0	15,8	27,4	63,2	4,4
43,88	42,7	11,1	56,7	7,3	58,6	12,6	44,4	10,8	36,8	26,0	56,9	12,6	3,7	80,3	56,1	16,7
46,75	43,5	11,1	58,5	4,3	54,0	16,7	47,4	4,8	37,1	25,2	62,9	5,2	8,1	62,7	66,5	1,3
48,73	43,8	11,4	57,8	10,3	52,7	16,5	46,5	6,2	46,9	7,6	57,5	13,0	13,5	31,5	59,7	12,3
50,75	45,2	8,3	67,6	1,0	26,6	57,7	50,1	1,1	36,1	22,9	64,4	1,2	9,1	59,6	67,9	1,1
53,67	1,3	97,5	64,3	1,0	33,2	45,5	51,9	0,9	39,5	11,8	63,8	1,2	14,4	6,4	66,2	3,4