



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LA GENERACIÓN DE DIGESTATO PROCEDENTE DEL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS EN EL SECTOR AGROALIMENTARIO ESPAÑOL

Autor: Ignacio Álvaro Mancha

Director: Carlos Morales Polo

Co-Director: Carlos Martín Sastre

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LA GENERACIÓN DE DIGESTATO
PROCEDENTE DEL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS EN EL SECTOR
AGROALIMENTARIO ESPAÑOL**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2022/23 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Ignacio Álvaro Mancha

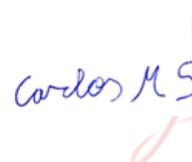
Fecha: 19/07/2023

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Firmado digitalmente por Carlos
Morales Polo
Nombre de reconocimiento (DN):
cn=Carlos Morales Polo, o, ou,
email=cmorales@comillas.edu, c=ES

Fecha:
2023.07.19
00:00:47
+02'00'



Fdo.: Carlos Morales Polo, Carlos Martín Sastre Fecha: 19/07/2023



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LA GENERACIÓN DE DIGESTATO PROCEDENTE DEL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS EN EL SECTOR AGROALIMENTARIO ESPAÑOL

Autor: Ignacio Álvaro Mancha

Director: Carlos Morales Polo

Co-Director: Carlos Martín Sastre

Madrid

EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LA GENERACIÓN DE DIGESTATO PROCEDENTE DEL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS EN EL SECTOR AGROALIMENTARIO ESPAÑOL

Autor: Álvaro Mancha, Ignacio.

Director: Morales Polo, Carlos y Martín Sastre, Carlos

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Palabras clave: Biogás, digestato, medioambiental, fertilizante

1. Introducción

En los últimos años, la gestión adecuada de los residuos se ha convertido en un tema de gran importancia en todo el mundo. La Unión Europea ha establecido objetivos ambiciosos para reducir los residuos y fomentar la economía circular. En este contexto, el sector agroalimentario español es uno de los principales generadores de residuos en el país. Por lo tanto, se ha vuelto esencial evaluar las posibilidades de aprovechamiento integral de los residuos de este sector para la generación de energía, a fin de reducir su impacto ambiental y mejorar la sostenibilidad de la industria. En este proyecto se pondrá el foco y se estudiarán los residuos agroalimentarios, obtenidos de los sobrantes de los puntos de venta principales de verduras y fruta de España, estos puntos de venta generan más de 2 Millones de toneladas de residuos al año. (Fuente INE – datos 2020)

Este trabajo se centra en la evaluación medioambiental del aprovechamiento integral de residuos para la generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia y el posterior estudio del residuo generado durante este proceso, el digestato. El objetivo principal es analizar los impactos ambientales asociados a esta estrategia de gestión de residuos y comprobar el potencial y viabilidad medioambiental del proceso. Además, se estudiarán, comparándolos entre ellos y con la situación actual, distintos escenarios, y se comparará el impacto ambiental del uso del digestato obtenido en este proceso como fertilizante, con el impacto ambiental de un fertilizante genérico.

El biogás, es una parte importante de la solución para alcanzar la neutralidad climática en 2050 y lograr los objetivos de reducción de emisiones y de penetración de energías renovables propuestos para España en 2030. Además, su uso contribuye a políticas transversales del Gobierno de España, como el desarrollo de la Economía Circular, el Reto Demográfico y la Transición Energética Justa e Inclusiva, generando sinergias relevantes entre todas ellas.

El biogás se genera a partir de residuos orgánicos mediante la digestión anaerobia, lo que permite un uso eficiente y sostenible de los residuos en la economía circular, especialmente en el ámbito agroalimentario y de residuos municipales. Al valorizar los residuos para la producción de biogás, se obtienen beneficios adicionales como la valorización energética de los residuos y el uso del digestato como fertilizante, evitando emisiones de metano y dióxido de carbono a la atmósfera y mejorando la gestión de residuos.

España tiene una gran oportunidad para aprovechar el potencial del biogás en el sector agroalimentario y de la gestión de residuos, gracias al tamaño de su industria agroalimentaria y favoreciendo una gestión más eficiente de los residuos municipales.

2. Definición del proyecto

El objetivo de la evaluación medioambiental a estudiar en este proyecto es la identificación y evaluación de los posibles impactos ambientales del proceso de producción de biogás y digestato, y el posterior análisis del digestato generado y su posible uso como fertilizante.

La evaluación medioambiental se realizará utilizando una metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que permitirá evaluar los impactos ambientales asociados con todo el ciclo de vida de los sistemas de gestión de residuos y generación de biogás y digestato. Para ello se utilizará la aplicación SIMAPRO.

Para realizar el ACV de la producción de biogás y digestato a partir de residuos agroalimentarios utilizando la aplicación SIMAPRO, lo primero que se realizará será identificar el objetivo y el alcance del estudio. Se debe definir el modelo de producción y sus respectivos flujos de entrada y salida. Luego, se utilizarán las bases de datos de SIMAPRO y se modificarán para que se adapten al modelo deseado. Finalmente se utilizará este programa para obtener información sobre el impacto ambiental de los procesos involucrados en la producción de biogás y digestato.

En el caso específico de la utilización de residuos vegetales para la producción de biogás y digestato, se deben tener en cuenta los procesos de recolección de los residuos, su transporte y almacenamiento, el proceso de digestión anaerobia y los postprocesos (en el caso del digestato, la deshidratación). También se deben considerar los flujos de entrada y salida de energía y nutrientes en el sistema.

Una vez que se hayan recopilado los datos necesarios, se realizará el análisis del ciclo de vida utilizando la metodología adecuada y las herramientas de SIMAPRO para evaluar los impactos ambientales del sistema en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, consumo de recursos y generación de residuos. De esta manera, se obtendrá una evaluación precisa y completa de la sostenibilidad ambiental de la producción de biogás y digestato a partir de los residuos estudiados y se podrá comparar el digestato obtenido listo para ser utilizado como fertilizante, con un fertilizante genérico NPK.

3. Descripción de la planta y del modelo operativo.

Para llevar a cabo el estudio, lo primero que se realiza es el modelado de la planta y el esquema del modelo operativo. Dicho esquema se muestra en la figura posterior y se compone de los siguientes bloques:

- I. Recepción y pretratamiento: Los residuos entran en el sistema y se les aplica un pretratamiento en el cual se selecciona la fracción que se va a tratar en el siguiente bloque, rechazando el resto, y se tritura para su posterior tratamiento.
- II. Proceso de digestión anaerobia: Los residuos previamente seleccionados se mezclan y posteriormente se tratan en el digestor donde se transforman en biogás y digestato (residuos). El biogás extraído del digestor pasa a la unidad de Desulfuración y posteriormente a una planta donde se trata para poder ser

comercializado y utilizado. El digestato por su parte se deshidrata y se obtienen dos recursos, digestato deshidratado (sólido) y digestato líquido.

- III. El digestato líquido se trata en el bloque de Tratamiento de digestato, en el cual se filtra, se elimina el nitrógeno y mediante un proceso de ósmosis inversa se obtiene un nuevo digestato líquido en dos estados: Permeado y Concentrado.
- IV. El digestato deshidratado o sólido se envía directamente a la planta de compostaje donde se almacena y transforma en fertilizante.

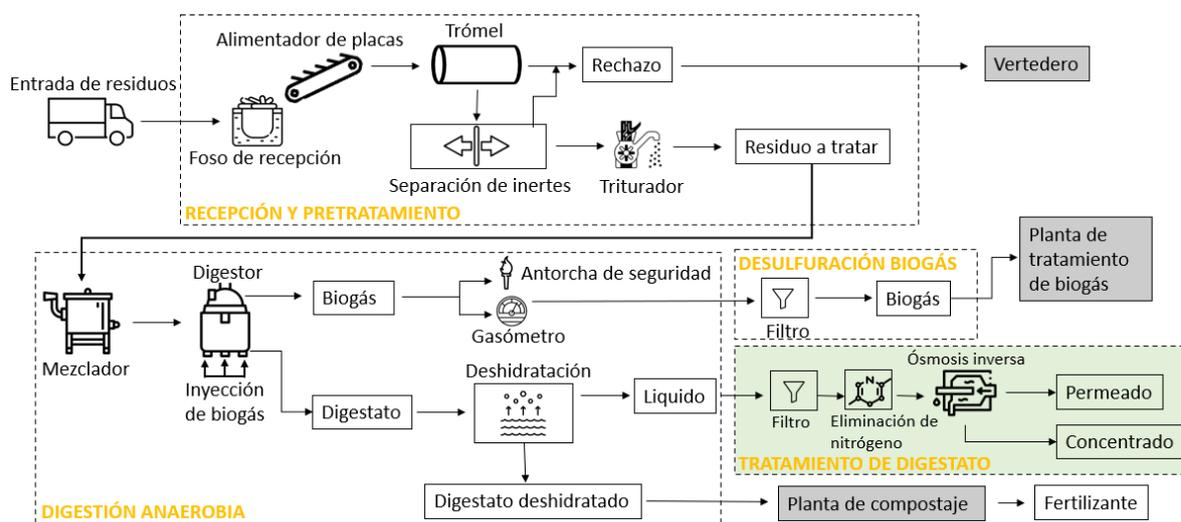


Ilustración - Esquema de la planta y del modelo operativo.

4. Resultados

Con la elaboración de este proyecto de fin de máster se han alcanzado los siguientes resultados de manera exitosa:

- Elaboración precisa de la composición del residuo generado en los puntos de venta de los grandes mercados y análisis de los residuos de todos los puntos de venta y en especial, de aquellos situados en la región de Andalucía.
- Análisis del transporte utilizado para el traslado de los residuos desde el punto en el que se generan hasta la planta de tratamiento.
- Modelado del proceso de digestión anaerobia en SIMAPRO tanto en versión Cut Off como en versión APOS. Posteriormente se realiza una comparación entre ambos y se decide trabajar con la versión Cut Off al ser la más conveniente.
- Obtención del impacto ambiental del proceso de digestión anaerobia dividiendo el impacto entre el biogás y el digestato gracias a la asignación de cargas por criterio económico realizada. Estudio del impacto ambiental en la región de Andalucía.
- Modelado del proceso de deshidratación del digestato en SIMAPRO, proceso mediante el cual se divide el digestato entre su fracción líquida y sólida.

- Análisis del digestato obtenido a la salida de cada proceso para conocer su composición y comprobar que es posible su uso como fertilizante siguiendo la normativa española.
- Comparación entre el fertilizante generado a partir del digestato seco obtenido en el proyecto y un fertilizante inorgánico NPK. Se obtiene que gracias al fertilizante orgánico obtenido en este proyecto se pueden sustituir anualmente 57,26 toneladas de fertilizante inorgánico solo en la región de Andalucía.
- Obtención del impacto ambiental total del ciclo de vida del digestato seco (listo para ser utilizado como fertilizante) y comparación con el impacto ambiental del fertilizante inorgánico NPK 15-15-15 en la región de Andalucía. Se calcula un ahorro anual de 55,59 ton de CO₂, lo que supone un 73% menos que las emisiones de CO₂ producidas por el fertilizante NPK.

5. Conclusiones

Con la elaboración de este proyecto se ha conseguido analizar el impacto ambiental del ciclo de vida del fertilizante a partir del digestato generado con el residuo de frutas y verduras de los grandes mercados nacionales, y específicamente los andaluces. Se ha podido comprobar como esta práctica ahorraría anualmente miles de toneladas de fertilizantes inorgánicos que tienen un impacto ambiental mucho mayor. Además, se consigue revalorizar un producto que había perdido todo su valor y estaba considerado como residuo, para generar este fertilizante y biogás.

Con este proyecto se evalúa y cuantifica el ahorro ambiental que supone esta práctica y se modela el proceso completo, desde su obtención, la composición del residuo, el modelado de los procesos y el análisis de los productos que se generan en cada proceso, hasta la comparación con un fertilizante genérico y la obtención de resultados. Al haberse seguido la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, en el proyecto se han descrito todos los pasos realizados para que pueda ser reproducido o modificado con facilidad.

Por último, cabe destacar que este proyecto está en línea con los objetivos marcados por la Unión Europea para la reducción de los residuos y fomentar la economía circular. Además de estar alineado con muchos ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) lo que demuestra su importante contribución a la sostenibilidad.

6. Referencias

- [1] Secretaría de Estado de Energía. Hoja de ruta del biogás. Marzo 2022:
https://energia.gob.es/es-es/Novidades/Documents/00HR_Biogas_V6.pdf
- [2] Dirección General de Recursos Agrícolas y Ganaderos. EL SECTOR DEL BIOGÁS AGROINDUSTRIAL EN ESPAÑA. Septiembre 2020:
https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/requisitos-y-condicionantes-de-la-produccion-ganadera/DOCBIOGASVersion21-09-2010_tcm30-110139.pdf

- [3] INE (Instituto Nacional de Estadística) Cantidad de residuos generados por actividad económica (CNAE-2009), clase de residuo y tipo de peligrosidad:
<https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?tpx=30628>
- [4] The Global Goals. THE 17 GOALS. <https://www.globalgoals.org/goals/>
- [5] SG de Medios de Producción Agrícolas y Oficina Española de Variedades Vegetales. Legislación de los productos fertilizantes. 2021:
https://www.mapa.gob.es/images/ca/ponencia-3_tcm34-622550.pdf
- [6] HTN Biogás, S.L. Dossier de Prensa HTN.pdf.
- [7] Planta de tratamiento de biogás Valdemingomez - Ayuntamiento de Madrid.
Personal del centro.

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF THE INTEGRATED USE OF WASTE FOR DIGESTATE GENERATION IN THE SPANISH AGRIFOOD SECTOR

Author: Álvaro Mancha, Ignacio.

Supervisor: Morales Polo, Carlos y Martín Sastre, Carlos.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

Keywords: biogas, digestate, environmental, fertilizer

1. Introduction

In recent years, proper waste management has become a major issue worldwide. The European Union has set ambitious targets to reduce waste and promote the circular economy. In this context, the Spanish agri-food sector is one of the main waste generators in the country. Therefore, it has become essential to evaluate the possibilities of integral utilization of waste from this sector for energy generation, in order to reduce its environmental impact and improve the sustainability of the industry. This project will focus on and study agri-food waste, obtained from the leftovers of the main vegetable and fruit outlets in Spain, these outlets generate more than 2 million tons of waste per year. (Source INE - 2020 data).

This work focuses on the environmental evaluation of the integrated use of waste for the generation of biogas through the anaerobic digestion process and the subsequent study of the waste generated during this process, the digestate. The main objective is to analyze the environmental impacts associated with this waste management strategy and to verify the environmental potential and feasibility of the process. In addition, different scenarios will be studied, comparing them with each other and with the current situation, and the environmental impact of the use of the digestate obtained in this process as fertilizer will be compared with the environmental impact of a generic fertilizer.

Biogas is an important part of the solution to reach climate neutrality by 2050 and achieve the emission reduction and renewable energy penetration targets proposed for Spain in 2030. Moreover, its use contributes to cross-cutting policies of the Government of Spain, such as the development of the Circular Economy, the Demographic Challenge and the Just and Inclusive Energy Transition, generating relevant synergies between all of them.

Biogas is generated from organic waste through anaerobic digestion, which allows an efficient and sustainable use of waste in the circular economy, especially in the agri-food and municipal waste sectors. By valorizing waste for the production of biogas, additional benefits are obtained such as the energy recovery of waste and the use of digestate as fertilizer, avoiding methane and carbon dioxide emissions into the atmosphere and improving waste management.

Spain has a great opportunity to take advantage of the potential of biogas in the agri-food and waste management sector, thanks to the size of its agri-food industry and favoring a more efficient management of municipal waste.

2. Project definition

The objective of the environmental assessment to be studied in this project is the identification and evaluation of the potential environmental impacts of the biogas and digestate production process, and the subsequent analysis of the digestate generated and its possible use as fertilizer.

The environmental assessment will be carried out using a Life Cycle Assessment (LCA) methodology, which will allow evaluating the environmental impacts associated with the entire life cycle of the waste management and biogas and digestate generation systems. The SIMAPRO application will be used for this purpose.

To perform the LCA of biogas and digestate production from agri-food waste using the SIMAPRO application, the first step is to identify the objective and scope of the study. The production model and its respective input and output flows must be defined. Next, the SIMAPRO databases will be used and modified to fit the desired model. Finally, this program will be used to obtain information on the environmental impact of the processes involved in the production of biogas and digestate.

In the specific case of the use of vegetable waste for the production of biogas and digestate, the processes of waste collection, transportation and storage, and the anaerobic digestion process must be taken into account. The input and output flows of energy and nutrients in the system must also be considered.

Once the necessary data have been collected, the life cycle analysis will be performed using the appropriate methodology and SIMAPRO tools to assess the environmental impacts of the system in terms of greenhouse gas emissions, resource consumption and waste generation. In this way, an accurate and complete assessment of the environmental sustainability of biogas and digestate production from the wastes studied will be obtained.

3. Description of the model/system/tool

In order to carry out the study, the first thing to be done is the modeling of the plant and the outline of the operating model. This scheme is shown in the figure below and consists of the following blocks:

- I. Reception and pretreatment: The waste enters the system and undergoes pretreatment in which the fraction to be treated in the next block is selected, rejecting the rest, and is shredded for subsequent treatment.
- II. Anaerobic digestion process: The previously selected waste is mixed and subsequently treated in the digester where it is transformed into biogas and digestate (waste). The biogas extracted from the digester goes to the Desulfurization unit and then to a plant where it is treated to be marketed and used. The digestate is dehydrated and two resources are obtained, dehydrated digestate (solid) and liquid digestate.
- III. The liquid digestate is treated in the digestate treatment block, where it is filtered, the nitrogen is removed and a new liquid digestate is obtained through a reverse osmosis process in two states: permeate and concentrate.
- IV. IV. The dehydrated or solid digestate is sent directly to the composting plant where it is stored and transformed into fertilizer.

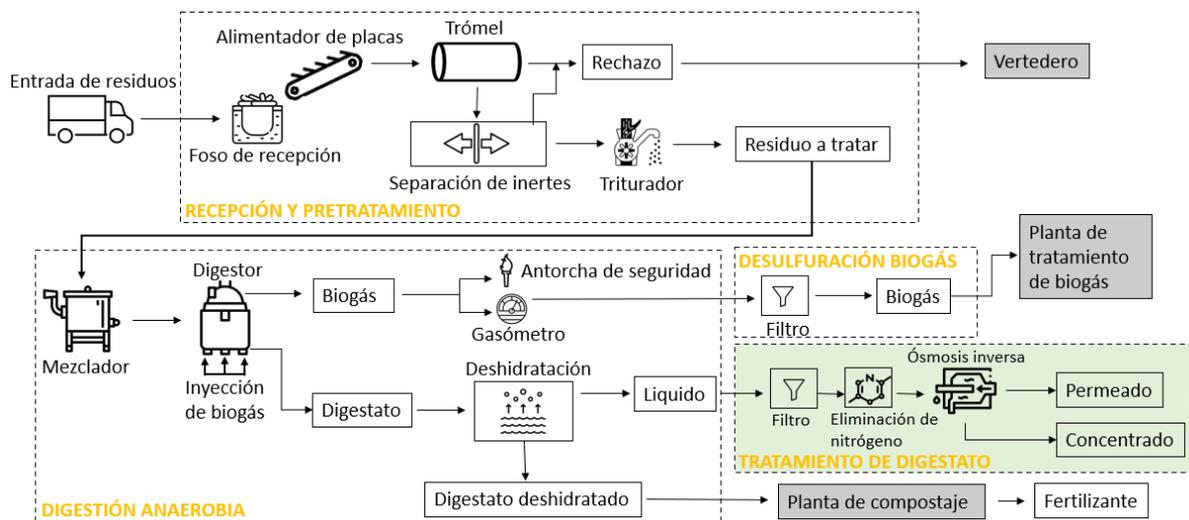


Ilustración - Esquema de la planta y del modelo operativo.

4. Results

The following results have been successfully achieved with the elaboration of this Master's thesis project:

- Precise elaboration of the composition of the waste generated at big points of sale and analysis of the waste from all points of sale, especially those located in the region of Andalucía.
- Analysis of the transport used to move waste from the point where it is generated to the treatment plant.
- Modeling of the anaerobic digestion process in SIMAPRO in both Cut Off and APOS versions. Subsequently, a comparison is made between the two and it is decided to work with the Cut Off version as it is the most convenient one.

- Obtaining the environmental impact of the anaerobic digestion process by dividing the impact between biogas and digestate thanks to the allocation of loads by economic criteria carried out. Study of the environmental impact in the region of Andalucía.
- Modeling of the digestate dehydration process in SIMAPRO, a process by which the digestate is divided between its liquid and solid fractions.
- Analysis of the digestate obtained at the exit of each process to determine its composition and verify that it can be used as fertilizer according to Spanish regulations.
- Comparison between the fertilizer generated from the dry digestate obtained in the project and an inorganic NPK fertilizer. It is obtained that thanks to the organic fertilizer obtained in this project, 57.26 tons of inorganic fertilizer can be replaced annually in the region of Andalucía alone.
- Obtaining the total environmental impact of the life cycle of the dry digestate (ready to be used as fertilizer) and comparison with the environmental impact of the inorganic fertilizer NPK 15-15-15 in the region of Andalusia. An annual saving of 55.59 tons of CO₂ is calculated, which is 73% less than the CO₂ emissions produced by the NPK .

5. Conclusions

With the development of this project it has been possible to analyze the environmental impact of the life cycle of the fertilizer from the digestate generated with the residue of fruits and vegetables from the national markets, and specifically from the Andalusian markets. It has been shown that this practice would save thousands of tons of inorganic fertilizers annually, which have a much greater environmental impact. In addition, it is possible to revalue a product that had lost all its value and was considered as waste, to generate this fertilizer and biogas.

This project evaluates and quantifies the environmental savings of this practice and models the complete process, from obtaining it, the composition of the waste, the modeling of the processes and the analysis of the products generated in each process, to the comparison with a generic fertilizer and the obtaining of results. Since the Life Cycle Analysis methodology has been followed, all the steps carried out have been described in the project so that it can be easily reproduced or modified.

Finally, it should be noted that this project is in line with the objectives set by the European Union to reduce waste and promote the circular economy. In addition to being aligned with many SDGs (Sustainable Development Goals) which demonstrates its important contribution to sustainability.

6. References

- [1] Secretaría de Estado de Energía. Hoja de ruta del biogás. Marzo 2022:
https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Documents/00HR_Biogas_V6.pdf
- [2] Dirección General de Recursos Agrícolas y Ganaderos. EL SECTOR DEL BIOGÁS AGROINDUSTRIAL EN ESPAÑA. Septiembre 2020:

https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/requisitos-y-condicionantes-de-la-produccion-ganadera/DOCBIOGASVersion21-09-2010_tcm30-110139.pdf

- [3] INE (Instituto Nacional de Estadística) Cantidad de residuos generados por actividad económica (CNAE-2009), clase de residuo y tipo de peligrosidad:
<https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?tpx=30628>
- [4] The Global Goals. THE 17 GOALS. <https://www.globalgoals.org/goals/>
- [5] SG de Medios de Producción Agrícolas y Oficina Española de Variedades Vegetales. Legislación de los productos fertilizantes. 2021:
https://www.mapa.gob.es/images/ca/ponencia-3_tcm34-622550.pdf
- [6] HTN Biogás, S.L. Dossier de Prensa HTN.pdf.
- [7] Planta de tratamiento de biogás Valdemingomez - Ayuntamiento de Madrid.
Personal del centro.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	8
1.1 Motivación del proyecto.....	8
1.2 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	12
Capítulo 2. Estado de la Cuestión	15
Capítulo 3. Descripción de las Tecnologías.....	18
3.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	18
3.2 SIMAPRO	20
Capítulo 4. Definición del Trabajo	22
4.1 Justificación.....	22
4.2 Objetivos	26
Capítulo 5. Definición del Modelo	28
5.1 Unidad de Recepción y Pretratamiento	29
5.2 Unidad de Digestión Anaerobia.....	30
5.3 Unidad de Desulfuración de Biogás.....	33
5.4 Unidad de Tratamiento de Digestato.	34
Capítulo 6. Inventario de Datos	36
6.1 Datos relacionados con los residuos a emplear.	36
6.1.1 Datos de residuos obtenidos de los puntos de venta estudiados.	36
6.1.2 Datos de los mercados localizados en Andalucía	39
6.1.3 Análisis y distribución del residuo	39
6.2 Análisis del transporte.....	45
6.3 Modelado del proceso de digestión anaerobia.....	47
6.4 Asignación de cargas en el proceso de Digestión Anaerobia.....	53
6.5 Modelado del proceso de deshidratación.	56
6.5.1 Elección de la tecnología del proceso a modelar.....	56
6.5.2 Modelado del proceso de Deshidratación en SIMAPRO.	60
Capítulo 7. Resultados.....	65
7.1 Impacto ambiental del proceso de digestión anaerobia.....	65

7.1.1	<i>Impacto Ambiental del proceso de digestión anaerobia – Caso específico Andalucía..</i>	67
7.1.2	<i>Comparación del proceso de digestión anaerobia, Cut-Off vs APOS.....</i>	69
7.2	<i>Análisis del Digestato Obtenido.....</i>	72
7.2.1	<i>Análisis del digestato obtenido a la salida del digestor.....</i>	72
7.2.2	<i>Análisis del digestato obtenido tras el proceso de deshidratación.</i>	75
7.2.3	<i>Análisis del digestato disponible en la región de estudio-Andalucía.....</i>	76
7.3	<i>Comparación con Fertilizante Inorgánico NPK.</i>	77
7.3.1	<i>Cálculo del digestato necesario para la sustitución.....</i>	78
7.3.2	<i>Comparación del impacto ambiental de ambos fertilizantes.</i>	82
7.3.3	<i>Análisis del impacto en el sector agrario de Andalucía.....</i>	84
Capítulo 8.	<i>Conclusiones.....</i>	89
Capítulo 9.	<i>Bibliografía.....</i>	93

Índice de figuras

Ilustración 1. Equivalencia del Biogás con otras fuentes de energía. (CIEMAT).....	10
Ilustración 2. Producción agrícola española en millones de euros en 2021. (Statista).....	11
Ilustración 3. Objetivos de Desarrollo Sostenible, Naciones Unidas.	14
Ilustración 4. Principales usos para la transformación y utilización del biogás y del digestato. (Schön, 2009)	25
Ilustración 5. Esquema de la planta y del modelo de producción.	28
Ilustración 6. Esquema de la Unidad de Recepción y Pretratamiento.	29
Ilustración 7. Esquema de la Unidad de Digestión Anaerobia.	31
Ilustración 8. Esquema de la Unidad de Desulfuración de Biogás.....	33
Ilustración 9. Esquema de la Unidad de Tratamiento de Digestato.....	34
Ilustración 10. Toma de datos de la página web Mercamadrid.	41
Ilustración 11. Ejemplo de cálculo del % de cada producto sobre el residuo final.	43
Ilustración 12. Características de camión bañera.	46
Ilustración 13. Entradas del proceso sin modificar.	48
Ilustración 14. Producto creado en SIMAPRO: Residuo de fruta y verdura.....	50
Ilustración 15. Localización del producto "Residuo de Fruta y Verdura"	50
Ilustración 16. Salidas del proceso de digestión anaerobia en SIMAPRO.....	52
Ilustración 17. Representación del funcionamiento de una prensa de tornillo. (Fuchs and Drog, 2010).....	57
Ilustración 18. Representación del funcionamiento de una centrifugadora decantadora. (Fuchs and Drog, 2010)	58
Ilustración 19. Representación del funcionamiento de una prensa de cinta. (Fuchs and Drog, 2010).....	59
Ilustración 20. Proceso de deshidratación modelado en SIMAPRO.	64
Ilustración 21. Análisis del proceso de digestión anaerobia en SIMAPRO.	66
Ilustración 22. Distribución de cargas.	67
<i>Ilustración 23. Comparativa entre proceso Cut Off y APOS.....</i>	<i>70</i>
Ilustración 24. Esquema representativo del digestato en Andalucía.	77

Ilustración 25. Proceso para realizar la comparación del impacto ambiental en SIMAPRO.
..... 83

Ilustración 26. Grafica comparativa entre el digestato deshidratado y el fertilizante NPK. 84

Ilustración 27. Modelado del análisis de impacto ambiental generado en Andalucía..... 86

Índice de tablas

Tabla 1. Residuos generados (ton/año) en los grandes mercados nacionales.	23
Tabla 2. Residuos generados (ton kg/año) en los grandes mercados nacionales.	37
Tabla 3. Residuos generados (ton kg/año) en los grandes mercados de Andalucía.	39
Tabla 4. Productos más consumidos en España de cada categoría.	40
Tabla 5. Distribución de frutas vendidas en Mercamadrid.	42
Tabla 6. Distribución de verduras vendidas en Mercamadrid.	42
Tabla 7. Distribución de tubérculos vendidos en Mercamadrid.	43
Tabla 8. Composición genérica del residuo.	43
Tabla 9. Composición del residuo final. Categoría Frutas.	44
Tabla 10. Composición del residuo final. Categoría Verduras.	44
Tabla 11. Composición del residuo final. Categoría Tubérculos.	45
Tabla 12. Distancia recorrida por los residuos.	45
Tabla 13. Capacidad de carga del camión bañera.	47
Tabla 14. Entradas de energía y calor.	51
Tabla 15. Composición del digestato generado en la digestión anaerobia.	53
Tabla 16. Asignación de cargas según criterio másico.	54
Tabla 17. Asignación de cargas según criterio económico.	55
Tabla 18. Ventajas y desventajas de la prensa de tornillo para el proceso de deshidratación.	57
Tabla 19. Ventajas y desventajas de la centrifugadora decantadora para el proceso de deshidratación.	58
Tabla 20. Ventajas y desventajas de la prensa de cinta para el proceso de deshidratación.	59
Tabla 21. Comparación entre las tecnologías disponibles.	60
Tabla 22. Consumo energético de las tecnologías estudiadas para el proceso de deshidratación.	62
Tabla 23. Emisiones generadas en el proceso de deshidratación.	63

Tabla 24. Resultados impacto ambiental proceso digestión anaerobia, Cut-off.	66
Tabla 25. Datos de residuos generados en los mercados de Andalucía.	67
Tabla 26. Resultados impacto ambiental anual del proceso digestión anaerobia en Andalucía.	68
Tabla 27. Resultados impacto ambiental proceso digestión anaerobia, APOS.	69
Tabla 28. Comparación impacto proceso digestión anaerobia, APOS vs Cut-Off.	70
Tabla 29. Comparación entre procesos y diferencia porcentual.	71
Tabla 30. Comparación: Digestato Obtenido/Límites Digestato Deseado.	74
Tabla 31. Composición del Digestato Seco a la salida del proceso de deshidratación.	76
Tabla 32. Comparación de N, K, P en cada etapa(* realmente estos valores corresponden a P ₂ O ₅ , y K ₂ O).....	79
Tabla 33. Comparación de N, K, P en cada etapa tras el ajuste con los factores.	80
Tabla 34. Kilogramos de digestato necesarios en cada etapa del proceso.	81
Tabla 35. Comparación del impacto ambiental entre el digestato deshidratado y el fertilizante NPK.	83
Tabla 36. Ahorro del impacto ambiental anual en Andalucía.	87
Tabla 37. Ahorro de emisiones anuales de CO ₂ en Andalucía,	87

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Cálculo para la asignación de carga al transporte del residuo.	49
Ecuación 2. Kg necesarios de residuo para generar 1m ³ de biogás.	51
Ecuación 3. Digestato necesario a la entrada del proceso de deshidratación.	61
Ecuación 4. Consumo energético de la centrifugadora (por kg digestato seco).	63
Ecuación 5. Biogás anual generado a partir del residuo de Andalucía.	68
Ecuación 6. Digestato anual generado a partir del residuo de Andalucía.	68
Ecuación 7. Diferencia porcentual entre procesos.	71
Ecuación 8. Cálculo del factor para la conversión del fósforo puro en P ₂ O ₅	79
Ecuación 9. Cálculo del factor para la conversión del potasio puro en K ₂ O.	79
Ecuación 10. Kg de digestato a la salida del centrifugador para 150g de N.	80
Ecuación 11. Kg de digestato a la salida del centrifugador para 150g de K ₂ O.	80
Ecuación 12. Kg de digestato a la salida del centrifugador para 150g de P ₂ O ₅	80
Ecuación 13. Kg de digestato a la salida del digestor para 150g de N.	80
Ecuación 14. Kg de digestato a la salida del digestor para 150g de K ₂ O.	80
Ecuación 15. Kg de digestato a la salida del digestor para 150g de P ₂ O ₅	81
Ecuación 16. Kg de digestato necesarios para sustituir 1kg de fertilizante NPK según unidades de fertilizante.	82
Ecuación 17. Ahorro de fertilizante inorgánico NPK 15-15-15 (ton/año).	85
Ecuación 18. Toneladas de aceitunas cultivadas con fertilizante orgánico.	85
Ecuación 19. Emisiones anuales de CO ₂ generadas por un coche de gasolina.	87
Ecuación 20. Ahorro de emisiones en coches.	88

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Este Trabajo de Fin de Máster se realiza dentro del departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI) con la intención y el ánimo de que sea beneficioso para todas sus partes. El proyecto se presenta bajo el título “EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL DEL APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE RESIDUOS PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN EL SECTOR AGROALIMENTARIO ESPAÑOL”, es realizado por el estudiante de 2º MII Ignacio Álvaro Mancha y supervisado por los profesores Carlos Morales Polo y Carlos Martín Sastre.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

En los últimos años, la gestión adecuada de los residuos se ha convertido en un tema de gran importancia en todo el mundo. La Unión Europea ha establecido objetivos ambiciosos para reducir los residuos y fomentar la economía circular. En este contexto, el sector agroalimentario español es uno de los principales generadores de residuos en el país. Por lo tanto, se ha vuelto esencial evaluar las posibilidades de aprovechamiento integral de los residuos de este sector para la generación de energía, a fin de reducir su impacto ambiental y mejorar la sostenibilidad de la industria. En este proyecto se pondrá el foco y se estudiarán los residuos agroalimentarios, obtenidos de los sobrantes de los principales puntos de venta de fruta y verdura de España, estos puntos de venta generan más de 89 Millones de kilos de residuos al año. (Fuente INE – datos 2020)

Este trabajo se centra en la evaluación medioambiental del aprovechamiento integral de residuos para la generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia y el posterior estudio del residuo generado durante este proceso, el digestato. El objetivo principal es analizar los impactos ambientales asociados a esta estrategia de gestión de residuos y comprobar el potencial y viabilidad medioambiental del proceso de aprovechamiento integral de residuos para la generación de biogás. Además, se estudiarán,

comparándolos entre ellos y con la situación actual, distintos escenarios, y se comparará el impacto ambiental del uso del digestato obtenido en este proceso como fertilizante, con el impacto ambiental de un fertilizante genérico.

El biogás se genera a partir de residuos orgánicos mediante la digestión anaerobia, lo que permite un uso eficiente y sostenible de los residuos en la economía circular, especialmente en el ámbito agroalimentario y de residuos municipales. Al valorizar los residuos para la producción de biogás, se obtienen beneficios adicionales como la valorización energética de los residuos y el uso del digestato como fertilizante, evitando emisiones de metano y dióxido de carbono a la atmósfera y mejorando la gestión de residuos.

El biogás, es una parte importante de la solución para alcanzar la neutralidad climática en 2050 y lograr los objetivos de reducción de emisiones y de penetración de energías renovables propuestos para España en 2030. Además, su uso contribuye a políticas transversales del Gobierno de España, como el desarrollo de la Economía Circular, el Reto Demográfico y la Transición Energética Justa e Inclusiva, generando sinergias relevantes entre todas ellas. Su introducción en el mix energético es esencial para cumplir los objetivos en materia de descarbonización, facilitar una mayor independencia energética y avanzar en la economía circular convirtiendo los residuos en una fuente de energía.

La composición del biogás varía según el material orgánico utilizado y según su proceso de digestión. Por lo general contiene altas concentraciones de metano, lo que le confiere un alto poder calorífico (5.750 kcal/m³). Estas características hacen que el biogás sea ideal para su uso en motores de cogeneración, calderas, turbinas y también como biocombustible. Esto ofrece una alternativa sostenible a combustibles fósiles.

Para tener una idea aproximada, el gas natural tiene un contenido de metano del 100% mientras que el biogás contiene un 65%. Por lo tanto, se puede decir que 1 m³ de biogás equivale a aproximadamente 0,65 m³ de gas natural. Además, se necesita aproximadamente 1 m³ de metano para generar 10 kWh de energía total. Si consideramos que el rendimiento

eléctrico de un motor es del 40-45%, podemos concluir que 1 m³ de biogás puede producir hasta 2,8 kWh de energía eléctrica renovable.

En resumen, el biogás dispone de un gran potencial energético y es capaz de sustituir a fuentes actuales. En la siguiente ilustración se detalla la equivalencia energética entre el biogás y las principales fuentes de energía que se emplean en la actualidad.

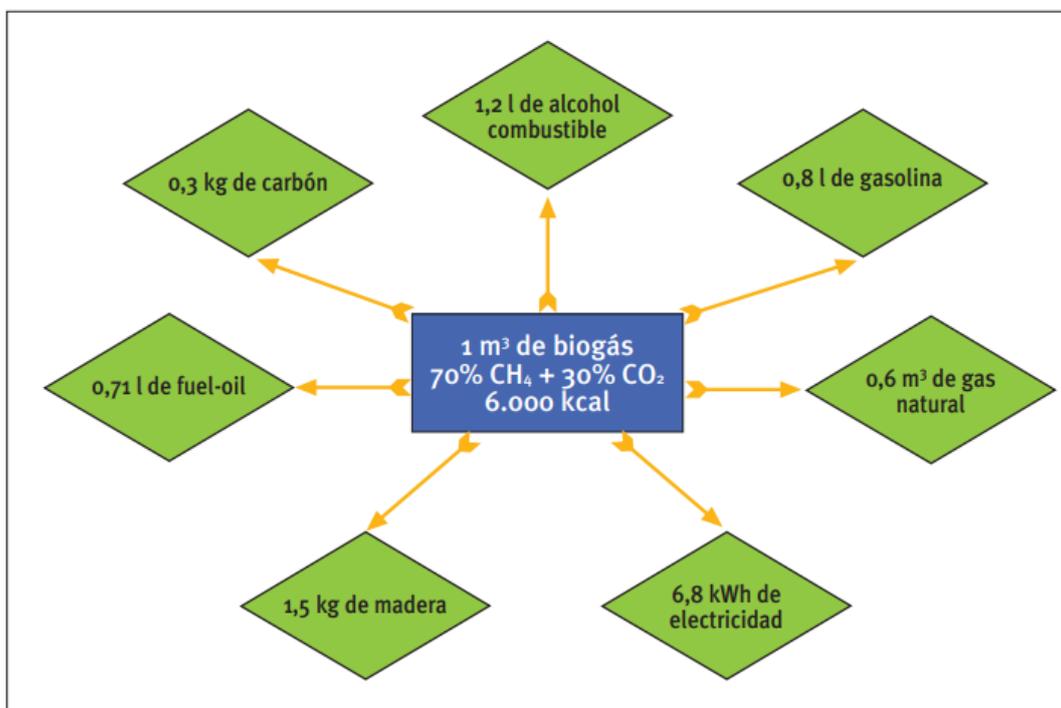


Ilustración 1. Equivalencia del Biogás con otras fuentes de energía. (CIEMAT)

España tiene una gran oportunidad para aprovechar el potencial del biogás en el sector agroalimentario y de la gestión de residuos, gracias al tamaño de su industria agroalimentaria.

En este proyecto se analizará el impacto ambiental de la generación de biogás y digestato a partir de residuos de fruta y verdura generados en los grandes mercados nacionales. Adicionalmente se realizará un estudio detallado del impacto específico de los mercados localizados en Andalucía. Esto se debe a que Andalucía es la comunidad autónoma con mayor actividad agrícola del país, y una de las regiones más importantes de producción

agraria a nivel europeo. En la siguiente gráfica se muestra la producción agrícola en millones de euros del año 2021 en España.

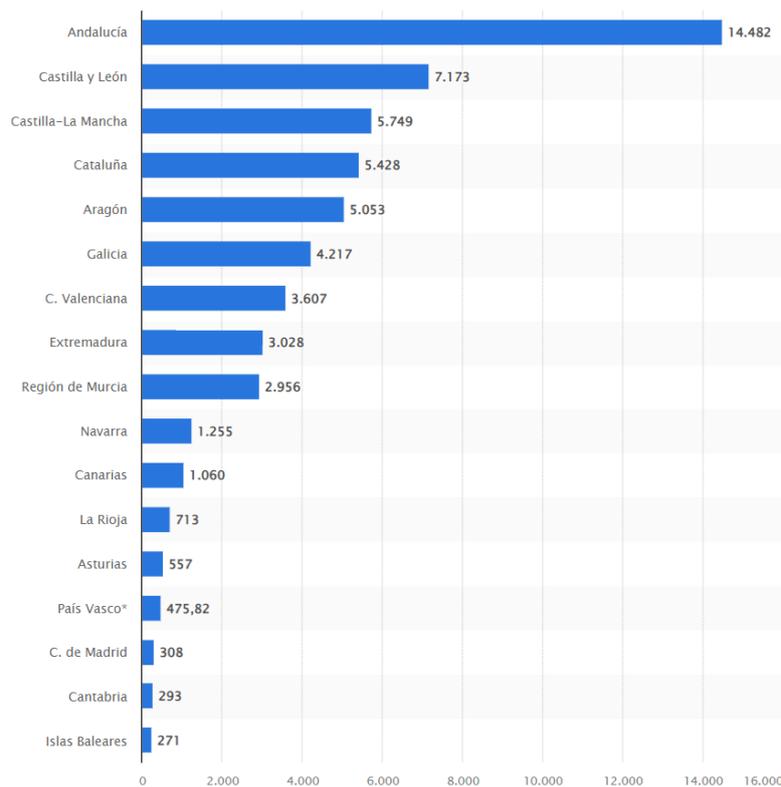


Ilustración 2. Producción agrícola española en millones de euros en 2021. (Statista)

Debido a que Andalucía tiene un volumen tan elevado en este sector, se sobreentiende que es también la región con mayor consumo de fertilizante. Por ello se decide analizar el impacto en esta zona, ya que, el fertilizante fabricado con el digestato obtenido del proceso de digestión anaerobia podrá ser utilizado en su totalidad en la misma región que se produce, minimizando así el impacto generado por el desplazamiento de la mercancía y fomentando el comercio de proximidad.

Por último, este TFM está orientado a potenciar el desarrollo de la economía circular, favoreciendo la gestión de biorresiduos, y su integración con la generación de energía renovable. Esto hace que tenga un impacto directo en mejorar el nivel de vida de la sociedad y en la reducción de la contaminación del medio ambiente.

1.2 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son una serie de metas globales establecidas por las Naciones Unidas para abordar los desafíos sociales, económicos y ambientales más apremiantes que enfrenta nuestro mundo. Fueron adoptados en 2015 como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, un plan de acción integral para promover la prosperidad, proteger el planeta y garantizar el bienestar de las personas.

Los ODS constan de 17 objetivos interconectados que abarcan una amplia gama de temas, como la erradicación de la pobreza, el acceso a la educación de calidad, la igualdad de género, la acción por el clima, la conservación de los océanos y la protección de la biodiversidad. Cada objetivo tiene metas específicas y un conjunto de indicadores para monitorear su progreso.

El enfoque de los ODS es integrador, reconociendo que los desafíos globales están interrelacionados y requieren soluciones holísticas. Además, los ODS buscan garantizar que nadie quede rezagado, fomentando la inclusión y la participación de todas las personas, independientemente de su género, edad, origen étnico o situación económica.

Los ODS son una guía para que los gobiernos, las organizaciones internacionales, el sector privado, la sociedad civil y las personas trabajen juntas para lograr un desarrollo sostenible en todo el mundo. También fomentan la colaboración y la asociación global para movilizar los recursos necesarios y compartir conocimientos y buenas prácticas.

Este trabajo de fin de máster se alinea directamente con varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas. Entre ellos cabe destacar su relación directa con los siguientes:

- En primer lugar, el proyecto contribuye directamente al **ODS número 7**: Energía asequible y no contaminante, ya que se propone la generación de energía a partir de residuos del sector agroalimentario. Esta fuente de energía renovable contribuye a la reducción del uso de combustibles fósiles y, por tanto, disminuye la huella de carbono del sector.
- Asimismo, el proyecto también se alinea con el **ODS número 12**: Producción y consumo responsables, al fomentar el aprovechamiento integral de los residuos generados en los mercados. La reducción y gestión adecuada de estos residuos es un paso importante para lograr un sistema más sostenible y circular, y contribuye a reducir la contaminación y la generación de gases de efecto invernadero.
- Además, el trabajo también se relaciona con el **ODS número 13**: Acción por el clima, al contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. La generación de energía renovable a partir de biogás generado con residuos puede ser una medida eficaz para mitigar el cambio climático y fomentar la adaptación a sus efectos.
- Por último, el proyecto también se relaciona con el **ODS número 15**: Vida de ecosistemas terrestres, al fomentar la gestión adecuada de los residuos generados en el sector agroalimentario. La reducción de la cantidad de residuos que se envían a los vertederos y su transformación en una fuente de energía renovable contribuyen a proteger los ecosistemas terrestres y a conservar los recursos naturales.



Ilustración 3. Objetivos de Desarrollo Sostenible, Naciones Unidas.

En resumen, la evaluación medioambiental del aprovechamiento integral de residuos para generación de energía en el sector agroalimentario español se alinea con varios de los ODS de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, lo que demuestra su importante contribución a la sostenibilidad.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Actualmente se emplean diversas alternativas, como la producción de biogás, la generación de energía eléctrica a partir de biomasa y la cogeneración; para aprovechar los residuos derivados de la industria agroalimentaria. En este proyecto se estudiará la producción de biogás a través de la digestión anaerobia y el residuo generado en este proceso, el digestato.

En los últimos años, se han llevado a cabo diversos estudios y proyectos relacionados con la evaluación medioambiental del aprovechamiento integral de residuos para la generación de biogás a partir de residuos vegetales. Estas investigaciones han explorado tanto los aspectos técnicos como los impactos ambientales asociados con esta tecnología.

Desde el punto de vista técnico, se han realizado avances significativos en el desarrollo de procesos eficientes de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de residuos agroalimentarios. Estos avances incluyen mejoras en la selección de sustratos, la optimización de las condiciones de digestión, la gestión de la carga orgánica y la maximización de la producción de metano. Además, se han investigado diferentes configuraciones de reactores y sistemas de pretratamiento para mejorar la eficiencia global del proceso.

La digestión anaerobia que se describirá de forma más detallada en el *Capítulo 5* de este proyecto, es un proceso biológico que se utiliza para descomponer la materia orgánica presente en los residuos y producir biogás. Este proceso se lleva a cabo en un ambiente sin oxígeno, donde las bacterias anaerobias descomponen los residuos y los convierten en biogás, que se compone principalmente de metano y dióxido de carbono. La digestión anaerobia es una forma de aprovechar los residuos orgánicos para producir energía renovable y reducir la cantidad de residuos que se envían a vertederos.

El digestato es el residuo sólido y líquido que se produce durante el proceso de digestión anaerobia. El digestato es rico en nutrientes, como nitrógeno, fósforo y potasio, y se puede

utilizar como fertilizante orgánico en la agricultura. Además, el digestato tiene un bajo contenido de patógenos y es más fácil de manejar y almacenar que los residuos orgánicos sin tratar. Por lo tanto, la digestión anaerobia no solo ayuda a producir energía renovable, sino que también permite la recuperación de nutrientes y la reducción de los impactos ambientales asociados con la gestión de los residuos orgánicos.

Actualmente existen diversas técnicas de digestión anaerobia que permiten convertir los residuos agroindustriales en energía renovable a través del biogás, por ello, es considerado una de las opciones más sostenibles de tratamiento de residuos. En España, se estima que la industria agroalimentaria genera aproximadamente 49,7 millones de toneladas de residuos/productos sobrantes al año, los cuales podrían ser utilizados para producir hasta 2.600 millones de m³ de biogás anualmente. Esto equivale al 4,2% de la producción anual de gas natural, según lo indica el proyecto Probiogás (Proyecto promovido y financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España)

El biogás obtenido por medio de la digestión anaerobia es rico en metano, lo que lo hace ideal para ser empleado como combustible en calderas y motores de cogeneración, y generar energía eléctrica y térmica. Además, después de un proceso de purificación, se puede obtener biometano con propiedades similares al gas natural, el cual incluso puede ser usado como combustible para vehículos.

Según el Registro administrativo de instalaciones de producción de energía eléctrica (PRETOR) del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, en España hay actualmente 146 instalaciones destinadas a la producción de biogás, de las cuales 130 informaron de su consumo en 2020. Estas plantas produjeron aproximadamente 2,74 TWh de biogás durante el mismo período. En cuanto a las aplicaciones de las 130 plantas mencionadas, solo 13 de ellas están relacionadas con el comercio y los servicios, según su Clasificación Nacional de Actividades Económicas. Los residuos estudiados en este proyecto son tratados en estas plantas y se evaluará si el impacto medioambiental que tienen hace rentable la apuesta en ellas.

Los residuos que se estudiarán en este trabajo son los residuos orgánicos de frutas y hortalizas que se producen en los 24 grandes mercados de alimentación de España (en este proyecto se tienen datos de 22 de los 24 puntos de venta).

Los puntos de venta estudiados funcionan como centros mayoristas donde se comercializan diversos productos, principalmente alimentos frescos, como frutas, verduras, pescados, carnes y lácteos, entre otros. Estos puntos de venta suelen ser grandes instalaciones ubicadas estratégicamente en diferentes localidades, con el objetivo de abastecer a comercios minoristas, restaurantes, hoteles y otros establecimientos del sector de la alimentación.

En los puntos de venta estudiados, los productos se reciben directamente de los proveedores, quienes los entregan en grandes cantidades. Estos productos son luego clasificados, almacenados y exhibidos en las diferentes áreas del mercado. Los clientes, que son mayoristas, acuden a estos puntos de venta para realizar sus compras al por mayor, aprovechando los precios competitivos y la amplia variedad de productos disponibles.

Además de la comercialización de productos, estos puntos de venta también cuentan con servicios adicionales, como cámaras de refrigeración para garantizar la conservación adecuada de los alimentos, áreas de carga y descarga, y en algunos casos, servicios logísticos para facilitar el transporte y la distribución de los productos adquiridos.

Estos mercados, generan un valor de 16.200 millones de euros anuales, que representan aproximadamente un 1,4% del PIB nacional, y comercializan anualmente 8,4 millones de toneladas de verduras, frutas, carnes, mariscos, pescados y otros productos. De estos productos alimentarios la unión de fruta y verdura representa un 62% del volumen en cuanto a kilos comercializados, siendo así, el área más grande. Los residuos producidos por estos productos representan en torno a un 25% del total de los residuos generados en estos Mercados Alimentarios (hay que tener en cuenta que en este dato también entran el resto de los residuos orgánicos, así como los residuos no orgánicos).

Capítulo 3. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

3.1 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta utilizada para evaluar el impacto ambiental de un producto, servicio, proceso o actividad a lo largo de su ciclo de vida completo, desde la extracción de los recursos naturales necesarios para su fabricación, pasando por su producción, distribución, uso y disposición final.

El ACV permite identificar y cuantificar los impactos ambientales asociados con cada etapa del ciclo de vida, incluyendo el consumo de energía, las emisiones de gases de efecto invernadero, la generación de residuos, el uso de agua y otros recursos naturales, así como los posibles efectos sobre la salud humana y el medio ambiente.

El proceso de ACV generalmente se divide en cuatro etapas principales: definición de objetivos y alcance, inventario de datos, evaluación de impacto e interpretación de resultados:

1. **Definición del modelo, objetivos y alcance:** En esta etapa se establecen los objetivos del ACV y se define el alcance del estudio/proyecto. Se determina qué aspectos del ciclo de vida serán considerados, se describe el modelo y se determinan los límites del sistema.
2. **Inventario de datos:** En esta etapa se recopilan y cuantifican los datos relacionados con las entradas y salidas de cada etapa del ciclo de vida. Se identifican y cuantifican los recursos consumidos, las emisiones generadas y los residuos producidos en cada etapa del ACV. Estos datos se utilizan luego en la etapa de evaluación de impacto, donde se aplican modelos y métodos para evaluar los efectos ambientales.

3. Evaluación del impacto: En esta etapa se evalúa el impacto ambiental de los flujos previamente identificados en el inventario de datos. Se utilizan métodos y modelos específicos para traducir los datos del inventario en indicadores de impacto ambiental, como el consumo de energía, la emisión de gases de efecto invernadero, la acidificación y la eutrofización, entre otros.
4. Interpretación de resultados: En esta etapa se interpretan los resultados de la evaluación del impacto y se consideran factores adicionales, como las incertidumbres y los aspectos sociales y económicos relacionados con el ACV. Se realizan comparaciones, se identifican oportunidades de mejora y se formulan conclusiones basadas en los hallazgos del análisis.

Los resultados del ACV pueden ser utilizados para tomar decisiones respaldadas por datos en el diseño de productos, la selección de materiales y procesos más sostenibles, así como para comparar alternativas e identificar áreas de mejora. El ACV también puede ser utilizado para la certificación y etiquetado ambiental de productos, y para informar a los consumidores sobre el desempeño ambiental de los productos que adquieren.

En resumen, el Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta que permite evaluar y cuantificar el impacto ambiental de un producto o servicio a lo largo de todas sus etapas, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones más sostenibles y la mejora continua de los procesos y productos. En este proyecto se realizará el ACV para determinar el impacto ambiental de la producción de biogás a partir de residuos agroalimentarios.

3.2 SIMAPRO

SIMAPRO es una herramienta de software ampliamente utilizada para llevar a cabo el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de productos y procesos. Fue desarrollada por la empresa PRÉ Consultants y se ha convertido en una de las aplicaciones más populares en el campo de la evaluación del ACV.

La principal función de SIMAPRO es facilitar la realización del ACV a través de un enfoque sistemático. Proporciona una interfaz de usuario intuitiva y herramientas poderosas para recopilar datos, realizar cálculos y evaluar los impactos ambientales asociados con un producto o servicio a lo largo de todas sus etapas.

SIMAPRO permite a los usuarios construir modelos de ciclo de vida completos, donde se definen las diferentes etapas, como la extracción de materias primas, la fabricación, el transporte, el uso y la disposición final. La herramienta ofrece una amplia base de datos integrada que contiene información sobre el inventario de recursos y las emisiones asociadas con una amplia variedad de procesos y materiales. En el caso de no existir el proceso o producto deseado, la herramienta ofrece al usuario la posibilidad de crearlo de 0 o a partir de alguno de los disponibles. Esto es de gran utilidad para este proyecto ya que permite crear el mix deseado de residuo a tratar.

Además, SIMAPRO facilita la selección de métodos de evaluación de impacto ambiental y el cálculo de indicadores de desempeño ambiental, como las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo de energía, la generación de residuos y el agotamiento de recursos naturales. Estos resultados se pueden visualizar en forma de gráficos y tablas, lo que permite una interpretación más clara y una comparación de diferentes escenarios.

SIMAPRO también se utiliza para llevar a cabo estudios de sensibilidad y escenarios, lo que permite evaluar el impacto de diferentes variables y tomar decisiones más informadas en la mejora del rendimiento ambiental de los productos.

Este proyecto se realizará con la ayuda de la herramienta SIMAPRO, con la cual se realizará el Análisis de Ciclo de Vida de todo el proceso. En esta herramienta se recopilarán datos, se realizarán cálculos y se evaluarán los impactos ambientales de los procesos, lo que ayudará a tomar las decisiones más sostenibles y analizar el desempeño ambiental.

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 JUSTIFICACIÓN

La gestión integral de residuos agroalimentarios provenientes de los principales puntos de venta nacionales es un tema de gran relevancia y actualidad debido a la creciente preocupación por la gestión sostenible de los residuos. Si a esto se le añade la necesidad de diversificar la matriz energética hacia fuentes renovables, hace que la elaboración de este proyecto este justificada y sea de gran interés.

En primer lugar, España se enfrenta a un desafío significativo en cuanto a la gestión de residuos, ya que genera una gran cantidad de desechos vegetales provenientes de diversas fuentes, como la agricultura, la industria alimentaria y los puntos de venta ya mencionados. Estos residuos, centrándose este trabajo en los vegetales (fruta y verdura), si no se gestionan adecuadamente, pueden tener un impacto negativo en el medio ambiente, incluyendo la contaminación del suelo y del agua, la emisión de gases de efecto invernadero y la degradación de los ecosistemas naturales. Por lo tanto, es crucial explorar alternativas sostenibles para su gestión y aprovechamiento. En la siguiente tabla se muestran los datos de residuos generados por los grandes mercados nacionales:

LOCALIZACIÓN	TOTAL RESIDUOS GENERADOS ton/año	APROVECHABLE ORGÁNICO CORRECTAMENTE SEPARADO ton/año	% SOBRE EL TOTAL
Valencia 1	2774,70	138,74	5%
Asturias	859,80	128,97	15%
Extremadura	54,97	6,05	11%
Cataluña	23551,45	5770,11	25%
País Vasco	3039,00	372,28	12%
Andalucía 1	738,92	73,89	10%
Galicia	345,60	57,02	17%
Andalucía 2	1597,20	119,79	8%
Navarra	379,50	47,44	13%
Andalucía 3	451,70	49,69	11%
Canarias 1	2190,90	536,77	25%
Castilla y León 1	245,70	51,60	21%
Madrid	29553,50	7388,38	25%
Andalucía 4	2705,00	324,60	12%
Murcia	1271,00	311,40	25%
Baleares	2702,10	553,93	21%
Castilla y León 2	504,30	105,90	21%
Cantabria	348,00	76,56	22%
Andalucía 5	3524,75	863,56	25%
Canarias 2	1182,00	183,21	16%
Valencia 2	3330,00	549,45	17%
Castilla y León 3	2039,00	499,56	25%
TOTAL	83389,09	18208,87	22%

Tabla 1. Residuos generados (ton/año) en los grandes mercados nacionales.

La tabla divide los datos de los residuos generados en los grandes puntos de venta de alimentos nacionales en dos columnas, la primera el total de residuos generados, y la segunda, los residuos de fruta y verdura separados del resto. Adicionalmente, se muestra en la última columna el porcentaje sobre el total de los residuos a estudiar en este proyecto. Podemos observar que la media está en torno al 20% de los residuos totales que se generan en estos puntos de venta, lo que supone un total de 18.208,87 ton/año de frutas y verduras que se desechan.

En segundo lugar, la generación de biogás a partir de residuos vegetales ofrece numerosos beneficios ambientales y energéticos. El biogás es una fuente de energía renovable que puede reemplazar los combustibles fósiles en sectores como la generación de electricidad, la calefacción y el transporte. Al utilizar residuos vegetales como materia prima, se reduce la dependencia de los combustibles fósiles y se analizará la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero que se evitan, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático y al cumplimiento de los compromisos internacionales de reducción de emisiones. En la *Ilustración 3*, se pueden observar las principales opciones para la utilización del biogás.

Con esta alternativa de gestión de residuos, se evitaría el transporte de los residuos a los vertederos y las emisiones que esto conlleva, y la emisión de metano a la atmósfera que se genera por la descomposición de estos residuos de fruta y verdura.

Además, la evaluación medioambiental del aprovechamiento integral de residuos es importante para informar y respaldar la toma de decisiones a nivel político y empresarial. La obtención de datos concretos sobre los impactos ambientales de esta tecnología permitirá identificar áreas de mejora, diseñar políticas y estrategias más efectivas y fomentar la implementación de proyectos de biogás a nivel nacional y regional. Asimismo, proporcionará información valiosa para las empresas que deseen invertir en esta tecnología, ayudándoles a evaluar su viabilidad económica y ambiental.

La segunda parte de este proyecto se centra en la gestión del digestato. El digestato como ya se ha explicado previamente es el residuo que se produce en el digestor tras el proceso de digestión anaerobia. En este proyecto se analiza el impacto medioambiental que tiene el procesado de este digestato para poder lograr el producto final: fertilizante. El uso de este residuo que se produce durante la obtención de biogás como materia prima para la fabricación de fertilizante tiene muchas ventajas que se explican en los siguientes párrafos.

En primer lugar, el digestato es un subproducto que cumple con las características básicas para poder ser utilizado como fertilizante orgánico de alta calidad, ya que es un producto

rico en nutrientes. Contiene una variedad de nutrientes esenciales, como nitrógeno, fósforo y potasio, que son beneficiosos para el crecimiento de las plantas y cultivos.

Además, el uso del digestato como fertilizante orgánico reduce la necesidad de fertilizantes químicos sintéticos. Por lo que ayuda a mejorar la salud del suelo y promueve la retención de agua, lo que a su vez favorece el crecimiento de los cultivos y aumenta la productividad agrícola. Esto tiene además de un impacto ambiental positivo, un impacto positivo en la rentabilidad de las explotaciones agrícolas al reducir el coste de los fertilizantes y mejorar el rendimiento de los cultivos.

Otro beneficio significativo es que el digestato, al ser utilizado como fertilizante orgánico, ayuda a cerrar el ciclo de nutrientes, contribuyendo a la economía circular y a la sostenibilidad del sistema agrícola. En lugar de desechar los residuos de frutas y verduras, se aprovechan como materia prima para producir biogás, y tras este proceso, los residuos se reciclan como fertilizante, creando así un ciclo productivo y reduciendo la dependencia de recursos externos. En el siguiente esquema se muestran los principales usos para la transformación y utilización del biogás y del digestato.

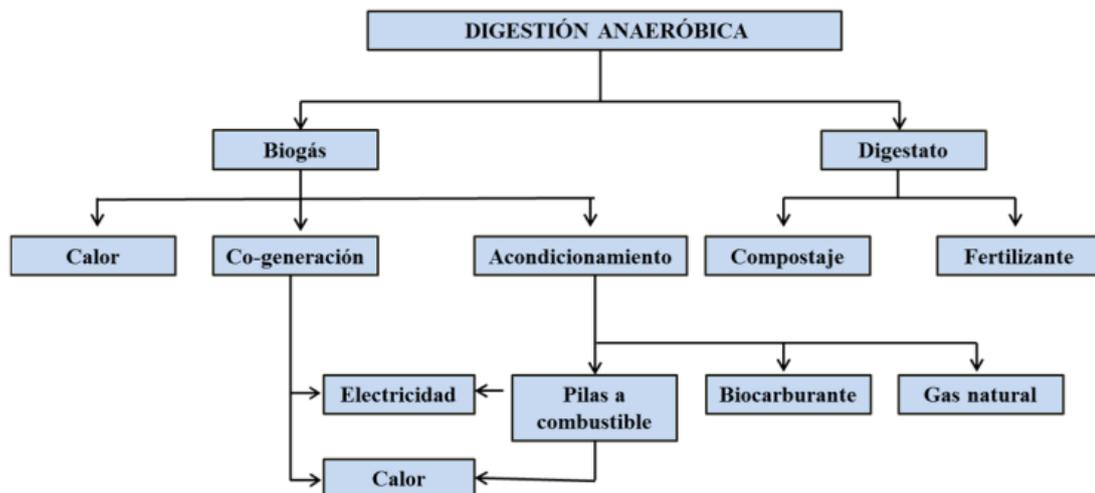


Ilustración 4. Principales usos para la transformación y utilización del biogás y del digestato. (Schön, 2009)

Por último, además de sus beneficios agrícolas, el uso del digestato también tiene un impacto positivo en la gestión de residuos. Al aprovechar las frutas y verduras no aptas para el consumo humano o los excedentes de producción, se reduce la generación de residuos orgánicos y se evita su disposición en vertederos, lo que contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la mitigación del cambio climático.

En resumen, la evaluación medioambiental del aprovechamiento integral de residuos para la generación de biogás y del posterior uso del digestato como fertilizante, es un tema de gran relevancia debido a los desafíos en la gestión de residuos, la necesidad de diversificar la matriz energética y los beneficios ambientales asociados. Este trabajo contribuirá al conocimiento científico y proporcionará información útil para la toma de decisiones, promoviendo la transición hacia una economía circular y baja en carbono en el país, y más específicamente en los grandes puntos de venta de productos alimentarios.

4.2 OBJETIVOS

El fin principal del trabajo como ya se ha indicado en el apartado de Introducción de este TFM es realizar la evaluación medioambiental del aprovechamiento integral de residuos vegetales producidos en los grandes mercados de España, y especialmente en los de Andalucía, para la generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia y el posterior estudio del residuo generado durante este proceso, el digestato.

Además, este proyecto lleva consigo unos objetivos asociados que son:

- Creación del proceso completo para la generación de biogás y obtención del digestato a través de la digestión anaerobia: para ello se empleará el programa SIMAPRO para realizar la simulación de la digestión anaerobia y del resto de postprocesos relacionados con el digestato. En dicha simulación se incluirán y modelarán los distintos equipos y fases que participan en el proceso.
 - Para los procesos que no estén definidos en la base de datos de SIMAPRO se deberá realizar una investigación documental para obtener los datos del impacto de estos procesos.

- **Análisis del impacto medioambiental:** Tras modelar en SIMARO el proceso completo se calcularán y analizarán los resultados obtenidos a través de las simulaciones y se estudiará el impacto medioambiental del proceso y más detalladamente del digestato obtenido.
- **Análisis del digestato como fertilizante:** Una vez obtenidos los datos de digestato producidos en la digestión anaerobia se estudiará su impacto medioambiental mediante el análisis de ciclo de vida, el cual terminará en su uso final. Este uso será la utilización de digestato como fertilizante.
- **Obtener y analizar el impacto ambiental generado por los 5 puntos de venta localizados en la región de Andalucía.** Centrándose el proyecto en el ACV del digestato que puede ser utilizado como fertilizante.
- **Comparación del fertilizante orgánico producido a partir del digestato generado con un fertilizante inorgánico NPK fabricado industrialmente.** Adicionalmente se realizará un análisis del impacto que tendría la sustitución del fertilizante NPK por el fertilizante orgánico en Andalucía. Se comprobará la hipótesis de que la sustitución del fertilizante inorgánico por el generado lleva consigo una reducción importante del impacto ambiental asociado.
- **Revalorizar el proceso de obtención de biogás a partir de residuos y apoyar la economía circular:** Se contribuirá a la reducción de la cantidad de residuos que se envían a los vertederos, lo que a su vez ayudará a mitigar el impacto ambiental. Además, la obtención de biogás supone un ahorro energético importante, ya que se podrá sustituir la utilización de combustibles fósiles por energía renovable. Por otra parte, el apoyo a la economía circular se logrará al promover la utilización de un mercado para los residuos orgánicos de frutas y verduras producidos en los puntos de venta estudiados, alentando su recolección y procesamiento para su posterior uso en la producción de biogás.

Capítulo 5. DEFINICIÓN DEL MODELO

Para llevar a cabo el estudio, lo primero que se realiza es el modelado de la planta y el esquema del modelo operativo. Dicho esquema se muestra en la *Ilustración 5* y se compone de los siguientes bloques:

- I. **Recepción y pretratamiento:** Los residuos entran en el sistema y se les aplica un pretratamiento en el cual se selecciona la fracción que se va a tratar en el siguiente bloque, rechazando el resto, y se tritura para su posterior tratamiento.
- II. **Proceso de digestión anaerobia:** Los residuos previamente seleccionados se mezclan y posteriormente se tratan en el digester donde se transforman en biogás y digestato (residuos). El biogás extraído del digester pasa a la Unidad de Desulfuración y posteriormente a una planta donde se trata para poder ser comercializado y utilizado. El digestato por su parte se deshidrata y se obtienen dos recursos, digestato deshidratado (sólido) y digestato líquido.
- III. El digestato líquido se trata en la Unidad de Tratamiento de Digestato, en el cual se filtra, se elimina el nitrógeno y mediante un proceso de ósmosis inversa se obtiene un nuevo digestato líquido en dos estados: Permeado y Concentrado (alta calidad).
- IV. El digestato deshidratado o sólido se envía directamente a la planta de compostaje donde se transforma en fertilizante.

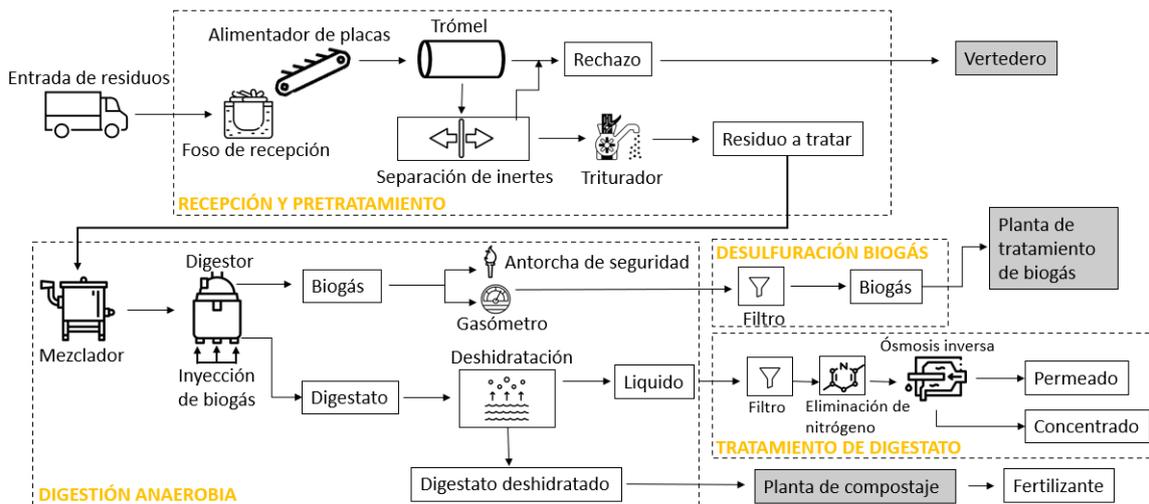


Ilustración 5. Esquema de la planta y del modelo de producción.

5.1 UNIDAD DE RECEPCIÓN Y PRETRATAMIENTO

La Unidad de Recepción y Pretratamiento en una planta de producción de biogás es la etapa inicial del proceso donde los residuos orgánicos, en el caso de este proyecto, residuos de frutas y verduras, son recepcionados y preparados para su tratamiento posterior en la unidad de digestión anaerobia. La tecnología de biometanización exige que los residuos que van a ser sometidos al proceso de digestión anaerobia tengan unas condiciones de tamaño y pureza en materia orgánica determinadas. Para ello se ha diseñado un completo proceso de pretratamiento que permite adecuar las condiciones de los residuos procedentes de los grandes mercados a las requeridas por el proceso.

En la siguiente Ilustración se muestra el esquema de esta unidad:

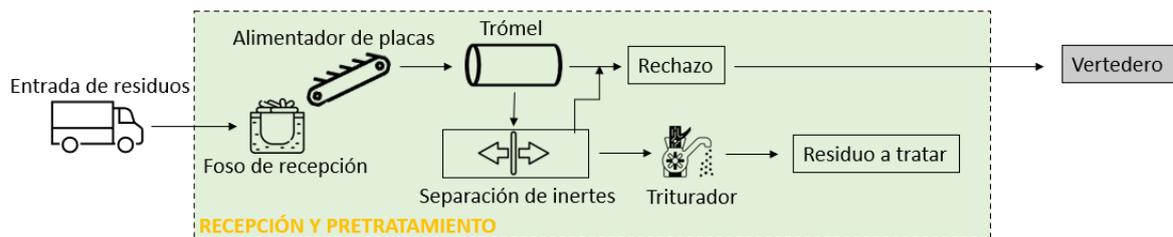


Ilustración 6. Esquema de la Unidad de Recepción y Pretratamiento.

Esta unidad generalmente consta de varios componentes, que incluyen:

1. Foso de recepción: Es el área donde se reciben y almacenan temporalmente los residuos orgánicos antes de su procesamiento. El foso de recepción puede ser una estructura subterránea o una plataforma elevada, diseñada para contener los residuos y permitir un flujo continuo hacia la siguiente etapa.
2. Cinta alimentadora: Una vez en el foso de recepción, los residuos son transportados a través de una cinta alimentadora de placas. La cinta transportadora se encarga de llevar los residuos de manera controlada hacia la siguiente etapa del proceso.
3. Trómel: El trómel es un equipo de cribado que separa los residuos en diferentes tamaños. Consiste en un cilindro giratorio con aberturas de tamaño específico que

- permiten el paso de materiales más pequeños, mientras que los más grandes se desvían, creando así varios flujos.
4. Unidad de rechazo: Algunos residuos, como materiales no deseables o contaminantes, pueden ser desviados hacia la unidad de rechazo. Estos residuos pueden ser enviados al vertedero o a otro proceso para su tratamiento.
 5. Separador de inertes: Si se encuentran materiales inertes, como arena, piedras u otros objetos no orgánicos, en los residuos, estos pueden ser separados utilizando un separador de inertes. Estos materiales inertes se dirigen a la unidad de rechazo o pueden ser procesados adicionalmente.
 6. Triturador: Después de pasar por el trómel y el separador de inertes, los residuos son enviados a un triturador. El triturador descompone los residuos en partículas más pequeñas, lo que facilita su posterior tratamiento en la Unidad de Digestión Anaerobia.

Una vez que los residuos han pasado por la Unidad de Recepción y Pretratamiento, están listos para ser tratados en la siguiente etapa del proceso: la Unidad de Digestión Anaerobia.

Es importante destacar que los componentes y la configuración exacta de la Unidad de Recepción y Pretratamiento pueden variar según el diseño y los requisitos específicos de cada planta de producción de biogás.

5.2 UNIDAD DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.

En este subapartado se describe brevemente proceso de digestión anaerobia y su esquema en el modelo de planta diseñado. La digestión anaerobia es un proceso biológico natural en el que la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno para producir biogás y digestato. Este proceso se da en entornos anaerobios, como en las plantas de tratamiento de aguas residuales o en el caso de este estudio, en los digestores anaerobios. En la siguiente Ilustración se muestra el esquema de esta unidad:

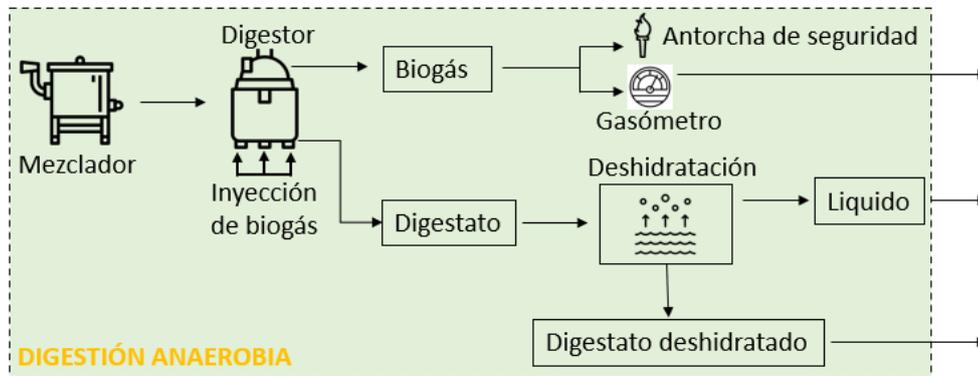


Ilustración 7. Esquema de la Unidad de Digestión Anaerobia.

El proceso de digestión anaerobia generalmente consta de varias etapas. La unidad consta de varios componentes que permiten la descomposición biológica de los residuos orgánicos y la generación de biogás y digestato. A continuación, se describe cada componente:

1. Mezclador: Los residuos pretratados se introducen en un mezclador donde se homogeneizan y se ajusta la composición y la concentración de los mismos. Esto asegura un suministro constante y equilibrado de los residuos al digestor anaerobio.
2. Digestor anaerobio: El digestor anaerobio es un reactor cerrado donde ocurre la digestión anaerobia de los residuos orgánicos. En este ambiente sin oxígeno, las bacterias anaerobias descomponen la materia orgánica y la transforman en biogás y digestato. El digestor puede ser de diferentes tipos, como tanques verticales u horizontales. En el digestor se dan las siguientes etapas:
 - I. Acidogénesis: En esta etapa, las bacterias acidogénicas descomponen los sustratos orgánicos complejos, como grasas, proteínas y carbohidratos, en ácidos orgánicos más simples, como ácido acético, ácido propiónico y ácido butírico.
 - II. Acetogénesis: En esta etapa, las bacterias acetogénicas convierten los ácidos orgánicos producidos en la etapa anterior en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono.
 - III. Metanogénesis: En esta etapa, las bacterias metanogénicas consumen el hidrógeno y el acetato producidos en las etapas anteriores y los convierten en

metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). El metano es el componente principal del biogás.

3. Biogás: El biogás producido en el digestor se recoge y se dirige a un gasómetro para su almacenamiento temporal. El gasómetro permite regular el flujo de biogás y estabilizar la presión. Desde el gasómetro, el biogás se envía a una antorcha de seguridad para eliminar los componentes no deseados, como el sulfuro de hidrógeno (H₂S), y luego se dirige a la Unidad de Desulfuración de Biogás para su purificación y utilización.
4. Digestato: El digestato es el subproducto sólido y líquido resultante de la digestión anaerobia. El digestato se separa en digestato sólido y digestato líquido, y se maneja de manera diferente:
 - a) Digestato deshidratado (sólido): El digestato generado en el digestor se somete a un proceso de deshidratación. Esto permite reducir su contenido de humedad y obtener digestato deshidratado en forma sólida.
 - b) Digestato líquido: El digestato líquido, que no se ha deshidratado, se dirige a la Unidad de Tratamiento de Digestato para su procesamiento adicional. En esta etapa, se pueden aplicar técnicas como la separación de sólidos adicionales, el ajuste del pH o la eliminación de patógenos para mejorar su calidad y cumplir con los requisitos de uso como fertilizante líquido.

Es importante destacar que la configuración y los procesos exactos de la Unidad de Digestión Anaerobia pueden variar según el diseño y los requisitos específicos de cada planta de producción de biogás. Además, se deben seguir los procedimientos adecuados de seguridad y control de olores para garantizar un funcionamiento eficiente y seguro de la planta.

5.3 UNIDAD DE DESULFURACIÓN DE BIOGÁS.

La función principal de la Unidad de Desulfuración de Biogás es eliminar o reducir los niveles de compuestos de azufre presentes en el biogás generado durante el proceso de digestión anaerobia.

El biogás producido en la Unidad de Digestión Anaerobia presenta una variedad de gases, que incluye metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y otros contaminantes, como sulfuro de hidrógeno (H_2S). El sulfuro de hidrógeno es un compuesto de azufre altamente tóxico y corrosivo que debe ser eliminado para cumplir con las regulaciones ambientales y para proteger el equipo de la planta de tratamiento de biogás.

La Unidad de Desulfuración de Biogás generalmente consta de un filtro de biogás, que puede ser de varios tipos, como un filtro biológico, un filtro químico o un filtro de carbón activado. Estos filtros están diseñados para atrapar y eliminar los compuestos de azufre presentes en el biogás. Cada tipo de filtro tiene su propio mecanismo de eliminación de azufre.

Después de pasar por el filtro de biogás, el biogás tratado se envía a una planta de tratamiento adicional para su refinamiento y purificación. Esta planta de tratamiento puede incluir procesos como la eliminación de humedad, la separación de gases, la compresión y el enfriamiento del biogás. Estos procesos adicionales ayudan a mejorar la calidad del biogás y lo preparan para su uso final, ya sea como combustible en motores de generación de energía, como fuente de calor o como materia prima en la producción de otros productos químicos. En la siguiente Ilustración se muestra el esquema de esta unidad:



Ilustración 8. Esquema de la Unidad de Desulfuración de Biogás.

5.4 UNIDAD DE TRATAMIENTO DE DIGESTATO.

La Unidad de Tratamiento de Digestato se encarga de procesar el digestato tras su paso por la Unidad de Digestión Anaerobia, y transformarlo para su futuro uso como fertilizante.

A continuación, se muestran y se describen los procesos que se llevan a cabo en la Unidad de Tratamiento de Digestato:

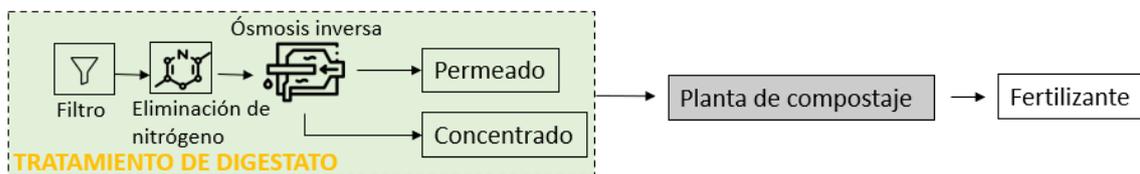


Ilustración 9. Esquema de la Unidad de Tratamiento de Digestato.

1. Filtro: El digestato pasa a través de un filtro para eliminar cualquier material sólido o partículas indeseables. Esto ayuda a asegurar que el digestato esté limpio y libre de impurezas antes de avanzar a los siguientes procesos.
2. Eliminación de nitrógeno: A continuación, se realiza el proceso de eliminación de parte del nitrógeno presente en el digestato. Esto se puede lograr mediante diferentes técnicas, por ejemplo, la desnitrificación bacteriana. La eliminación de nitrógeno es un proceso clave para reducir el contenido de este elemento en el digestato y evitar posibles impactos ambientales negativos cuando se aplique como fertilizante.
3. Ósmosis inversa: El digestato tratado se dirige a un equipo de ósmosis inversa. En este proceso, se utiliza una membrana semipermeable para separar los componentes líquidos del digestato en dos corrientes: digestato permeado y digestato concentrado.
4. Digestato permeado: El digestato permeado es la corriente más líquida resultante de la ósmosis inversa. Este líquido contiene una concentración reducida de nutrientes y sustancias orgánicas. Dependiendo de los requisitos específicos de la planta, el digestato permeado puede ser tratado aún más o descartado de manera segura.
5. Digestato concentrado: El digestato concentrado es la corriente que contiene una mayor concentración de nutrientes y sustancias orgánicas. Esta corriente es enviada

a la planta de compostaje, donde se somete a un proceso de descomposición controlada y maduración para convertirse en un fertilizante orgánico de alta calidad.

El proceso de tratamiento del digestato en la Unidad de Tratamiento es esencial para gestionar los residuos del proceso de digestión anaerobia de manera eficiente y sostenible. Al convertir el digestato en productos útiles, como el digestato concentrado, se promueve la economía circular y se minimiza el impacto ambiental de la planta de producción de biogás.

Capítulo 6. INVENTARIO DE DATOS

En este apartado del proyecto se explicarán la toma de datos y su posterior análisis para poder ajustar los procesos al modelo estudiado. Se expondrán los pasos que se han seguido para recopilar, organizar y cuantificar todos los datos relevantes sobre los flujos de materiales y energía asociados con el proceso. El objetivo principal del Inventario de datos es obtener una representación cuantitativa, precisa y completa de los flujos de materiales y energía asociados con el proceso a estudiar. Este apartado se realiza para poder asegurar la futura reproducibilidad del Análisis de Ciclo de Vida que se ha llevado a cabo.

Una vez recopilados y organizados los datos, se podrá calcular indicadores de impacto ambiental, como las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo de recursos naturales, la generación de residuos y otros impactos ambientales relevantes. Estos indicadores permiten evaluar el desempeño ambiental del objeto de estudio y compararlo con alternativas o referencias para identificar áreas de mejora y tomar decisiones informadas.

6.1 DATOS RELACIONADOS CON LOS RESIDUOS A EMPLEAR.

6.1.1 DATOS DE RESIDUOS OBTENIDOS DE LOS PUNTOS DE VENTA ESTUDIADOS.

La materia prima que se va a emplear en el proceso de digestión anaerobia estudiado son los residuos de fruta y verdura que se producen en los grandes mercados a nivel nacional. Debido a ello, lo primero que se realiza en este apartado del proyecto es la recopilación, análisis y selección de estos datos. Gracias al laboratorio del departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela Técnica superior de Ingeniería (ICAI) se recopilan los datos de residuos generados en estos grandes puntos de venta, se tienen datos de 22 de los 24 que existen en España. Tras obtener estos datos, se elabora la siguiente tabla:

LOCALIZACIÓN	TOTAL RESIDUOS GENERADOS ton/año	APROVECHABLE ORGÁNICO CORRECTAMENTE SEPARADO ton/año	% SOBRE EL TOTAL
Valencia 1	2774,70	138,74	5%
Asturias	859,80	128,97	15%
Extremadura	54,97	6,05	11%
Cataluña	23551,45	5770,11	25%
País Vasco	3039,00	372,28	12%
Andalucía 1	738,92	73,89	10%
Galicia	345,60	57,02	17%
Andalucía 2	1597,20	119,79	8%
Navarra	379,50	47,44	13%
Andalucía 3	451,70	49,69	11%
Canarias 1	2190,90	536,77	25%
Castilla y León 1	245,70	51,60	21%
Madrid	29553,50	7388,38	25%
Andalucía 4	2705,00	324,60	12%
Murcia	1271,00	311,40	25%
Baleares	2702,10	553,93	21%
Castilla y León 2	504,30	105,90	21%
Cantabria	348,00	76,56	22%
Andalucía 5	3524,75	863,56	25%
Canarias 2	1182,00	183,21	16%
Valencia 2	3330,00	549,45	17%
Castilla y León 3	2039,00	499,56	25%
TOTAL	83389,09	18208,87	22%

Tabla 2. Residuos generados (ton kg/año) en los grandes mercados nacionales.

En la *Tabla 2* se representan los datos obtenidos de los grandes mercados nacionales. En un primer lugar se presentan la localización del punto de venta (columna 1) y la cantidad de residuos que se generan en cada mercado (columna 2). Estos mercados suelen estar localizados en las grandes ciudades de las comunidades autónomas de España, los datos obtenidos muestran las localizaciones según su código interno, este código consiste en nombrar la localización según la comunidad autónoma en la que se localiza, si alguna comunidad tiene más de un mercado, se le asigna un número (por ejemplo, Andalucía 2).

A continuación, se realiza una selección de los residuos orgánicos que son de interés para el estudio, los residuos de fruta y verdura (columna 3). Por último, se calcula el porcentaje que representan estos residuos sobre el total de cada localización (columna 4) para tener una primera impresión sobre el potencial del proyecto.

Adicionalmente, en la tabla se añade una última fila, remarcada en verde, en la que se representa el total de los residuos generados (83389,09 ton kg/año), de los residuos seleccionados (18208,87 ton kg/año) y el porcentaje total que estos últimos representan sobre el total, un 22%.

Del análisis y estudio de estos datos se pueden sacar ciertas impresiones:

- Entorno a un cuarto de los residuos que se generan en los puntos de venta estudiados son aprovechables para el proceso estudiado. Estos residuos son los más numerosos y su correcta gestión a priori supondrían un gran beneficio para la industria.
- Los mercados en los que más residuos se generan son los de Madrid y Cataluña, que coincide con las dos ciudades más importantes y con más movimiento de mercancías del territorio nacional, Madrid y Barcelona. Entre estos dos puntos de venta se generan 53104,95 ton kg/año lo que suponen en torno a un 60% de los residuos totales.
- Los puntos de venta donde más residuos se generan porcentualmente de fruta y verdura son Madrid, Cataluña, Canarias 1, Murcia, Andalucía 5 y Castilla y León 3. En todos ellos los residuos seleccionados suponen un cuarto del total (25%). Estos mercados suponen un 85% del total de estos residuos.
- Los puntos de venta donde más residuos se generan en cantidades absolutas son Madrid (7388,38 ton kg/año), Cataluña (5770,11 ton kg/año), Andalucía 5 (863,56 ton kg/año), Baleares (553,93 ton kg/año) y Valencia 2 (549,45 ton kg/año).
- Por otra parte, los puntos de venta donde menos residuos de fruta y verdura se generan porcentualmente, son Valencia 1 (5% del total), Andalucía 2 (un 8%), Andalucía 1 (10%), Extremadura (11%) y Andalucía 3 (11%).

- Los puntos de venta donde menos residuos se generan en cantidades absolutas son Extremadura (6,05 ton kg/año), Navarra (47,44 ton kg/año), Andalucía 3 (49,69 ton kg/año), Castilla y León 3 (51,60 ton kg/año) y Galicia (57,02 ton kg/año).

6.1.2 DATOS DE LOS MERCADOS LOCALIZADOS EN ANDALUCÍA

A partir de los datos generales de residuos mostrados en la *Tabla 2* se extraen los datos específicos de Andalucía. Andalucía, al ser la Comunidad Autónoma con mayor producción agrícola, como se muestra en la gráfica de la *Ilustración 2* es la región donde se utiliza una mayor cantidad de fertilizante. Por ello el estudio de la producción de biogás, y más aún, de digestato en esta zona geográfica es muy interesante ya que el ahorro en el impacto medioambiental se maximiza al producir el fertilizante cerca de las zonas donde se va a consumir. Estos datos, asociados a los 5 grandes mercados de Andalucía se muestran en la siguiente tabla:

LOCALIZACIÓN	TOTAL RESIDUOS GENERADOS ton/año	APROVECHABLE ORGÁNICO CORRECTAMENTE SEPARADO ton/año	% SOBRE EL TOTAL
Andalucía 1	738,92	73,89	10%
Andalucía 2	1.597,20	119,79	8%
Andalucía 3	451,70	49,69	11%
Andalucía 4	2.705,00	324,60	12%
Andalucía 5	3.524,75	863,56	25%
Andalucía Total	9.017,57	1.431,53	16%

Tabla 3. Residuos generados (ton kg/año) en los grandes mercados de Andalucía.

Los datos de los residuos aprovechables mostrados en la tercera columna de la tabla son los que se utilizarán para analizar el impacto ambiental de los productos estudiados.

6.1.3 ANÁLISIS Y DISTRIBUCIÓN DEL RESIDUO

Una vez seleccionados y analizados los datos de los residuos que se van a utilizar para la generación de biogás, se pasa a analizar este residuo. Este análisis se realiza con el fin de lograr una distribución detallada de los productos que forman el residuo. Esta distribución

se necesita debido a que la categoría “residuos de fruta y verdura” es muy amplia y para la elaboración del modelo deseado se necesita definir más la materia prima que se va a emplear en la digestión anaerobia.

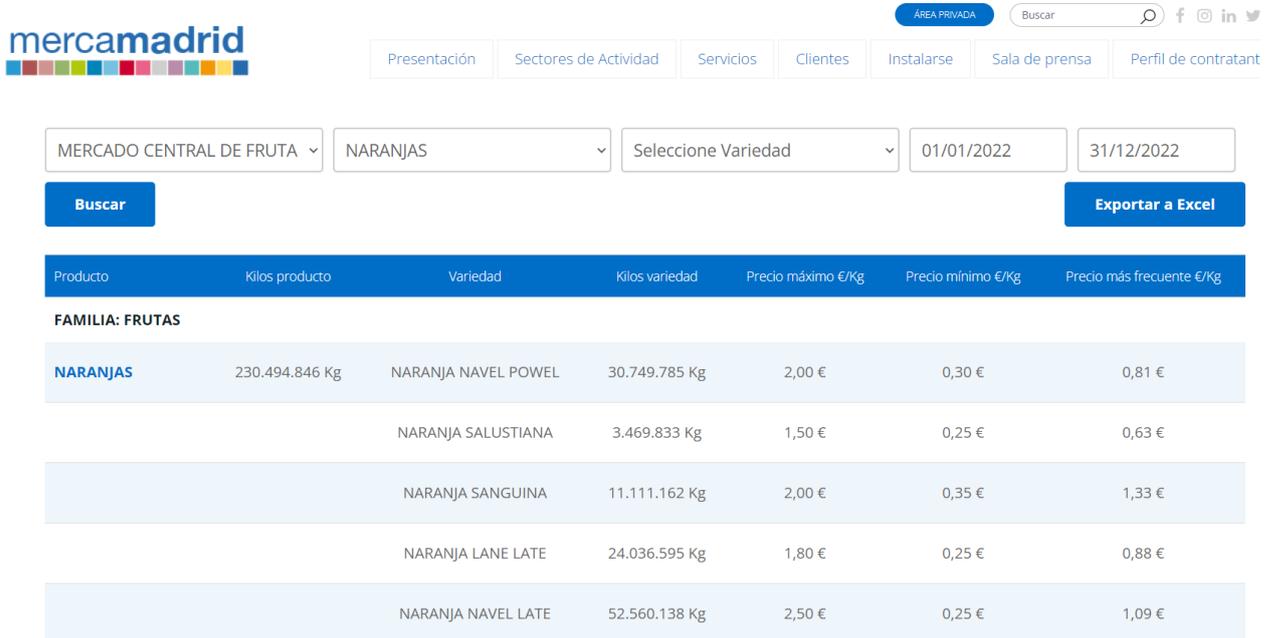
Al no disponer los datos de distribución de los residuos de fruta y verdura generados en los mercados estudiados se realiza un análisis del mercado para hallar estos datos. Tras la búsqueda se define el método de trabajo para realizar la distribución del residuo:

- Se divide el residuo en tres categorías: Fruta, verdura y tubérculos.
- Posteriormente se realiza una búsqueda para ver que productos son los más consumidos y los más vendidos de cada categoría en España.

Fruta	Verdura	Tubérculos
Naranja	Tomates	Patata
Plátano	Cebollas	Boniato
Manzana	Pimientos	Chirivía
Peras	Lechuga	Rábanos
Sandía	Calabacines	Yuca
Melón	Zanahoria	Jengibre
Kiwi	Pepino	Remolacha
Piña	Berenjenas	
Limón	Judías Verdes	
Melocotones	Coles	
Uvas	Brocoli	
Mango		
Mandarinas		
Aguacate		

Tabla 4. Productos más consumidos en España de cada categoría.

- Una vez se han reducido las tres categorías a una selección de entre 7 y 14 productos se busca el dato de residuos generados de cada producto en los mercados. Este dato no está disponible en el informe facilitado por estos mercados ni en internet. Al necesitar solo el porcentaje de cada producto sobre el residuo total lo que se realiza es una extrapolación de los datos de venta de cada producto. Se asume que el porcentaje de cada producto sobre el total de ventas coincide con el porcentaje del mismo producto sobre el total del residuo generado de cada categoría. Los datos de las ventas de cada producto se encuentran en la web de cada mercado. Se toman los datos de la web de Mercamadrid, en el apartado de Estadísticas (ref.[15]). Se asume que los datos y porcentajes obtenidos son iguales para todos los puntos de venta. Los datos se obtienen uno a uno de la web mencionada y se escoge el periodo completo del año 2022. A continuación, se muestra una imagen del proceso:



The screenshot shows the Mercamadrid website interface. At the top, there is a navigation bar with 'ÁREA PRIVADA' and a search bar. Below that are menu items: 'Presentación', 'Sectores de Actividad', 'Servicios', 'Clientes', 'Instalarse', 'Sala de prensa', and 'Perfil de contratant'. The main search area has filters for 'MERCADO CENTRAL DE FRUTA', 'NARANJAS', 'Seleccione Variedad', and dates '01/01/2022' to '31/12/2022'. There are 'Buscar' and 'Exportar a Excel' buttons. Below the filters is a table with the following data:

Producto	Kilos producto	Variedad	Kilos variedad	Precio máximo €/Kg	Precio mínimo €/Kg	Precio más frecuente €/Kg
FAMILIA: FRUTAS						
NARANJAS	230.494.846 Kg	NARANJA NAVEL POWEL	30.749.785 Kg	2,00 €	0,30 €	0,81 €
		NARANJA SALUSTIANA	3.469.833 Kg	1,50 €	0,25 €	0,63 €
		NARANJA SANGUINA	11.111.162 Kg	2,00 €	0,35 €	1,33 €
		NARANJA LANE LATE	24.036.595 Kg	1,80 €	0,25 €	0,88 €
		NARANJA NAVEL LATE	52.560.138 Kg	2,50 €	0,25 €	1,09 €

Ilustración 10. Toma de datos de la página web Mercamadrid.

En este ejemplo se observa cómo se obtiene el dato de kilos de naranja manipulados en Mercamadrid en el 2022. Para el análisis posterior se toma el dato de la columna *Kilos de producto* (230.494.846 kg), despreciando el resto.

- Tras obtener los datos de cada producto de la *Tabla 4* se calcula el porcentaje de cada producto sobre el total de cada categoría:

Top Frutas Consumidas España		
Alimento	Kg Mercamadrid	%
Naranja	230.494.846,00	23%
Plátano	187.574.574,00	18%
Manzana	127.338.762,00	12%
Peras	61.797.397,00	6%
Sandía	54.442.049,00	5%
Melón	52.724.224,00	5%
Kiwi	52.339.680,00	5%
Piña	47.729.473,00	5%
Limón	46.897.630,00	5%
Aguacate	45.885.295,00	4%
Melocotones	29.667.638,00	3%
Uvas	29.478.902,00	3%
Mango	29.446.748,00	3%
Mandarinas	27.789.579,00	3%
Total	1.023.606.797,00	100%

Tabla 5. Distribución de frutas vendidas en Mercamadrid.

Top Verduras Consumidas España		
Alimento	Kg Mercamadrid	%
Tomates	170.204.417,00	35%
Cebollas	93.901.278,00	19%
Pimientos	55.324.470,00	11%
Lechuga	58.512.674,00	12%
Calabacines	14.322.405,00	3%
Zanahoria	42.719.790,00	9%
Pepino	8.974.402,00	2%
Berenjenas	6.836.785,00	1%
Judías Verdes	22.034.728,00	4%
Coles	7.466.913,00	2%
Broccoli	9.665.128,00	2%
Total	489.962.990,00	100%

Tabla 6. Distribución de verduras vendidas en Mercamadrid.

Top Tubérculos Consumidas España		
Alimento	Kg Mercamadrid	%
Patata	250.151.991,00	96,9%
Boniato	661.410,00	0,3%
Chirivía	128.279,00	0,0%
Rábanos	173.357,00	0,1%
Yuca	5.480.903,00	2,1%
Jengibre	1.025.160,00	0,4%
Remolacha	561.803,00	0,2%
Total	258.182.903,00	100%

Tabla 7. Distribución de tubérculos vendidos en Mercamadrid.

- Tras la recopilación de los datos de kilogramos vendidos de cada categoría, se procede a calcular el porcentaje de cada uno de ellos sobre el total del residuo generado. Para ello se tienen la composición genérica del residuo:

Categoría	% sobre total
Frutas	34%
Verduras	53%
Tubérculos	13%

Tabla 8. Composición genérica del residuo.

- Con esta composición genérica del residuo y los datos desglosados de cada categoría se puede calcular el porcentaje de cada producto mostrado en las Tablas 5, 6 y 7 sobre el total del residuo a estudiar. Para ello se multiplica cada porcentaje por el porcentaje de la categoría, por ejemplo, si se quiere saber el peso que tiene el producto *Naranjas* sobre el residuo total, se multiplica su porcentaje dentro de la categoría de fruta por el porcentaje total de la categoría fruta en el residuo final:

$$\begin{array}{r}
 \text{\% Naranjas sobre} \\
 \text{el residuo final}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 0,23 \\
 \uparrow \\
 \text{\% Naranjas sobre} \\
 \text{total de frutas}
 \end{array}
 \times
 \begin{array}{c}
 0,34 \\
 \uparrow \\
 \text{\% Frutas sobre el} \\
 \text{residuo final}
 \end{array}
 =
 7,82\%$$

Ilustración 11. Ejemplo de cálculo del % de cada producto sobre el residuo final.

- Tras realizar estos cálculos se descartan todos aquellos productos que tengan un peso menor al 1% sobre el residuo total. Se pasa de una preselección de 32 productos a una selección final de 21. Se recalculan los porcentajes individuales teniendo en cuenta los descartes y se obtiene la composición final del residuo. A continuación, se muestra esta composición en la última columna de las siguientes tablas:

Top Frutas Consumidas España	% fruta sobre residuo = 34%		
Alimento	Kg Mercamadrid	% categoría	% residuo
Naranja	230.494.846	24,5%	8,32%
Plátano	187.574.574	19,9%	6,77%
Manzana	127.338.762	13,5%	4,60%
Peras	61.797.397	6,6%	2,23%
Melón	52.724.224	5,6%	1,90%
Kiwi	52.339.680	5,6%	1,89%
Piña	47.729.473	5,1%	1,72%
Limón	46.897.630	5,0%	1,69%
Aguacate	45.885.295	4,9%	1,66%
Melocotones	29.667.638	3,2%	1,07%
Uvas	29.478.902	3,1%	1,06%
Mango	29.446.748	3,1%	1,06%
Total	941.375.169	100,0%	34%

Tabla 9. Composición del residuo final. Categoría Frutas.

Top Verduras Consumidas España	% verdura sobre residuo = 53%		
Alimento	Kg Mercamadrid	% categoría	% residuo
Tomates	170.204.417	37,5%	19,89%
Cebollas	93.901.278	20,7%	10,97%
Pimientos	55.324.470	12,2%	6,46%
Lechuga	58.512.674	12,9%	6,84%
Calabacines	14.322.405	3,2%	1,67%
Zanahoria	42.719.790	9,4%	4,99%
Pepino	8.974.402	2,0%	1,05%
Brócoli	9.665.128	2,1%	1,13%
Total	453.624.564	100,0%	53,0%

Tabla 10. Composición del residuo final. Categoría Verduras.

Top Tubérculos Consumidos España	% tubérculos sobre residuo = 13%		
Alimento	Kg Mercamadrid	% categoría	% residuo
Patata	250.151.991	100,0%	13,00%
Total	250.151.991	100%	13%

Tabla 11. Composición del residuo final. Categoría Tubérculos.

6.2 ANÁLISIS DEL TRANSPORTE.

A continuación, se realiza un estudio para determinar la distancia que tienen que recorrer los residuos desde el punto en el que se generan hasta el punto en el que se consumen para generar los productos deseados (las plantas de biogás). En este proyecto se realizará el análisis para los 5 mercados localizados en Andalucía. La cantidad de residuos generados por estos mercados se muestran en la *Tabla 3* de este proyecto. Los 5 mercados que se van a estudiar son: Málaga, Córdoba, Granada, Sevilla y Algeciras. Se supone para el caso concreto de estos residuos que todos ellos se tratarán en los vertederos más cercanos a su mercado correspondiente independientemente de si estos vertederos cuentan con una planta de generación de biogás o no, ya que, uno de los objetivos de este proyecto es demostrar que la transformación de estos vertederos en plantas de tratamiento de residuos con capacidad para la generación de biogás y digestato es una oportunidad para reducir el impacto ambiental que generan. A continuación, se muestra una tabla con las distancias de cada uno de los mercados que se estudiarán al vertedero más cercano.

Punto de generación del residuo	Distancia (Km)
Mercado de Málaga	11,13
Mercado de Córdoba	8,1
Mercado de Granada	8,2
Mercado de Sevilla	18,8
Mercado de Algeciras	23,1
Distancia media	13,87

Tabla 12. Distancia recorrida por los residuos.

Además de la distancia entre cada punto de generación del residuo y la posible planta de tratamiento, se añade una última fila en la que se calcula el valor medio de los

desplazamientos. Este valor será el que se utilice para el análisis de ciclo de vida de los productos estudiados.

Posteriormente se estudia la capacidad de transporte de los camiones que se emplearán para realizar estos desplazamientos. Debido a las características del producto a transportar: residuo con bajo valor, sin necesidad de refrigeración ni aislamiento notable con el exterior, se decide que lo mejor es la utilización de camiones bañera. Además, se escogen camiones con etiqueta EUR6 que son los menos contaminantes. Estos camiones se utilizan para el transporte de residuos y sus características se observan en la siguiente imagen:



CAMIÓN BAÑERA 20 M3 RENAULT PREMIUM 410.18

Nº de unidades 1

Modelo 410.18 4X2

Peso máximo 18.000 Kg.

Tara 7.074 Kg.

Dimensiones

Longitud: 6.040 mm.

Anchura: 2.550 mm.

Distancia entre ejes: 3.900 mm.

Neumáticos

6: 13RR22,5

Ilustración 12. Características de camión bañera.

Como se puede apreciar la capacidad de transporte de estos camiones está en torno a 20m³ de carga. Para calcular la cantidad total de residuos, en kg, que pueden transportar estos camiones se siguen los siguientes pasos:

1. Se obtiene la densidad de cada producto que forma el residuo, todos los productos que se presentan en las *Tablas 9,10 y 11*.
2. Una vez se tiene la densidad de cada producto, se calcula la densidad media del residuo. Para ello se hace un sumatorio en el que se multiplica la densidad de cada producto por su aporte al residuo total. La densidad media que se obtiene es de 991,95 kg/m³.
3. A continuación, se multiplica la densidad media del producto por la capacidad del camión. Se obtiene así la capacidad máxima de carga en kg.

4. Se aplica un factor de corrección de 10% y se obtiene la carga óptima de carga del camión bañera, para ello se multiplica la capacidad máxima por 0,90. Este paso se hace debido a que la carga del camión puede variar dependiendo de la composición del residuo y de el residuo disponible a la hora de cargar el camión. Debido a los datos obtenidos, se sabe que la carga del camión suele ser inferior a la máxima.

Los datos descritos en los pasos anteriores se muestran en la siguiente tabla:

Densidad media del residuo (kg/m ³)	991,95
Capacidad camión bañera (m ³)	20,00
Capacidad máxima carga (kg)	19.839,00
Capacidad óptima 90% (kg)	17.855,10

Tabla 13. Capacidad de carga del camión bañera.

6.3 MODELADO DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.

En este subapartado se describe detalladamente las modificaciones realizadas en el proceso seleccionado de digestión anaerobia de SIMAPRO para adaptarlo al modelo de estudio. Para este estudio se va a modificar un mismo proceso, pero en dos versiones: Cut-off y APOS, posteriormente se compararán los resultados de ambos en el apartado “7.1.2 COMPARACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA, CUT-OFF VS APOS”. El proceso que se va a modificar es: Biogas (Row) anaerobic digestion of manure|Cut-off, U. Posteriormente se modelará el proceso mismo proceso, pero en su versión APOS para poder realizar una comparación entre ambos. La modificación del proceso APOS se realiza igual que la del proceso Cut-Off por lo que la siguiente explicación es común para ambos. Estos procesos se encuentran siguiendo los siguientes enlaces dentro de la sección de proyectos de SIMAPRO: Inventario > Procesos > Material > Fuels > Biofuels > Biogas > Transformation.

Modificación del proceso de SIMAPRO:

- El primer paso que se realiza es copiar el proceso Biogas (Row) anaerobic digestion of manure|Cut-off, U y se cambia el nombre por IAM TFM Biogás Digestión anaerobia Frutas y Verduras | Cut -Off U.
- A continuación, se modifican las entradas, estas entradas se muestran en la *Ilustración 13:*

Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos) (insertar línea aquí)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS ² or 2 ^o DS	Min	Máx	Comentario
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS ² or 2 ^o DS	Min	Máx	Comentario
Anaerobic digestion plant, agriculture, with methane recovery [CH] construction Cut-off, U		2,8600029991482	p	Reg. normal	2,9905			(5,5,4,1,1,na) Lifespan is taken as being equal to 20 years. In order to take account of the scale effect, the following formula is applied: $U_i = U_0 \times (C_i/CO)^{0,7}$ where U_i is the number of infrastructure units for the reference case i , in "units"; $U_0 = 1$ [unit] is the number of infrastructure units for the reference facility "anaerobic digestion plant, agriculture, with methane recovery"; C_i is the annual biogas production for the reference case i , in $m^3/year$; $CO = 350,000$ [$m^3/year$] is the annual biogas production of the reference facility "anaerobic digestion plant, agriculture, with methane recovery". The infrastructure input per kg of substrate is calculated according to the following formula: $li = U_i \times Y_i / (20 \times C_i)$ where li is the infrastructure input "anaerobic digestion plant, covered, agriculture" for the reference case i , in "units" per kg of substrates; U_i is the number of infrastructure units for the reference case i , in "units"; Y_i is the biogas production yield for the reference case i , in m^3 of biogas per kg of substrates; C_i is the annual biogas production for the reference case i , in $m^3/year$.
Digester sludge [GLO] digester sludge, Recycled Content cut-off Cut-off, U		-36,1825799164	kg	Reg. normal	1,0502			(5,5,4,1,1,na) Calculated as residual from the mass balance: input manure - outputs and emissions. The density of biogas is assumed to be 1.185628256 kg /m ³ of BG in normal conditions of temperature and pressure. Production Volume Amount: 1769500160
Manure, liquid, cattle [GLO] market for Cut-off, U		20,45198895926	kg	Reg. normal	1,0502			(5,5,4,1,1,na) Shares of substrates as in Switzerland 2009
Manure, liquid, swine [GLO] market for Cut-off, U		12,271193373555	kg	Reg. normal	1,0502			(5,5,4,1,1,na) Shares of substrates as in Switzerland 2009
Manure, solid, cattle [GLO] market for Cut-off, U		4,4622521358889	kg	Reg. normal	1,0502			(5,5,4,1,1,na) Shares of substrates as in Switzerland 2009
Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS ² or 2 ^o DS	Min	Máx	Comentario
Electricity, low voltage [CH] market for Cut-off, U		0,158	kWh	Reg. normal	1,0502			(5,5,4,1,1,na) Calculated with a fixed factor per m ³ biogas produced
Heat, central or small-scale, other than natural gas [CH] market for Cut-off, U		3,47	MJ	Reg. normal	1,0502			(5,5,4,1,1,na) Calculated with a fixed factor per m ³ biogas produced

Ilustración 13. Entradas del proceso sin modificar.

Se reemplazan las entradas de estiércol (Manure), por la deseada, residuos de frutas y verduras, que pasa a ser el principal sustrato de la digestión anaerobia. Para ello se crea un producto en SIMAPRO denominado: “Residuo de fruta y verdura”. Este residuo tiene la composición que se ha definido en el apartado anterior en el punto 6.1.2. Utilizando de base las *Tablas 9, 10 y 11* se crea el producto que se muestra en la *Ilustración 14*. Para ello, se toma de base 100 kg de residuo y se introducen los productos con su correspondiente valor, esto es, si el producto *Naranjas*, representa un 8,32% del residuo total, en este producto creado en SIMAPRO se introducen 8,2 kg de *Naranjas*. Estos productos de SIMAPRO se adaptan borrando parte de sus entradas y salidas para que se adapten al residuo deseado.

- Adicionalmente se incluye el transporte que hacen estos residuos desde su recogida hasta la planta de tratamiento, este valor ha sido calculado previamente en la *Tabla 12* y tiene un valor de 13,87 km. A continuación, se calcula la estimación en toneladas-kilometro, que es la unidad estándar para incluir el impacto del transporte en SIMAPRO. Este cálculo consiste en multiplicar la cantidad de residuos que se quiere estudiar (100 kg, que es la base) por la distancia que se transportan estos residuos (13,87 km).

$$tkm (Base 100kg) = \frac{100 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/ton}} * 13,87 \text{ km} = 1,387 \text{ tkm}$$

Ecuación 1. Cálculo para la asignación de carga al transporte del residuo.

Por último, se escoge el proceso de transporte que más se adapte al proyecto. Se selecciona un camión bañera con etiqueta de motor EUR 6, ya que es el camión más eficiente, y se escoge el proceso: Transport, freight, lorry, unspecified {RoW}| transport, freight, lorry, all sizes, EURO6 to generic market for | Cut-off, U. Se crea el proceso de: Residuo de Fruta y Verdura, y se añade al apartado de “Entradas conocidas desde la tecnosfera (materiales /combustibles” sustituyendo a las antiguas entradas de “Manure”.

En las siguientes ilustraciones se muestra el proceso y su localización:

ICAI ICADE CIH5 *PLEASE TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.*

Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^D	Min	Máx	Comentario	
(Insertar línea aquí)									
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^D	Min	Máx	Comentario	
(Insertar línea aquí)									
Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)				Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^D	Min	Máx
Orange Cut-off, U				8,32	kg	Indefinido			
Banana Cut-off, U				6,77	kg	Indefinido			
Apple Cut-off, U				4,60	kg	Indefinido			
Pear Cut-off, U				2,23	kg	Indefinido			
Melon Cut-off, U				1,90	kg	Indefinido			
Kiwi Cut-off, U				1,89	kg	Indefinido			
Pineapple Cut-off, U				1,72	kg	Indefinido			
Lemon Cut-off, U				1,69	kg	Indefinido			
Peach Cut-off, U				1,07	kg	Indefinido			
Grape Cut-off, U				1,06	kg	Indefinido			
Mango Cut-off, U				1,06	kg	Indefinido			
Avocado Cut-off, U				1,66	kg	Indefinido			
Tomato Cut-off, U				19,89	kg	Indefinido			
Onion Cut-off, U				10,97	kg	Indefinido			
Bell pepper Cut-off, U				6,46	kg	Indefinido			
Lettuce Cut-off, U				6,84	kg	Indefinido			
Zucchini Cut-off, U				1,67	kg	Indefinido			
Carrot Cut-off, U				4,99	kg	Indefinido			
Cucumber Cut-off, U				1,05	kg	Indefinido			
Broccoli Cut-off, U				1,13	kg	Indefinido			
Potato Cut-off, U				13	kg	Indefinido			
Transport, freight, lorry, unspecified (RoW) transport, freight, lorry, all sizes, EURO6 to generic market for Cut-off, U				1,387	tkm	Indefinido			
(Insertar línea aquí)									

Ilustración 14. Producto creado en SIMAPRO: Residuo de fruta y verdura.

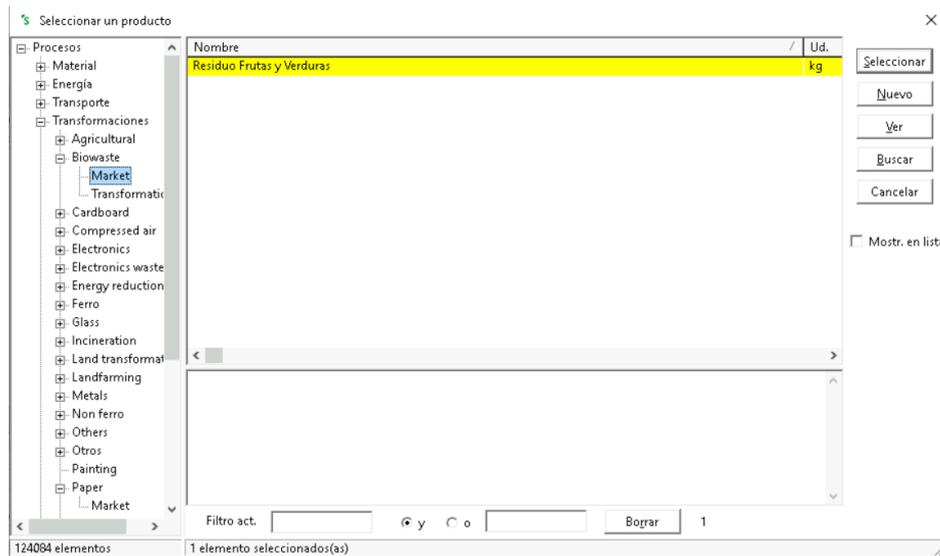


Ilustración 15. Localización del producto "Residuo de Fruta y Verdura"

- El proceso base: Biogas (Row) anaerobic digestion of manure|Cut off, tiene de base 1 m³ de biogás. Esto significa que todas las entradas y salidas están dimensionadas para la generación de esta cantidad de biogás. Por lo que el siguiente paso que se realiza es calcular la cantidad necesaria de residuo a tratar para conseguir 1 m³ de

biogás. El laboratorio de ICAI facilita el dato objetivo que se busca en este proceso, este dato es: 913,28 ml de biogás/100 g de residuos. Con este dato, se calcula la cantidad necesaria del *Residuo de Fruta y Verdura* que se necesita en el modelo estudiado:

$$1 \text{ m}^3 \text{ de biogás necesita: } \frac{1000000}{9132,8} = 109,50 \text{ kg de residuo}$$

Ecuación 2. Kg necesarios de residuo para generar 1m3 de biogás.

109,5 kg de residuo es lo necesario para crear 1 m³ de biogás en este proceso, bajo las condiciones del modelo a estudiar.

- En las entradas de energía y calor se cambia el sistema predeterminado por el de España o en su defecto, por el de Europa sin Suiza. A continuación, se suman todas la entradas de energía, por un lado, y de calor por otro, y se crean dos únicas entradas. El valor de estas entradas no hay que modificarlas ya que están dimensionadas para 1 m³ de biogás. En la *Tabla 14* se muestra el resultado final:

Entradas conocidas desde la tecnología (electricidad/calor)	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx
Electricity, low voltage [ES] market for Cut-off, U	0,158	kWh	Reg. normal	1,0502		
Heat, central or small-scale, other than natural gas [Europe without Switzerland] market for H	3,47	MJ	Reg. normal	1,0502		

Tabla 14. Entradas de energía y calor.

Tras la modificación de las entradas, se modifican las salidas del proceso:

- En el proceso original, el digestato generado durante la digestión anaerobia aparece como una entrada en negativo. Esto es una técnica común en SIMAPRO que se utiliza cuando se tiene una salida cuyo estudio no interesa. En este caso se introduce una entrada ficticia en negativo cuya función es restar la salida no deseada y que esta no aparezca en el resultado. En el caso de este estudio, el digestato es una salida deseada sobre la que se realizarán análisis. Por ello, lo primero que se lleva a cabo es eliminar la entrada denominada como *Digester sludge [GLO]* en la *Ilustración 13*. Tras este paso, se crea el producto “IAM TFM Digestato, Salida Digestor | Cut Off” (en el proceso APOS se crea el producto “IAM TFM Digestato, Salida Digestor |

APOS”) el cual se añade en la sección de productos y co-productos como se puede ver más adelante en la *Ilustración 16*.

- Para el cálculo del digestato generado en el proceso de digestión anaerobia se conoce gracias al laboratorio de ICAI que se generan 0,3 kg de digestato por cada kg de residuo que se introduce en el digestor. Como se ha calculado anteriormente en este apartado, en el modelo estudiado la cantidad de residuos necesarios para la elaboración de 1m³ de biogás es 109,5 kg. Por lo que, el proceso genera 32,85 kg de digestato. A continuación, se muestra en la *Ilustración 16* la sección de productos y co-productos tras las modificaciones realizadas. La columna de “Asignación” se explica más adelante en el apartado “6.4 ASIGNACIÓN DE CARGAS EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA”.

Salidas conocidas a la tecnología. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Tipo de residuo	Categoría	Comentario
IAM TFM Biogás, Digestión anaerobia Frutas y Verduras Cut -Off U	1	m3	Volume	31,35 %		Fuels\BI...Transformation	Gas derived from fermentation of sewage sludge. Sewage gas is well suited as a fuel for co-generation. The obtained heat is sufficient to cover the overall heat consumption of a WWTP, including the heat demand for the fermentation process. Furthermore, sewage gas may be directly burnt for heating purposes. In principle, the generated sewage gas can be upgraded to natural gas quality and then used as a fuel for road vehicles or fed into the natural gas network. In the year 2004 the waste water treatment plant Buitolz was equipped with a biogas upgrading plant. The quantity (degradation rate) and quality of the biogas depend on several factors: • composition of the input material (share of dry organic matter) • duration of digestion • temperature inside digestion tank • quality and quantity of co-substrates Production Volume Amount: 626105424
IAM TFM Digestato, Salida digestor Cut -Off U	32,85	kg	Mass	68,65 %	Compost	Fuels\BI...Transformation	(5,5,4,5,4,na) Calculated as residual from the mass balance: input manure - outputs and emissions. The density of biogas is assumed to be 1,18568256 kg /m3 of BG in normal conditions of temperature and pressure. Ratio 0,3 kg digestato/kg residuo Production Volume Amount: 219306033152

Ilustración 16. Salidas del proceso de digestión anaerobia en SIMAPRO.

- Las características del digestato generado se muestran en la siguiente *Tabla 15*, estos datos han sido facilitados por el laboratorio de ICAI y corresponden al digestato generado tras el proceso de digestión anaerobia estudiado, es decir, a la salida del digestor y antes de separar el digestato entre digestato líquido y digestato sólido. Este digestato presenta una humedad del 67%. Los datos se muestran a continuación:

Características Digestato	V	%
pH	6,3	-
dm [%] (materia seca)	33,4%	33,4%
Humedad [%]	66,6%	66,6%
Humedad [g/kg digestato]	666	66,6%
COT [g/kg digestato]	255	25,5%
N [g/kg digestato]	20	2,0%
P [g/kg digestato]	3	0,3%
K [g/kg digestato]	31	3,1%
S [g/kg digestato]	2	0,2%
Ca [g/kg digestato]	12	1,2%
Mg [g/kg digestato]	5	0,5%
Fe [g/kg digestato]	6	0,6%

Tabla 15. Composición del digestato generado en la digestión anaerobia.

6.4 ASIGNACIÓN DE CARGAS EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

A continuación, se realiza la asignación de cargas del proceso. La asignación de cargas implica distribuir los flujos de entrada (residuos orgánicos, energía, calor) entre las salidas (biogás y digestato) de acuerdo con las proporciones establecidas en el proceso de digestión anaerobia. Esta distribución se puede basar en distintos parámetros y datos establecidos previamente, como la eficiencia de conversión o las características de los productos. La asignación de cargas, además, sirve para distribuir las emisiones y efectos medioambientales de los procesos entre los distintos productos obtenidos en cada proceso.

Existen diferentes métodos de asignación de cargas que pueden emplearse, dependiendo de los objetivos específicos del proceso y las características de los productos disponibles. A continuación, se describen algunos de los métodos comunes utilizados en la asignación de cargas:

- Método de asignación por masa: En este enfoque, la asignación de cargas se realiza en proporción a la masa de los productos que se obtienen. En el caso particular de este estudio, se debe de sumar la masa del biogás y la del digestato para obtener la

masa total de los productos útiles a la salida del digestor. Si se realiza la asignación de cargas según este método el resultado es de una asignación de 3,67% para el biogás y 96,33% para el digestato, el proceso para obtener estos datos se muestra en la *Tabla 16*.

Volumen de biogás (m³)	1
Densidad biogás (Kg/m³)	1,25
Masa de biogás (Kg)	1,25
Masa de digestato (Kg)	32,85
Masa total Salida (Kg)	34,10
% masa biogás	3,67%
% masa digestato	96,33%

Tabla 16. Asignación de cargas según criterio másico.

Esta asignación tan desproporcionada se debe a que los productos obtenidos en el proceso están en fases diferentes, el biogás se encuentra en fase gaseosa por lo que su masa es mucho menor que la del digestato que se encuentra en fase sólida a la salida. Este método, por lo tanto, se descarta por su ineficiencia.

- Método de asignación por criterio económico: En este método, la asignación de cargas se realiza en función del valor económico (precio) asociado a los productos obtenidos. Se evalúa el valor económico de cada producto y se asignan las cargas en función de estos. Para realizar esta evaluación se realiza un trabajo de investigación y se contacta con varias fuentes, entre ellas la planta de biogás HTN Biogas - Hibridación Termosolar Navarra SL, situada en Caparroso, y la planta de Valdemingomez, situada en Madrid y que es la planta con mayor producción de biogás a nivel nacional. Ambas fuentes remarcan que el valor de estos productos a la salida del digestor es difícil de cuantificar ya que, para poder darles valor, tienen que pasar por una serie de postprocesos.

Para hallar estos valores, se consulta el informe financiado y aprobado por la Unión Europea “*El uso del digestato como fertilizante en el norte de Europa.*” de la

empresa Nutriman, facilitado por el laboratorio de ICAI en el que se realiza una estimación de precio de 35 €/ton para un digestato con un 90% de extracto seco. En el caso de estudio, la humedad del digestato a la salida del digestor es del 66%. No es posible establecer una proporción directa entre estos valores, ya que el precio no sigue una relación lineal y a menor humedad el digestato obtiene mucho más valor. Por lo que se estima, un valor de 0.01 €/kg (10€/ton) como posible precio del digestato a la salida del digestor.

Si se realiza la asignación de cargas siguiendo esta estimación y con los datos recopilados, el resultado es de una asignación de 31,35% para el biogás y 68,65% para el digestato, el proceso para obtener estos datos se muestra en la *Tabla 17*.

Volumen de biogás (m3)	1
Precio unitario biogás (eur/m3)	0,15
Precio biogas (eur)	0,15
Masa de digestato (kg)	32,85
Precio unitario digestato (eur/kg)	0,01
Precio digestato (eur)	0,33
Precio total salida (eur)	0,48
% econom biogas	31,35%
% economic digest	68,65%

Tabla 17. Asignación de cargas según criterio económico.

Esta asignación es más equilibrada y se adapta mejor al modelo de estudio. Es por ello, por lo que se escoge esta distribución para el proceso de digestión anaerobia. En la *Ilustración 16* se aprecia como estos son los datos que se introducen en la columna de distribución que tiene SIMAPRO en el apartado de productos y co-productos para realizar esta función de asignación de cargas.

- Método de asignación por poder calorífico: En este enfoque, la asignación de cargas se realiza en proporción al poder calorífico de los productos obtenidos. El poder calorífico del biogás es una medida de la energía contenida en el gas, mientras que el poder calorífico del digestato puede estar relacionado con su capacidad de generar calor o energía después de su secado o compostaje. Este método se descarta debido

a su poca utilidad debido a la desproporcionalidad de estos valores, a que este método no se suele utilizar en este tipo de procesos y a que su análisis es complejo y requiere pruebas y datos de laboratorio para obtener valores precisos.

6.5 MODELADO DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN.

Tras el proceso de digestión anaerobia hay que tratar el digestato obtenido para poder utilizarlo como fertilizante. A la salida del digestor el digestato obtenido tiene un 66,6% de humedad, en el postproceso de deshidratación, se busca separar la fracción líquida de la sólida. La fracción sólida correctamente separada y denominada como digestato seco, una vez sale del proceso está lista para ser utilizada como fertilizante. A continuación, se detallan los pasos seguidos para el modelado completo de este proceso.

6.5.1 ELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEL PROCESO A MODELAR.

Lo primero que se realiza para el modelado de este proceso es buscar uno similar en SIMAPRO, al no encontrar ningún proceso que se asemeje a las características del proyecto, se decide modelar un proceso desde cero. Para modelar un proceso desde cero en SIMAPRO es necesario buscar información acerca de las entradas y salidas, del consumo energético que tiene el proceso y de las emisiones de este. Para ello, lo primero que se realiza es una comparación entre los distintos métodos que existen para realizar el proceso de deshidratación del digestato. Se analizan tres posibles soluciones: Prensa de Tornillo (Screw Press), Centrifugadora Decantadora (Decanter Centrifuge) y Prensa de Cinta (Belt Press).

1. Prensa de Tornillo (Screw Press):

La prensa de tornillo es una técnica comúnmente utilizada para la separación sólido-líquido en diversas industrias, incluida la digestión anaerobia. Funciona aplicando presión y fuerza mecánica a través de un tornillo giratorio para extraer la fracción líquida del digestato. A medida que el tornillo se mueve, el material se comprime y el líquido es expulsado a través de las aberturas en el tambor, mientras que la fracción sólida más seca se acumula y se recoge. A continuación, se muestra una tabla en la

que se muestran las ventajas y desventajas de esta técnica y una ilustración que representa su funcionamiento:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> Buena eficiencia en la separación sólido-líquido. Bajo consumo energético en comparación con otras técnicas. No requiere el uso de productos químicos adicionales. Compacta y requiere menos espacio físico. 	<ul style="list-style-type: none"> Puede requerir un mantenimiento periódico para evitar obstrucciones del tornillo. Puede ser sensible a la presencia de materiales fibrosos o sólidos de mayor tamaño. Requiere una supervisión adecuada para asegurar un funcionamiento correcto.

Tabla 18. Ventajas y desventajas de la prensa de tornillo para el proceso de deshidratación.

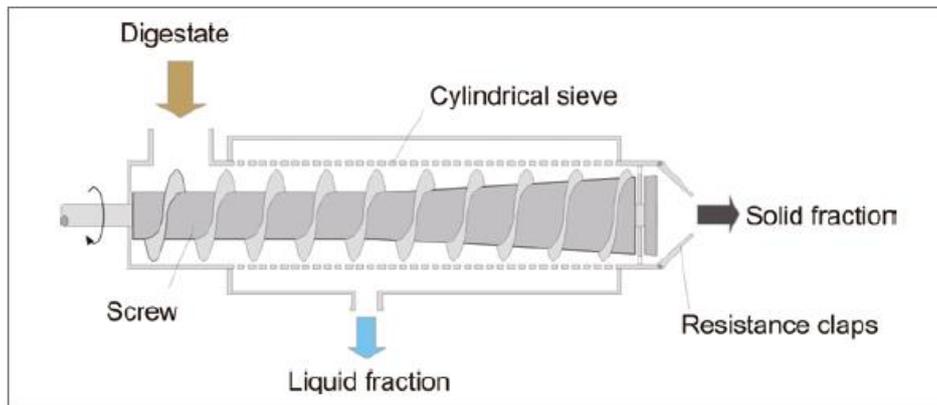


Ilustración 17. Representación del funcionamiento de una prensa de tornillo. (Fuchs and Drosch, 2010)

2. Centrifugadora Decantadora (Decanter Centrifuge):

La centrifugadora decantadora es una técnica que se basa en la fuerza centrífuga para separar los componentes sólidos y líquidos, en este caso, del digestato. El digestato se introduce en un tambor giratorio que genera fuerza centrífuga, lo que provoca la separación de los componentes según su densidad. La fracción sólida más pesada se acumula en un extremo del tambor, mientras que la fracción líquida más liviana se extrae del otro extremo. A continuación, se muestra una tabla en la que se muestran

las ventajas y desventajas de esta técnica y una ilustración que representa su funcionamiento:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia en la separación de sólidos y líquidos. • Capacidad para manejar una amplia gama de concentraciones de sólidos. • No se requieren productos químicos adicionales. • Mayor capacidad de procesamiento en comparación con otras técnicas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor consumo energético debido a la generación de fuerza centrífuga. • Requiere un tamaño y diseño adecuados para adaptarse a las características del digestato. • Puede ser sensible a la presencia de materiales fibrosos o sólidos de mayor tamaño. • Requiere un mantenimiento periódico y limpieza para evitar obstrucciones y desgaste del equipo.

Tabla 19. Ventajas y desventajas de la centrifugadora decantadora para el proceso de deshidratación.

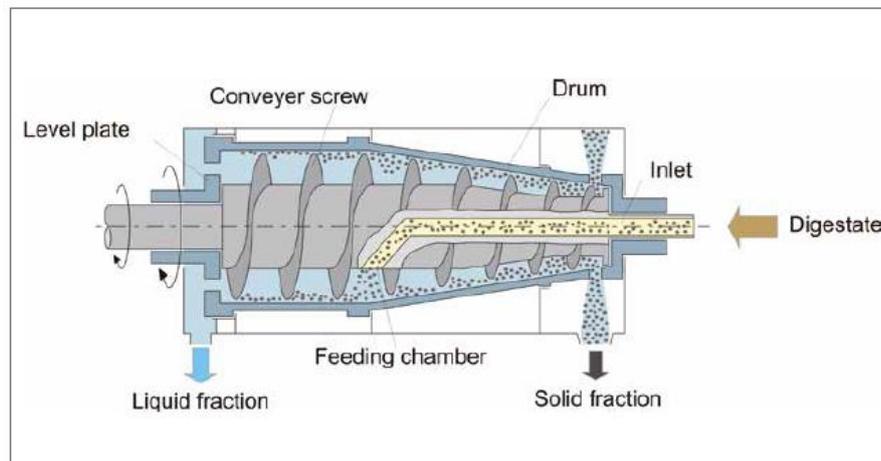


Ilustración 18. Representación del funcionamiento de una centrifugadora decantadora. (Fuchs and Drosig, 2010)

3. Prensa de Cinta (Belt Press):

La prensa de cinta es una técnica que utiliza una cinta transportadora para deshidratar y separar la fracción sólida del digestato. El digestato se introduce en la prensa, donde

pasa a través de una cinta permeable que permite el drenaje de la fracción líquida mientras retiene los sólidos. A medida que el material se desplaza a lo largo de la cinta, se ejerce presión mecánica para extraer el líquido restante, formando una lámina de digestato seco. A continuación, se muestra una tabla en la que se muestran las ventajas y desventajas de esta técnica y una ilustración que representa su funcionamiento:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> Buena eficiencia en la deshidratación y separación sólido-líquido. Capacidad para procesar grandes volúmenes de digestato. Operación continua y automatizada. Requiere menos supervisión y mantenimiento en comparación con otras técnicas. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere un mayor consumo de energía que la prensa de tornillo. Puede requerir productos químicos coagulantes o floculantes para mejorar la eficiencia de separación. La lámina final puede requerir un procesamiento adicional para obtener una consistencia y contenido de humedad adecuados.

Tabla 20. Ventajas y desventajas de la prensa de cinta para el proceso de deshidratación.

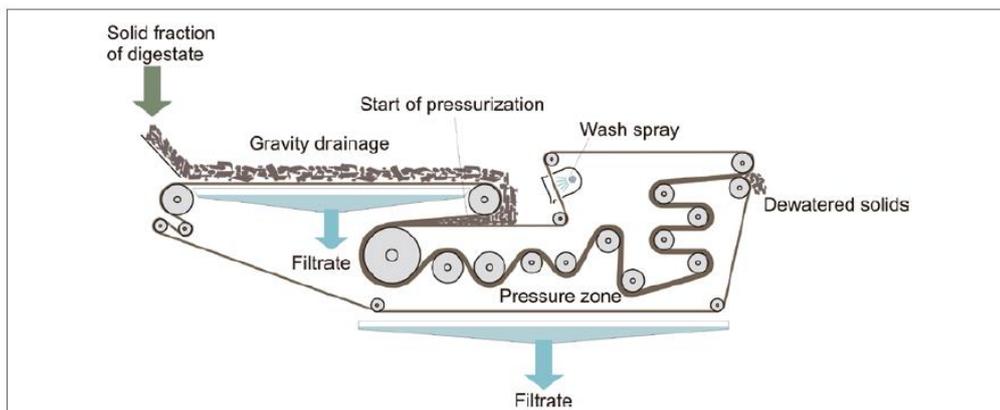


Ilustración 19. Representación del funcionamiento de una prensa de cinta. (Fuchs and Drogg, 2010)

Tras el análisis realizado y con la información mostrada en las *Tablas 18, 19 y 20* se crea una tabla comparativa entre las tres tecnologías disponibles para poder escoger la que más se adapte al proyecto:

Tecnología	Eficiencia separadora	Consumo energético	Requiere mantenimiento	Capacidad de procesamiento	Requiere Productos Químicos
Prensa Tornillo	Alta	Bajo	Bajo	Media	No
Centrifugadora Decantadora	Muy Alta	Alto	Medio	Alta	No
Prensa cinta	Media	Medio	Bajo	Alta	SI

Tabla 21. Comparación entre las tecnologías disponibles.

En la tabla anterior podemos ver un desglose de las características más importantes de las tres tecnologías. En cada columna se clasifica cada tecnología según su rendimiento en esa característica específica y se usa un código de colores para remarcar que tecnología tiene mejor desempeño (verde) y cuál tiene peor (rojo). Una vez se realiza este análisis, se determina que la tecnología que mejor se adapta a las condiciones del proyecto es la Centrifugadora Decantadora ya que es la que ofrece la mejor eficiencia separadora, siendo esta característica la más importante debido a que se busca maximizar la fracción sólida obtenida en el proceso de deshidratación. Además de ser la mejor tecnología en este área, también ofrece una alta capacidad de procesamiento, lo que es básico ya que se busca que el proceso se adapte a un volumen industrial y, además, no requiere productos químicos adicionales, esto facilita el modelado en SIMAPRO al no tener que añadir co-productos en el proceso y facilita el trabajo a los operarios de la planta de tratamiento.

6.5.2 MODELADO DEL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN EN SIMAPRO.

Tras la elección de la tecnología que se va a emplear para deshidratar el digestato y extraer la fracción sólida, se procede a modelar el proceso en SIMAPRO. Para ello, será necesario conocer las entradas y salidas que tiene el proceso, el consumo energético y las emisiones que produce.

La entrada al proceso de deshidratación es el digestato obtenido a la salida del proceso de digestión anaerobia. Esta salida ha sido creada en el anterior proceso y recibe el nombre de “IAM TFM Digestato, Salida Digestor | Cut Off”, este producto se añade en la parte de “*Entradas conocidas desde la tecnosfera (materiales/combustibles)*”. Por su parte, el

producto obtenido a la salida de la Centrifugadora Decantadora será el digestato deshidratado o seco, que recibe el nombre de “IAM TFM Digestato Deshidratado”, además se añade un co-producto denominado “IAM TFM Digestato Líquido”. Estos dos productos serán las salidas conocidas del proceso.

Tras definir las entradas y las salidas, lo siguiente que se realiza es la asignación de cargas. En este caso la asignación de cargas es más sencilla que la asignación de cargas realizada en el proceso de digestión anaerobia ya que, siguiendo el criterio económico, en este caso el producto denominado “IAM TFM Digestato Líquido” se considera un residuo sin valor. Por lo que se le asigna el 100% de las cargas al producto “IAM TFM Digestato Deshidratado” que representa el digestato que podrá ser utilizado como sustitutivo del fertilizante inorgánico que se estudiará en el capítulo 7.

Tras definir las entradas y salidas, falta conocer la cantidad (los kilogramos) de los productos que entran y de los productos que se generan. Al ser el digestato deshidratado el producto con valor en este proceso se decide modelar el proceso de deshidratación para 1 kg de este producto. De la *Tabla 15. Composición del digestato generado en la digestión anaerobia*, se obtiene el dato máximo de digestato deshidratado que se puede obtener. En esta tabla se muestra que el digestato obtenido a la salida del digestor presenta un porcentaje de materia seca del 33,4%. Esto significa que por cada kilogramo de digestato obtenido, 334g son digestato sólido y 666g digestato líquido. Por ello se supone que para que a la salida del proceso de deshidratación haya 1 kg de digestato deshidratado, se necesitan:

$$\text{Digestato a la entrada} = \frac{1}{0,334} = 2,994 \text{ kg digestato}$$

Ecuación 3. Digestato necesario a la entrada del proceso de deshidratación.

Hay que tener en cuenta que el digestato no se separa en este proceso perfectamente al no tenerse una eficiencia del 100% de separación. Es por ello, que la fracción sólida extraída tendrá un porcentaje mayor al 33,4% ya que contendrá un porcentaje de humedad entorno al

20% pero para el análisis solo son relevantes los 334g de fracción sólida que se obtienen tras el proceso y pasan a formar parte del digestato seco.

Tras este análisis se determina que la entrada del proceso serán 2,994 kg de “IAM TFM Digestato, Salida Digestor | Cut Off” y las salidas 1 kg de “IAM TFM Digestato Deshidratado” y 1,994 kg de “IAM TFM Digestato Liquido”.

Una vez analizadas y definidas las entradas se procede a modelar el apartado de “Entradas conocidas desde la tecnosfera (electricidad/calor)” en este apartado se introducirá el consumo eléctrico de la Centrifugadora Decantadora. Este dato se obtiene de la siguiente tabla en la que se comparan los consumos eléctricos de las tres tecnologías estudiadas en el apartado anterior:

Digestate derived product	Methods of processing	Energy consumption, kWh _e /m ³	Application and market niches
Solid fraction of digestate (SFD)	Solid-liquid separation of RD	0.2–0.6 – SP 2–5 – DC 1.2–5 – BP	Complex organic fertilizer. Soil improver. Co-composting. Soil reclamation. Component for DSFD and DP production.

Tabla 22. Consumo energético de las tecnologías estudiadas para el proceso de deshidratación.

En la tabla se muestra el consumo de las tres tecnologías (SP = Screw Press, DC = Decanter Centrifuge, BP = Belt Press) para la generación de 1m³ de digestato deshidratado. De la tabla se obtiene el dato de consumo de la Centrifugadora Decantadora, esta tecnología consume de 2 a 5 kWh/m³, se decide escoger el dato más desfavorable, es decir 5 kWh/m³. Lo siguiente que se realiza es buscar en SIMAPRO la entrada deseada, en el caso de este proyecto, la entrada que más se adapta es: Electricity, low voltage {ES}| market for | Cut-off, U, que ya ha sido utilizada en el proceso de digestión anaerobia y representa la electricidad en el mercado español. Las unidades de esta entrada son kWh por lo que hay que realizar un cambio de unidades para adaptar el consumo de la centrifugadora a la entrada escogida. Para ello se necesita la densidad del digestato deshidratado que es de 1040 kg/m³. A continuación, se realiza el cambio:

$$\text{Consumo energético (por kg digestato seco)} = \frac{5(\text{kWh}/\text{m}^3)}{1040\text{kg}/\text{m}^3} * 1\text{kg} = 0,0048 \text{ kWh}$$

Ecuación 4. Consumo energético de la centrifugadora (por kg digestato seco).

Una vez se tiene el consumo energético, se procede a analizar las emisiones del proceso de digestión anaerobia. Estas emisiones se obtienen gracias al laboratorio de ICAI que proporciona la siguiente tabla:

Emisiones	Kg emitidos/ton digestato	x 1kg digestato	x2,994kg digestato
N20	0,525	5,30E-04	1,57E-03
CH4	0,728	7,30E-04	2,18E-03
COV	0,033	3,00E-05	1,00E-04
NH3	0	0	0

Tabla 23. Emisiones generadas en el proceso de deshidratación.

En la tabla se muestran las principales emisiones del proceso. El dato original viene presentado en kg emitidos/ton digestato tratadas, para ajustarlo a la base del proceso que se está modelando es necesario obtener el dato de kilogramos emitidos por cada kilogramo tratado y posteriormente multiplicar este dato por 2,994 kg que es la cantidad de digestato que se trata según la base escogida de 1 kg de digestato deshidratado.

Tras el análisis de las emisiones se da por finalizado el modelado del proceso de deshidratación y se crea en SIMAPRO. A continuación, se muestra el proceso completamente modelado:

ICAI ICADE CIH5 **USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.**

Documentación	Entrada/salida	Parámetros	Descripción del sistema						
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos		Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación	Tipo de resid.	Categoría	Comentario	
	IAM TFM Digestato Deshidratado	1	kg	Mass	100 %	no definido	Fue.\Transformation		
	IAM TFM Digestato Líquido	1,994	kg	Mass	0 %	no definido	Fue.\Transformation		
	(Insertar línea aquí)								
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^C	Min	Máx	Comentario	
	(Insertar línea aquí)								
Entradas									
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)		Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^C	Min	Máx	Comentario
	(Insertar línea aquí)								
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^C	Min	Máx	Comentario	
	IAM TFM Digestato, Salida digestor Cut -Off U	2,994	kg	Indefinido					
	(Insertar línea aquí)								
Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^C	Min	Máx	Comentario	
	Electricity, low voltage (ES) market for Cut-off, U	0,004807692	kWh	Indefinido					
	(Insertar línea aquí)								
Salidas									
Emisiones al aire		Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^C	Min	Máx	Comentario
	Nitrogen oxides, ES		0,00157185	kg	Indefinido				
	Methane		0,002179632	kg	Indefinido				
	Carbon dioxide, biogenic		0,0001	kg	Indefinido				
	VOC, volatile organic compounds as C		0,000098802	kg	Indefinido				
	(Insertar línea aquí)								
Emisiones al agua		Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^C	Min	Máx	Comentario
	(Insertar línea aquí)								
Emisiones al suelo		Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^C	Min	Máx	Comentario
	(Insertar línea aquí)								

Ilustración 20. Proceso de deshidratación modelado en SIMAPRO.

Capítulo 7. RESULTADOS

En este capítulo se obtienen y destacan los resultados más relevantes del proyecto y se hace un análisis crítico de los mismos.

7.1 IMPACTO AMBIENTAL DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.

En este apartado se muestran los resultados obtenidos relacionados con el impacto ambiental del proceso de digestión anaerobia modelado en SIMAPRO: IAM TFM Biogás Digestión anaerobia Frutas y Verduras | Cut -Off U. Adicionalmente se analiza el impacto específico para el caso concreto de los mercados de Andalucía en el subapartado 7.1.1 y se comparan los resultados obtenidos en el proceso Cut-Off y en el proceso APOS en el subapartado 7.1.2.

Tras la adaptación del proceso al modelo de estudio se realiza un análisis en SIMAPRO del mismo para poder analizar el impacto ambiental que tiene la generación de biogás y digestato en el proceso de digestión anaerobia. Este análisis se realiza con el método “*CML-IA baseline*” que ha sido desarrollado por el Centro de Ciencias Medioambientales (CML) de la Universidad de Leiden (Países Bajos) y es un método fiable que se ajusta a las necesidades del estudio. En él, se muestra el impacto ambiental asociado a la generación de 1m³ de biogás y 32,85 kg de digestato según lo calculado en el apartado “6.3 MODELADO DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA” de este informe. A continuación, se muestra en la *Ilustración 21* los datos introducidos para la realización del análisis en SIMAPRO y en la *Tabla 24* los resultados de este:

ICAI ICADE CIH5 **PLEASE TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.**

Nombre
 Digestión anaerobia

Comentario

Datos a la salida del digestor

Función de cálculo

Red
 Árbol
 Analizar
 Comparar

Método
 CML-IA baseline V3.07 / EU25

Producto	Cantidad	Ud.	Proyecto	Comentario
IAM TFM Biogás, Digestión anaerobia Frutas y Verduras Cut -Off U	1	m3	TFM Ignacio Alvaro	
IAM TFM Digestato, Salida digestor Cut -Off U	32,85	kg	TFM Ignacio Alvaro	

Librería actual Sufijo

Sustituyendo librería Sufijo

Interruptores

Excluir procesos de infraestructura
 Excluir emisiones a largo plazo

Ilustración 21. Análisis del proceso de digestión anaerobia en SIMAPRO.

Categoría de impacto	Unidad	Biogás	Digestato	Total
Abiotic depletion	kg Sb eq	8,06E-07	1,77E-06	2,57E-06
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	2,262	4,953	7,215
Global warming (GWP100a)	kg CO2 eq	0,401	0,877	1,278
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	1,57E-08	3,44E-08	5,01E-08
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	0,096	0,209	0,305
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0,069	0,151	0,220
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	166,426	364,439	530,865
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	3,91E-04	8,57E-04	1,25E-03
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	3,06E-04	6,70E-04	9,75E-04
Acidification	kg SO2 eq	0,002	0,004	0,006
Eutrophication	kg PO4--- eq	4,45E-04	9,74E-04	1,42E-03

Tabla 24. Resultados impacto ambiental proceso digestión anaerobia, Cut-off.

Adicionalmente, SIMAPRO ofrece la función de analizar la distribución del impacto ambiental entre los productos seleccionados. En el caso de este estudio esta distribución ya se sabía ya que se ha calculado en el apartado “6.4 ASIGNACIÓN DE CARGAS EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA” y se ha forzado a que se cumpla en la simulación. En la Ilustración 22 se muestra una gráfica la cual representa esta distribución. La comparación que hace SIMAPRO es en términos relativos, por ello, asigna al digestato un 100% en cada categoría y al biogás un 45,66%, esta proporción es la misma que decir en términos absolutos que la carga asignada al digestato es de 68,65% y al biogás de 31,35%.

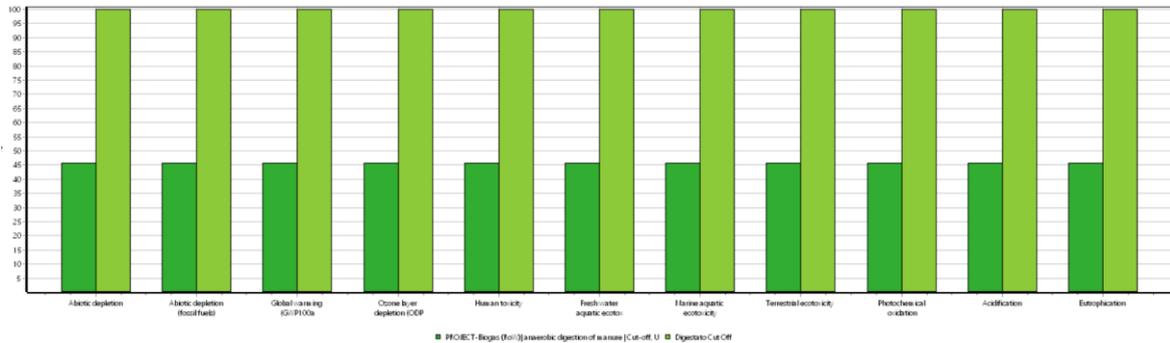


Ilustración 22. Distribución de cargas.

7.1.1 IMPACTO AMBIENTAL DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA – CASO ESPECÍFICO ANDALUCÍA

Tras los datos obtenidos se realiza el análisis para calcular cuál sería el impacto ambiental de la generación de biogás y digestato a partir de los residuos de frutas y verduras de los grandes mercados situados en Andalucía. A partir de los datos generales de residuos mostrados en la *Tabla 2* se extraen los datos específicos de Andalucía. Estos datos, asociados a los 5 grandes mercados de Andalucía se muestran en la siguiente tabla:

LOCALIZACIÓN	TOTAL RESIDUOS GENERADOS ton/año	APROVECHABLE ORGÁNICO CORRECTAMENTE SEPARADO ton/año	% SOBRE EL TOTAL
Andalucía 1	738,92	73,89	10%
Andalucía 2	1.597,20	119,79	8%
Andalucía 3	451,70	49,69	11%
Andalucía 4	2.705,00	324,60	12%
Andalucía 5	3.524,75	863,56	25%
Andalucía Total	9.017,57	1.431,53	16%

Tabla 25. Datos de residuos generados en los mercados de Andalucía.

A partir del dato general de residuo aprovechable orgánico correctamente separado, que hace referencia a los residuos que se estudian en este proyecto, se puede calcular el impacto anual asociado a la producción de biogás y digestato en el proceso de digestión anaerobia en esta

comunidad autónoma. Para ello se calcula la cantidad de biogás y digestato que se generaría con esa cantidad de residuos:

$$\text{Biogás} = \frac{1.431.530 \text{ kg de residuo útil}}{109,5 \frac{\text{kg de residuo}}{\text{m}^3 \text{ biogás}}} = 13.073,88 \text{ m}^3 \text{ biogás}$$

Ecuación 5. Biogás anual generado a partir del residuo de Andalucía.

$$\text{Digestato} = 1.431.530 \text{ kg residuo} * 0,3 \frac{\text{kg digestato}}{\text{kg residuo}} = 429.459,00 \text{ kg digestato}$$

Ecuación 6. Digestato anual generado a partir del residuo de Andalucía.

Tras la obtención de estos datos se realiza el análisis en SIMAPRO del impacto ambiental anual en Andalucía. Este análisis se realiza igual que el explicado en el apartado anterior, pero en este caso se introducen las cantidades de biogás y digestato calculadas para el dato de residuos generados. Este análisis se muestra en la siguiente tabla:

Categoría de impacto	Unidad	Biogás Andalucía	Digestato Andalucía	Total
Abiotic depletion	kg Sb eq	0,011	0,023	0,034
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	29.572,506	64.754,947	94.327,453
Global warming (GWP100a)	kg CO2 eq	5.237,322	11.468,169	16.705,491
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	2,05E-04	4,50E-04	0,001
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	1.248,881	2.734,676	3.983,557
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	903,734	1.978,907	2.882,640
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	2.175.837,214	4.764.433,050	6.940.270,263
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	5,115	11,200	16,315
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	3,997	8,753	12,751
Acidification	kg SO2 eq	24,131	52,839	76,969
Eutrophication	kg PO4--- eq	5,814	12,731	18,546

Tabla 26. Resultados impacto ambiental anual del proceso digestión anaerobia en Andalucía.

7.1.2 COMPARACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA, CUT-OFF VS APOS

Adicionalmente, se realiza el análisis del proceso APOS para comprobar si existen diferencias notorias entre este proceso y el proceso Cut – Off. Y en el caso de haberlas, analizar cuál de los dos procesos es más óptimo para el estudio del proyecto. El proceso APOS es útil para llevar a cabo un análisis de ciclo de vida más detallado y exhaustivo. Este proceso suele tener en cuenta más factores a la hora de realizar los análisis, por ello, suele dar resultados mayores. Para modelarlo se siguen los pasos del apartado “6.3 MODELADO DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA”: Se crea el nuevo proceso “IAM TFM Biogás Digestión anaerobia Frutas y Verduras | APOS U” , se modifican las entradas; añadiendo el producto creado de “Residuo de Fruta y Verdura”, se eliminan las entradas no deseadas y se juntan todas las entradas de energía y calor; posteriormente se modifican las salidas, se crea el producto “IAM TFM Digestato, Salida Digestor | APOS” y se eliminan las salidas no deseadas. Tras estas modificaciones se obtiene el proceso modelado en APOS, se simula este proceso con el método “CML-IA baseline” para 1m³ de biogás y 32,85 kg de digestato. Se obtienen los resultados mostrados en la siguiente tabla:

Categoría de impacto	Unidad	Biogás APOS	Digestato APOS	Total
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,67E-07	1,24E-06	1,81E-06
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	1,945	4,260	6,205
Global warming (GWP100a)	kg CO2 eq	0,258	0,565	0,823
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	2,21E-08	4,83E-08	7,04E-08
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	0,114	0,250	0,364
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0,495	1,084	1,580
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	268,244	587,398	855,642
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,002	0,003	0,005
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	4,75E-05	1,04E-04	1,52E-04
Acidification	kg SO2 eq	0,001	0,003	0,004
Eutrophication	kg PO4--- eq	0,004	0,008	0,011

Tabla 27. Resultados impacto ambiental proceso digestión anaerobia, APOS.

Para comprobar si la elaboración de este proceso es beneficiosa para el proyecto y ofrece resultados diferentes al proceso de Cut-Off se realiza una comparación entre ambos

ICAI ICAD E CIH5 **PLEASE TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.**

resultados y se saca el delta (diferencia) porcentual de cada uno de los resultados. Esta comparación se muestra en la *Ilustración 23* y en las *Tablas 28 y 29*:

Nombre
 Cutoff vs APOS
 Comentario

Función de cálculo
 Red
 Árbol
 Analizar
 Comparar

Método
 CML-IA baseline V3.07 / EU25

Producto	Cantidad	Ud.	Proyecto	Comentario
IAM TFM Biogás, Digestión anaerobia Frutas y Verduras Cut -Off U	1	m3	TFM Ignacio Alvaro	
IAM TFM Biogás, Digestión anaerobia Frutas y Verduras APOS	1	m3	TFM Ignacio Alvaro	
IAM TFM Digestato, Salida digestor Cut -Off U	32,85	kg	TFM Ignacio Alvaro	
IAM TFM Digestato, Salida digestor APOS	32,85	kg	TFM Ignacio Alvaro	

Librería actual Sufijo
 Sustituyendo librería Sufijo

Interruptores
 Excluir procesos de infraestructura
 Excluir emisiones a largo plazo

Ilustración 23. Comparativa entre proceso Cut Off y APOS

Categoría de impacto	Unidad	Biogás APOS	Digestato APOS	Biogás Cut-Off	Digestato Cut-Off
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,67E-07	1,24E-06	8,06E-07	1,77E-06
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	1,945	4,260	2,262	4,953
Global warming (GWP100a)	kg CO2 eq	0,258	0,565	0,401	0,877
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	2,21E-08	4,83E-08	1,57E-08	3,44E-08
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	0,114	0,250	0,096	0,209
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0,495	1,084	0,069	0,151
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	268,244	587,398	166,426	364,439
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,002	0,003	0,000	0,001
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	4,75E-05	1,04E-04	3,06E-04	0,001
Acidification	kg SO2 eq	0,001	0,003	0,002	0,004
Eutrophication	kg PO4--- eq	0,004	0,008	0,000	0,001

Tabla 28. Comparación impacto proceso digestión anaerobia, APOS vs Cut-Off.

Categoría de impacto	Unidad	Proceso APOS	Proceso Cut-Off	Diferencia
Abiotic depletion	kg Sb eq	1,81E-06	2,57E-06	-30%
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	6,205	7,215	-14%
Global warming (GWP100a)	kg CO2 eq	0,823	1,278	-36%
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	7,04E-08	5,01E-08	40%
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	0,364	0,305	19%
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,580	0,220	616%
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	855,642	530,865	61%
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,005	0,001	284%
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	1,52E-04	0,001	-84%
Acidification	kg SO2 eq	0,004	0,006	-30%
Eutrophication	kg PO4--- eq	0,011	0,001	705%

Tabla 29. Comparación entre procesos y diferencia porcentual.

La columna de *Diferencia* se calcula siguiendo la fórmula que se muestra a continuación:

$$Diferencia (\Delta) \% = \frac{Impacto APOS - Impacto Cut Off}{Impacto Cut Off} * 100$$

Ecuación 7. Diferencia porcentual entre procesos.

En la *Tabla 29* se aprecia que existen grandes diferencias en muchas de las categorías de impacto. En primer lugar llaman la atención los deltas más grandes (Eutrofización 705%, Ecotoxicidad terrestre 284%, Ecotoxicidad acuática en agua dulce 616%) estos resultados tan llamativos se dan debido a que el proceso APOS tiene en cuenta más emisiones en todas estas categorías secundarias mientras el proceso Cut Off no considera estos impactos Por ello, en las categorías en las que la diferencia es mayor, los resultados de impacto total suelen ser muy bajos (mucho menores a 1) y en cuanto se tiene en cuenta un pequeño impacto, el porcentaje se dispara.

Sin embargo, a pesar de que la versión APOS puede aportar resultados más detallados en términos ambientales, en este proyecto se elige seguir utilizando la versión Cut-off por diversas razones. En primer lugar, la versión Cut Off permite modelar el proyecto de manera más simple en comparación con la versión APOS, que incluye numerosas subcategorías dentro de cada elemento a modelar. Además, la versión Cut Off aporta un mayor impacto en la categoría principal a estudiar en este proyecto: Calentamiento Global (100 años). Es por

ello que se decide escoger el proceso más desfavorable, el proceso modelado en Cut Off, para realizar los futuros análisis y comparaciones. Esto, además, ahorra tiempo al compilar el programa y facilita su reproducibilidad en trabajos futuros.

7.2 ANÁLISIS DEL DIGESTATO OBTENIDO

7.2.1 ANÁLISIS DEL DIGESTATO OBTENIDO A LA SALIDA DEL DIGESTOR

Previamente en el punto “6.3 MODELADO DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA” se presenta en la *Tabla 15* las características del digestato obtenido tras la digestión anaerobia. Para que el digestato obtenido tras este proceso pueda ser tratado como materia prima para fertilizantes y abonos ha de cumplir con ciertos requisitos y especificaciones. En España estos requisitos vienen detallados en la: “*Legislación de los productos fertilizantes*” del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación del Gobierno de España. En esta legislación la categoría del digestato que se obtiene en el proceso de digestión anaerobia viene definida como: *CMC4: Digestato de cultivos frescos*. Para esta categoría el digestato tiene que presentar una composición que se asemeje a los siguientes límites:

- Nitrógeno (N): El contenido de nitrógeno puede variar generalmente entre 1% y 5%.
- Fósforo (P): El contenido de fósforo suele estar en el rango de 0.5% a 2%.
- Potasio (K): El contenido de potasio puede oscilar entre 0.5% y 3%.
- Carbono orgánico total (COT): El contenido de carbono orgánico total puede variar ampliamente, generalmente entre 20% y 60%.
- Azufre (S): El contenido de azufre puede estar en el rango de 0.1% a 2%.
- Calcio (Ca): El contenido de calcio generalmente oscila entre 0.5% y 5%.
- Magnesio (Mg): El contenido de magnesio suele estar en el rango de 0.1% a 1%.
- Hierro (Fe): El contenido de hierro puede variar desde trazas hasta alrededor de 0.5%.

Además de los componentes del digestato es importante ajustar el pH y la materia seca/humedad a los límites definidos. El rango de pH recomendado para el digestato cuya finalidad es su uso como fertilizante puede variar según los cultivos a los que va destinado y las condiciones del suelo. Sin embargo, por lo general, se considera que un rango de pH entre 6 y 8 es adecuado para la mayoría de los cultivos y suelos agrícolas.

Es importante tener en cuenta que un pH muy bajo (ácido) o muy alto (alcalino) puede afectar a la presencia de nutrientes en el suelo y, en consecuencia, afectar al crecimiento y desarrollo de las plantas. Por lo tanto, es recomendable realizar análisis de pH en el digestato y ajustar el pH si fuera necesario para el tipo de cultivo deseado, antes de aplicar el fertilizante creado a partir del digestato generado en este proceso.

Por su parte, el contenido mínimo de materia seca en el digestato suele estar alrededor del 15%. Esto significa que al menos el 15% del peso total del digestato es materia seca, mientras que el resto es agua.

El contenido máximo de materia seca en el digestato suele ser de alrededor del 35% - 40%. Superar este rango puede hacer que el digestato sea demasiado seco y esto podría dificultar su transformación en fertilizante en los procesos posteriores.

Es importante tener en cuenta que el contenido de materia seca en el digestato puede influir en la dosificación y aplicación adecuada como fertilizante. Un mayor contenido de materia seca implica una mayor concentración de nutrientes por unidad de peso, lo que puede requerir ajustes en la cantidad aplicada para cumplir con los requerimientos nutricionales de los cultivos. Por otro lado, un digestato demasiado húmedo puede dificultar la mezcla con el suelo y aumentar el riesgo de escorrentía y lixiviación de nutrientes.

Una vez se conocen los datos del digestato obtenidos tras el proceso de digestión anaerobia y se saben cuáles son los límites oficiales para este digestato, se realiza una tabla comparativa para ver si se cumplen los límites/recomendaciones:

Características Digestato	V	%	Límite inf.	Límite sup.
pH	6,3	-	6	8
dm [g/kg] (materia seca)	334	33,4%	15%	40%
Humedad [g/kg digestato]	666	66,6%	60%	80%
COT [g/kg digestato]	255	25,5%	20%	60%
N [g/kg digestato]	20	2,0%	1%	5%
P [g/kg digestato]	3	0,3%	0,50%	2%
K [g/kg digestato]	31	3,1%	0,50%	3%
S [g/kg digestato]	2	0,2%	0,10%	2%
Ca [g/kg digestato]	12	1,2%	0,50%	5%
Mg [g/kg digestato]	5	0,5%	0,10%	1%
Fe [g/kg digestato]	6	0,6%	0%	0,5%

Tabla 30. Comparación: Digestato Obtenido/Límites Digestato Deseado.

De la *Tabla 30* se obtienen las siguientes conclusiones:

- El pH del digestato obtenido cumple con las especificaciones, pero está muy cerca del límite inferior. Se tiene un digestato que está cerca de ser ácido por lo que, si se quiere utilizar para cultivos en los que se necesite un digestato más alcalino, habrá que modificarlo para obtener el mayor rendimiento posible.
- El porcentaje de materia seca/humedad obtenido es un valor que se adapta perfectamente a lo buscado. Este indicador, es uno de los más importantes por lo que su adaptación a los límites definidos es un buen indicador.
- La cantidad de fósforo presente en el digestato es ligeramente inferior a la deseada. Para solucionar este problema se puede suplementar el producto obtenido con fósforo externo.
- La cantidad de potasio y hierro obtenidas en el digestato son ligeramente superiores a las deseadas. Pese a no ser un problema, ya que estos límites son más recomendaciones que restricciones, si se quisiera adaptar estos indicadores se podría diluir el producto obtenido y así bajar estos valores.
- La cantidad de fósforo presente en el digestato es ligeramente inferior a la deseada. Para solucionar este problema se puede suplementar el producto obtenido con fósforo externo.

7.2.2 ANÁLISIS DEL DIGESTATO OBTENIDO TRAS EL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN.

El digestato sale del digestor con una humedad media de 66,6%. Dado a que uno de los objetivos del proyecto es la obtención de un fertilizante de gran calidad, es necesario someter al digestato a una serie de postprocesos. En estos procesos se busca separar la fracción líquida del digestato, de la sólida, de este modo, los nutrientes presentes en el digestato se concentran para obtener un fertilizante de gran calidad. Para conseguirlo, el digestato se bombea hasta una unidad de deshidratación por centrifugación. En esta unidad se separa la fracción líquida de la sólida. Una vez separadas ambas fracciones, el digestato sólido está listo para ser utilizado como fertilizante, mientras que el digestato líquido puede ser sometido a otros procesos para extraer los nutrientes aún presentes en el o, por otra parte, utilizado como fertilizante de baja calidad. En el caso de este proyecto, este digestato líquido tiene valor económico nulo por lo que no es útil para el análisis.

Según los datos obtenidos del digestato a la salida del digestor se sabe cuál es la fracción sólida máxima que se puede obtener a partir de este producto, un 33,4%. Esto es, que por cada kilo que se obtiene de digestato tras el proceso de digestión anaerobia, como máximo 334 gramos son aprovechables para ser usados como fertilizante seco. En el proceso de deshidratación se busca obtener esta cantidad de fracción sólida a la salida. Como se ha explicado anteriormente en el punto 6.5.2 el digestato deshidratado que se obtiene a la salida de este proceso también contiene un 20% de humedad, esta fracción del digestato no se tiene en cuenta para el cálculo ya que se supone que el valor del digestato se concentra en su fracción seca ya que este 20% es agua. La composición del digestato seco a la salida del centrifugador/separador sería la mostrada en la siguiente tabla:

Composición del Digestato Seco	%
COT [g/kg digestato]	76,35%
N [g/kg digestato]	5,99%
P [g/kg digestato]	0,90%
K [g/kg digestato]	9,28%
S [g/kg digestato]	0,60%
Ca [g/kg digestato]	3,59%
Mg [g/kg digestato]	1,50%
Fe [g/kg digestato]	1,80%

Tabla 31. Composición del Digestato Seco a la salida del proceso de deshidratación.

El digestato obtenido tras el proceso es un digestato seco rico en nitrógeno(N) y potasio(K). Estos componentes junto con el fósforo(P), son los componentes fundamentales para obtener un fertilizante de gran calidad.

7.2.3 ANÁLISIS DEL DIGESTATO DISPONIBLE EN LA REGIÓN DE ESTUDIO-ANDALUCÍA.

Una vez se han calculado las características del digestato que se obtiene al final de cada proceso, se calcula cuantas toneladas anuales de digestato sólido y de digestato líquido se producirían en la región de estudio. Para ello utilizando los datos de la *Tabla 3. Residuos generados (ton kg/año) en los mercados de Andalucía*, y sabiendo los rendimientos de los procesos de digestión anaerobia y deshidratación, se obtienen los datos de digestato generado a lo largo del proceso.

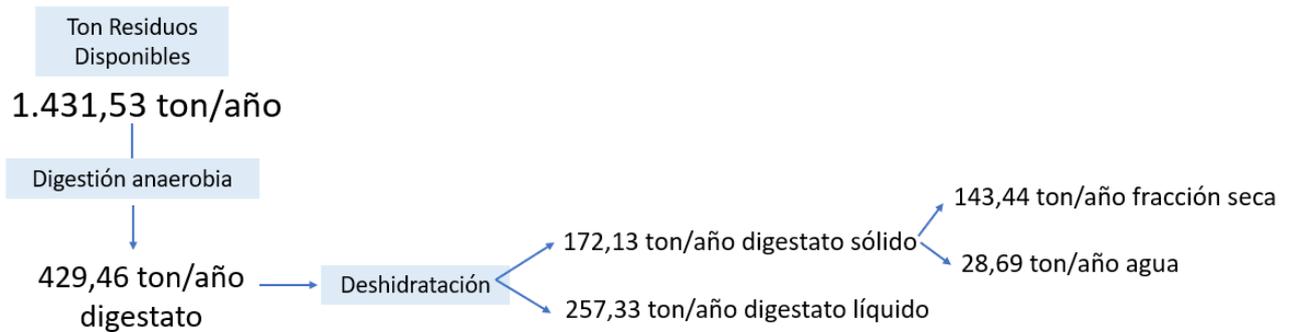


Ilustración 24. Esquema representativo del digestato en Andalucía.

En el esquema anterior se aprecia la cantidad de digestato disponible al final de los procesos. Se obtendría con estos datos 172,13 ton/año de digestato sólido, listo para ser utilizado como fertilizante orgánico, y 257,33 ton/año de digestato líquido que podrían procesarse para concentrarlo en un digestato de mayor valor, ser utilizado en la propia planta de biogás si se quiere diluir parte de los residuos que se incorporan al digestor (con el residuo de fruta y verduras no es necesario ya que es un residuo con mucha agua) o utilizarse en zonas de regadío de cultivos cercanos.

7.3 COMPARACIÓN CON FERTILIZANTE INORGÁNICO NPK.

El digestato es considerado un fertilizante orgánico, al tener como principal función el aporte de nutrientes a las plantas. Su alto contenido en nutrientes está disponible en forma mineral, lo que facilita su absorción por las plantas, obteniéndose un mayor rendimiento en los cultivos. Es por ello por lo que se realiza en este proyecto la comparación entre el digestato obtenido en el postproceso de deshidratación con un fertilizante inorgánico NPK.

Los fertilizantes inorgánicos NPK son un tipo de fertilizantes que presentan en su composición los macronutrientes esenciales nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Estos tres nutrientes, como se ha indicado anteriormente, son esenciales para el crecimiento de los cultivos y son requeridos en cantidades relativamente grandes.

El nitrógeno es esencial para el desarrollo del follaje verde. El fósforo es importante para el desarrollo de las raíces, flores y frutas. El potasio, por su parte, es fundamental para la resistencia de las plantas al estrés, la formación de flores y frutas, y la regulación del equilibrio hídrico.

Los fertilizantes inorgánicos NPK se fabrican a partir de compuestos químicos sintéticos y suelen estar disponibles en forma de gránulos, polvos o líquidos. Estos fertilizantes permiten a los agricultores y jardineros proporcionar a las plantas los nutrientes necesarios en las proporciones adecuadas, lo que ayuda a mejorar el crecimiento, la salud y el rendimiento de los cultivos. La proporción exacta de nitrógeno, fósforo y potasio en un fertilizante NPK se indica mediante un conjunto de números, como 10-10-10 o 20-10-5, que representan el porcentaje de cada nutriente en el producto.

En este apartado se calcula la cantidad de digestato necesaria para sustituir 1 kg de fertilizante inorgánico NPK 15-15-15 y se realiza posteriormente una comparación del impacto entre la utilización de ambos fertilizantes.

7.3.1 CÁLCULO DEL DIGESTATO NECESARIO PARA LA SUSTITUCIÓN.

En este subapartado se calcula cuantos kilogramos de digestato se necesitan a la salida del proceso de deshidratación y a la salida del digestor para sustituir a un kilogramo de fertilizante inorgánico NPK 15-15-15 (composición 15% N, 15% P₂O₅, 15% K₂O). Para ello hay que tomar los datos de la *Tabla 31. Composición del Digestato Seco a la salida del proceso de deshidratación* y de la *Tabla 15. Composición del digestato generado en la digestión anaerobia*. Gracias a estos datos se conoce la composición del digestato y especialmente de los elementos que interesan para el cálculo (N, P, K). A continuación, se muestra la tabla en la que se compara la cantidad de estos elementos dentro del producto en cada etapa:

Elemento	Salida del Digestor	Salida Centrifugador	Fertilizante NPK
N (Nitrógeno)	2,00%	5,99%	15,00%
Potasio (K)	3,10%	9,28%	15,00%*
Fósforo (P)	0,30%	0,90%	15,00%*

Tabla 32. Comparación de N, K, P en cada etapa (* realmente estos valores corresponden a P_2O_5 , y K_2O)

Para saber los kilogramos de digestato que se necesitan en cada etapa para sustituir a un kilogramo de fertilizante NPK (15-15-15) lo primero que se realiza es el cálculo para saber la cantidad de P_2O_5 , y K_2O que se tiene en el digestato, ya que los datos que se tienen son de P y K puros.

Para convertir el fósforo puro P, en P_2O_5 se debe multiplicar por el factor 2,29. Este factor se deriva de la relación de los pesos de las moléculas P_2O_5/P_2 , es decir:

$$\text{Peso de la molécula } P_2O_5 = 62 + (16 \times 5) = 142$$

$$\text{Peso atómico del P} = 31. \text{ Luego } P_2 = 31 \times 2 = 62$$

$$\text{Relación } P_2O_5/P_2 = 142/62 = 2,29$$

Ecuación 8. Cálculo del factor para la conversión del fósforo puro en P_2O_5 .

Para convertir el potasio puro K en K_2O se debe multiplicar por el factor 1,2046. Este factor se deriva de la relación de los pesos de las moléculas K_2O / K_2 , es decir:

$$\text{Peso atómico del K} = 39,1. \text{ Luego } K_2 = 39,1 \times 2 = 78,2$$

$$\text{Peso de la molécula } K_2O = (39,1 \times 2) + 16 = 78,2 + 16 = 94,2$$

$$\text{Relación } K_2O/K_2 = 94,2/78,2 = 1,204$$

Ecuación 9. Cálculo del factor para la conversión del potasio puro en K_2O

Aplicando estas conversiones se actualizan los datos de la *Tabla 32* para poder hacer una comparación exacta:

Elemento	Salida del Digestor	Salida Centrifugador	Fertilizante NPK
N (Nitrógeno)	2,00%	5,99%	15,00%
Potasio (K₂O)	3,73%	11,17%	15,00%
Fósforo (P₂O₅)	0,69%	2,06%	15,00%

Tabla 33. Comparación de N, K, P en cada etapa tras el ajuste con los factores.

A continuación, se calcula los kilogramos necesarios de digestato para obtener 150g de nitrógeno, 150g de K₂O y 150g de P₂O₅. Para ello se realizan las siguientes ecuaciones:

- Salida del Centrifugador/Deshidratador:

$$Kg \text{ digestato (150g N)} = \frac{15\% * 1kg}{5,99\%} = 2,505 \text{ kg}$$

Ecuación 10. Kg de digestato a la salida del centrifugador para 150g de N.

$$Kg \text{ dig. (150g K2O)} = \frac{15\% * 1kg}{11,17\%} = 1,343 \text{ kg}$$

Ecuación 11. Kg de digestato a la salida del centrifugador para 150g de K2O.

$$Kg \text{ dig. (150g P2O5)} = \frac{15\% * 1kg}{2,06\%} = 7,281 \text{ kg}$$

Ecuación 12. Kg de digestato a la salida del centrifugador para 150g de P2O5.

- Salida del Digestor:

$$Kg \text{ digestato(150g N)} = 2,505 \text{ kg dig. seco} * \frac{1kg \text{ dig. digestor}}{0,334kg \text{ dig. seco}} = 7,498kg$$

Ecuación 13. Kg de digestato a la salida del digestor para 150g de N.

$$Kg \text{ dig. (150g K2O)} = 1,343 \text{ kg dig. seco} * \frac{1kg \text{ dig. digestor}}{0,334kg \text{ dig. seco}} = 4,021kg$$

Ecuación 14. Kg de digestato a la salida del digestor para 150g de K2O.

$$Kg \text{ dig. (150g P2O5)} = 7,281 \text{ kg dig. seco} * \frac{1kg \text{ dig. digestor}}{0,334kg \text{ dig. seco}} = 21,80kg$$

Ecuación 15. Kg de digestato a la salida del digestor para 150g de P205.

Una vez calculadas las cantidades necesarias en cada salida de proceso, se recopilan estos datos un una tabla comparativa:

Elemento	Kg Salida del Digestor	Kg Salida Centrifugador	Kg Fertilizante NPK
150g N	7,498	2,505	1,00
150g K ₂ O	4,021	1,343	1,00
150g P ₂ O ₅	21,801	7,281	1,00

Tabla 34. Kilogramos de digestato necesarios en cada etapa del proceso.

Se aprecia en esta tabla que para sustituir un kilogramo de fertilizante inorgánico se necesitan cantidades del orden de 7 (N); 4 (K) y 21 (P) veces mayores de digestato que se genera en el digestor en el proceso de digestión anaerobia estudiado. Se debe seleccionar una cantidad para realizar las comparaciones de impacto ambiental entre ambos procesos (fertilizante generado con digestato vs fertilizante inorgánico NPK 15-15-15). Se decide que, debido a su importancia en los cultivos, se utiliza de referencia el dato obtenido para conseguir 150g de N (nitrógeno) por cada kilo de fertilizante. Esto es, 2, 505 kg a la salida del proceso de deshidratación y 7,498 kg a la salida del proceso de digestión anaerobia. Además, este dato aporta una cantidad de potasio parecida a la deseada (279,8 gramos por kilo de fertilizante NPK sustituido), de esta manera, se asegura que el aporte de nitrógeno y potasio sea el deseado. El contenido en fósforo del digestato obtenido en el proceso es muy limitado, es por ello por lo que se deberá de suplementar el fertilizante obtenido con este nutriente si se considera necesario.

Además, se decide realizar otra comparación, este caso se realizará la comparación en función a las unidades de fertilizante, esto es, si el fertilizante NPK tiene una concentración de 15% N, 15% P₂O₅, 15% K₂O, tiene un total de 45 unidades de fertilizante, mientras que el digestato estudiado tiene una composición a la salida del proceso de deshidratación de 5,99% N, 2,06% P₂O₅, 11,17% K₂O, por lo que tiene un total de 19,22 unidades de fertilizante. En este caso, para sustituir un kilogramo de fertilizante inorgánico se necesitarían:

$$\text{Kg digestato 45 unidades} = \frac{45}{19,22} = 2,34 \text{ kg digestato}$$

Ecuación 16. Kg de digestato necesarios para sustituir 1kg de fertilizante NPK según unidades de fertilizante.

Se calcula que se necesitarían 2,34 kg de digestato para obtener las mismas unidades de fertilizante que tendría 1 kilogramo de fertilizante NPK. Por lo tanto, se decide, que para realizar las comparaciones entre el fertilizante orgánico y el fertilizante NPK se utilizará la relación obtenida anteriormente en la que se calculan los kilogramos necesarios para obtener la misma cantidad de nitrógeno N, es decir, 2,505 kilogramos de digestato por cada kilo de fertilizante inorgánico. Esto se debe a que con este dato se obtendrían más unidades de fertilizante (48,15 unidades) y se estarían aportando los 150g de nitrógeno N deseados, que es el componente más importante.

7.3.2 COMPARACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE AMBOS FERTILIZANTES.

Tras realizar el análisis anterior, en el que se calcula la cantidad de digestato necesario para sustituir 1 kilogramo de fertilizante inorgánico NPK (15-15-15) se procede a realizar la comparación del impacto ambiental para comprobar si el fertilizante generado con el digestato obtenido de los procesos estudiados en este proyecto es ambientalmente sostenible si se compara con un fertilizante inorgánico genérico.

Esta comparación de impacto ambiental se realiza en el software de SIMAPRO, donde se tiene modelado el proceso completo para la obtención del digestato deshidratado que será utilizado como fertilizante orgánico. Para realizar esta comparación, lo primero que se realiza es la búsqueda del fertilizante NPK (15-15-15) en SIMAPRO, se escoge el proceso: “NPK (15-15-15) fertiliser {RoW}| NPK (15-15-15) fertiliser production | Cut-off, U” que simula la producción del fertilizante deseado. Una vez se ha escogido el proceso, se lleva a cabo la comparación con el proceso modelado a lo largo del proyecto, en este caso, se compara con el proceso creado “IAM TFM Digestato Deshidratado” que como se ha explicado anteriormente, simula el digestato seco listo para ser utilizado como fertilizante

obtenido al final de los procesos estudiados. Para realizar la comparación hay que tener en cuenta las cantidades calculadas en el apartado anterior, es decir, se compara 1 kg de fertilizante NPK con 2,505 kg de digestato deshidratado como se muestra en la siguiente ilustración:

Nombre
 Comparación entre fertilizante organico y NPK inor

Comentario

Función de cálculo

- Red
- Árbol
- Analizar
- Comparar

Método
 CML-IA baseline V3.07 / EU25

Producto	Cantidad	Ud.	Proyecto	Comentario
IAM TFM Digestato Deshidratado Bueno	2,505	kg	TFM Ignacio Alvaro	
NPK (15-15-15) fertiliser (RoW) NPK (15-15-15) fertiliser production Cut-off, U	1	kg	Ecoinvent 3 - allocati	

Librería actual Sufijo

Sustituyendo librería Sufijo

Interruptores

- Excluir procesos de infraestructura
- Excluir emisiones a largo plazo

Ilustración 25. Proceso para realizar la comparación del impacto ambiental en SIMAPRO.

Una vez introducidos los datos se obtienen los resultados del impacto ambiental de cada proceso. Estos resultados se muestran en la *Tabla 35* y se representan de manera gráfica en la *Ilustración 26*, ambas mostradas a continuación:

Categoría de impacto	Unidad	IAM TFM Digestato	NPK (15-15-15)	Diferencia
Abiotic depletion	kg Sb eq	4,00E-07	2,03E-05	-98%
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	1,176	12,882	-91%
Global warming (GWP100a)	kg CO2 eq	0,357	1,328	-73%
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	1,00E-08	6,00E-08	-87%
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	0,055	1,027	-95%
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0,039	0,692	-94%
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	90,577	1185,873	-92%
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	2,00E-04	0,002	-89%
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	2,00E-04	2,00E-04	4%
Acidification	kg SO2 eq	0,003	0,006	-50%
Eutrophication	kg PO4--- eq	0,001	0,002	-63%

Tabla 35. Comparación del impacto ambiental entre el digestato deshidratado y el fertilizante NPK.

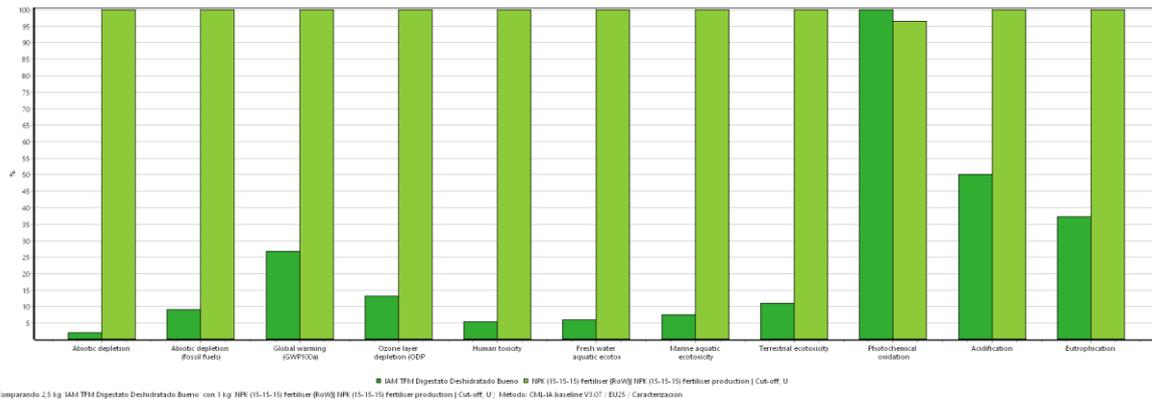


Ilustración 26. Grafica comparativa entre el digestato deshidratado y el fertilizante NPK.

Estos resultados confirman la hipótesis de que el digestato deshidratado genera un impacto ambiental mucho menor que el fertilizante inorgánico NPK. En la *Tabla 35* se muestra el impacto de cada proceso completo y se añade una columna que representa el ahorro o incremento que se produce con el digestato deshidratado frente al fertilizante NPK. Se comprueba como prácticamente en la totalidad de las categorías estudiadas el impacto generado por el digestato es mucho menor. En la categoría más importante para el estudio del impacto ambiental, Global warming (GWP100a), se obtiene una reducción del 73% de las emisiones que se generarían con el fertilizante inorgánico, es decir, se pasaría de generar 1,328 kg CO2 equivalentes, a generar 0,357 kg CO2 equivalentes.

7.3.3 ANÁLISIS DEL IMPACTO EN EL SECTOR AGRARIO DE ANDALUCÍA.

Para finalizar este análisis se calcula el impacto que tendría en el sector el uso de un fertilizante orgánico fabricado a base del digestato estudiado en este proyecto. Para ello se quiere obtener el dato de la cantidad de fertilizante inorgánico que se estaría sustituyendo por este fertilizante orgánico y cuanto representa esa cantidad en términos globales.

Como se ha calculado en el apartado 7.2.3, la cantidad de digestato seco que se obtiene a partir del residuo de fruta y verdura que se está analizando, es de 143,44 ton/año. En el apartado 7.3.1 se ha calculado la cantidad de digestato seco se necesita para sustituir un

kilogramo de fertilizante inorgánico NPK 15-15-15, se necesitan 2,505 kg. Con estos dos datos se procede a calcular el ahorro anual en fertilizantes inorgánicos:

$$\text{Ahorro ton/año} = \frac{143,44 \text{ ton} \frac{\text{dig. seco}}{\text{año}}}{2,505 \frac{\text{Kg dig. sec}}{\text{Kg fertilizante}}} = 57,26 \text{ ton/año}$$

Ecuación 17. Ahorro de fertilizante inorgánico NPK 15-15-15 (ton/año).

Se obtiene que anualmente se ahorrarían en torno a 57,26 toneladas de fertilizante. Para hacerse una idea más específica de lo que supone este ahorro, se calcula la producción de aceitunas que se cultivarían con este fertilizante que se ahorra.

La aceituna es el producto rey de la región de Andalucía, representa más del 60% de lo sembrado. Esto es, más de 1,5 millones de hectáreas, lo que supone más del 30% de la producción mundial de este producto. La cantidad exacta de fertilizante necesaria para obtener 1 kg de aceituna puede variar dependiendo de varios factores, como las condiciones del suelo, el clima, la variedad de olivo y las prácticas agrícolas utilizadas.

En promedio, se estima que se necesitan alrededor de 2 a 4 kg de fertilizante NPK por cada 100 kg de producción de aceitunas de olivo. Esto significa que, para obtener 1 kg de aceitunas, serían necesarios alrededor de 20 a 40 gramos de fertilizante NPK. En este ejemplo se supone que se necesitan 30 gramos de fertilizante NPK por cada kilogramo de aceituna, o lo que es lo mismo 0,03 toneladas de fertilizante por cada tonelada de aceituna. A continuación, se muestra la cantidad de aceitunas que se podrían obtener con el fertilizante orgánico producido con los residuos de fruta y verdura obtenido de los 5 mercados andaluces.

$$\text{Ton Aceitunas} = \frac{57,26 \text{ ton fertilizante}}{0,03 \frac{\text{ton fertilizante}}{\text{ton de aceituna}}} = 1908,716 \text{ ton aceitunas}$$

Ecuación 18. Toneladas de aceitunas cultivadas con fertilizante orgánico.

Se comprueba que con el fertilizante orgánico generado en este proyecto se podrían obtener alrededor de 2.000 toneladas de aceitunas anualmente. Teniendo en cuenta que el residuo aprovechable que se estudia es de 1.431,53 ton/año de residuo de fruta y verdura, se estaría generando en términos absolutos más de lo que se consume, es decir, más de lo que se desecha en los mercados estudiados.

Además, se lleva a cabo un estudio para calcular la reducción del impacto ambiental en términos globales que se produciría en Andalucía si se diese esta sustitución. Como se ha mostrado en la Tabla 35 del apartado anterior, la sustitución del fertilizante NPK por el fertilizante orgánico generado supone una reducción del 73% de las emisiones de CO₂. Para obtener el dato absoluto del ahorro que supondría anualmente se realiza en SIMAPRO una comparación entre ambos procesos como la realizada en el apartado anterior, pero esta vez se introducen 143,44 toneladas de digestato deshidratado y 57,26 toneladas de fertilizante NPK.

Nombre
 Comparación entre fertilizante organico y NPK inor

Comentario

Función de cálculo

- Red
- Árbol
- Analizar
- Comparar

Método
 CML-IA baseline V3.07 / EU25

Producto	Cantidad	Ud.	Proyecto	Comentario
IAM TFM Digestato Deshidratado Bueno	143,44	ton	TFM Ignacio Alvaro	
NPK (15-15-15) fertiliser (RoW) NPK (15-15-15) fertiliser production Cut-off, U	57,26	ton	Ecoinvent 3 - allocati	

Librería actual

Sustituyendo librería

Interruptores

- Excluir procesos de infraestructura
- Excluir emisiones a largo plazo

Ilustración 27. Modelado del análisis de impacto ambiental generado en Andalucía.

Se realiza la simulación y se obtiene el ahorro total que se produciría en un año si se llevara a cabo la sustitución estudiada. En la *Tabla 36* se muestra el ahorro de todas las categorías que ofrece SIMAPRO, de esta tabla se obtiene el dato del ahorro en la categoría de interés, Global warming (GWP100a), el cual se muestra en solitario en la *Tabla 37*.

Categoría de impacto	Unidad	Digestato Deshidratado	NPK (15-15-15)	Ahorro	Diferencia
Abiotic depletion	kg Sb eq	0,03	1,16	-1,14	-98%
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	67.347,62	737.607,34	-670.259,72	-91%
Global warming (GWP100a)	kg CO2 eq	20.448,36	76.035,04	-55.586,68	-73%
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0,0005	0,0035	-0,0030	-87%
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	3.170,85	58.803,46	-55.632,62	-95%
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	2.210,90	36.213,16	-34.002,26	-94%
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	5.186.564,20	67.903.066,00	-62.716.501,80	-92%
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	13,56	122,52	-108,96	-89%
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	10,69	10,33	0,36	4%
Acidification	kg SO2 eq	167,26	333,87	-166,60	-50%
Eutrophication	kg PO4--- eq	42,43	113,79	-71,36	-63%

Tabla 36. Ahorro del impacto ambiental anual en Andalucía.

Categoría de impacto	Unidad	Digestato Deshidratado	NPK (15-15-15)	Ahorro	Diferencia %
Global warming (GWP100a)	kg CO2 eq	20.448,36	76.035,04	-55.586,68	-73%
Global warming (GWP100a)	ton CO2 eq	20,45	76,04	-55,59	-73%

Tabla 37. Ahorro de emisiones anuales de CO2 en Andalucía,

Gracias a este estudio se obtiene que, si se utiliza el residuo anual de frutas y verduras generados en los grandes mercados de Andalucía para generar biogás, además de la obtención de este biogás, se puede obtener un digestato que si se trata para ser utilizado como fertilizante supondría el ahorro de 55,59 ton de CO2 eq.

Para hacerse una idea de lo que esto supone se calcula cuantos coches son necesarios para generar estas 55,59 ton de CO2 anuales. Para ello se obtiene que, por cada litro de gasolina consumido, un coche emite en promedio 2,35 kg de CO2 (Fuente: IDAE, Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía). Por otra parte, se sabe que según el estudio de movilidad de Arval publicado en 2020 un coche en España es utilizado de media unos 12.000 kilómetros al año. Por último, según el artículo “*Así se calcula el gasto de gasolina y el consumo de litros por kilómetro*” publicado en El País, se sabe que un coche de gama media consume un litro de combustible cada 15 kilómetros. Con estos datos se procede a calcular el ahorro:

$$\begin{aligned}
 \text{Emisiones de CO2 anuales (coche)} &= \frac{2,35 \text{ kg CO2/L} * 12000 \text{ km/año}}{15 \text{ km/L}} \\
 &= 1880,0 \text{ kg CO2/año}
 \end{aligned}$$

Ecuación 19. Emisiones anuales de CO2 generadas por un coche de gasolina.

$$\text{Coches equivalentes al ahorro producido} = \frac{55.586,68 \text{ kgCO}_2}{1.880,00 \text{ kgCO}_2/\text{coche}} = 29,6 \text{ coches}$$

Ecuación 20. Ahorro de emisiones en coches.

Gracias a estos cálculos se comprueba como el desarrollo de este proyecto eliminaría el impacto ambiental equivalente a 30 coches.

Por último, la sustitución del fertilizante inorgánico NPK por el fertilizante generado con el digestato deshidratado tiene una última ventaja. Además del ahorro ambiental, este fertilizante generado a partir de digestato aporta materia orgánica que es beneficiosa para el suelo de los cultivos. Según se ha mostrado en la *Tabla 31. Composición del Digestato Seco a la salida del proceso de deshidratación*. El porcentaje de COT que contiene el digestato seco es de 76%, este valor es un valor muy alto de materia orgánica que ayuda al mantenimiento del suelo. El carbono orgánico, además, es indispensable para la regulación del clima y el mantenimiento de la estabilidad al suelo, la disponibilidad de nutrientes para plantas, la capacidad de retención de agua y la biodiversidad del suelo, ya que proporciona el principal hábitat a los organismos edáficos (Muñoz-Rojas 2018; Soong et al. 2020). Todo esto hace que el fertilizante generado a partir de digestato, además de tener un menor impacto ambiental, sea de mayor calidad y más beneficioso para los cultivos.

Capítulo 8. CONCLUSIONES

En este último capítulo, se comentan las conclusiones del proyecto, destacando lo que se ha realizado, las aportaciones hechas y como se han cumplido los objetivos detallados en el Capítulo 4.

Con la elaboración de este proyecto se ha conseguido analizar el impacto ambiental del ciclo de vida del fertilizante a partir del digestato generado con el residuo de frutas y verduras de los grandes mercados nacionales, y específicamente de los mercados andaluces. Se ha podido comprobar como esta práctica ahorraría anualmente miles de toneladas de fertilizantes inorgánicos que tienen un impacto ambiental mucho mayor. Además, se consigue revalorizar un producto que había perdido todo su valor y estaba considerado como residuo, para generar este fertilizante y biogás.

Con este proyecto se evalúa y cuantifica el ahorro ambiental que supone esta práctica y se modela el proceso completo, desde su obtención, la composición del residuo, el modelado de los procesos y el análisis de los productos que se generan en cada proceso, hasta la comparación con un fertilizante genérico y la obtención de resultados. Al haberse seguido la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, en el proyecto se han descrito todos los pasos realizados para que pueda ser reproducido o modificado con facilidad.

Por último, cabe destacar que este proyecto está en línea con los objetivos marcados por la Unión Europea para la reducción de los residuos y fomentar la economía circular. Además de estar alineado con muchos ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) lo que demuestra su importante contribución a la sostenibilidad.

A continuación, se listan los resultados y logros obtenidos:

- Lo primero que se consigue con la elaboración del proyecto es el modelado completo y explicación detallada de una planta de tratamiento de residuos para la elaboración

de biogás y digestato. Además, se aporta un contexto actual en el que la elaboración de este proyecto favorece a mitigar los efectos del cambio climático y es provechoso para el medio ambiente.

- Se han analizado los datos proporcionados por los grandes mercados nacionales, se han cribado y se ha llevado a cabo un estudio para determinar la composición del residuo a utilizar en el proyecto. Este estudio se ha realizado de manera exitosa y se ha creado un residuo base que se compone de 22 productos con sus correspondientes porcentajes sobre la composición total.
- Adicionalmente, se ha realizado el modelado del sistema de transporte en la región de Andalucía. Determinando el transporte que se utilizará para trasladar los residuos generados en los grandes mercados a las posibles plantas de tratamiento de biogás, y la distancia entre cada punto de generación de residuos y el punto de tratamiento.
- Se ha elaborado exitosamente el modelado del proceso de digestión anaerobia del residuo estudiado en SIMAPRO. Para ello se ha tenido que modelar previamente el residuo utilizado, el transporte y se ha realizado la asignación de cargas de varias formas, escogiéndose la asignación por criterio económico.
- Posteriormente se ha obtenido el impacto ambiental del proceso de digestión anaerobia en la versión Cut Off y en la Versión APOS. Se han creado ambos procesos y se han detallado por escrito para su futura reproducibilidad.
- Se han comparado los procesos realizados en ambas versiones, obteniendo el impacto ambiental de cada una de ellas y se ha decidido que la Versión Cut Off es la que mejor se adapta a lo que necesita este proyecto.

- Se ha calculado el impacto ambiental que se produciría en la región de estudio, Andalucía, a lo largo de un año, si se generase biogás y digestato a partir del residuo estudiado en el proceso de digestión anaerobia modelado.
- Tras el modelado del proceso de digestión anaerobia se ha llevado a cabo el modelado del proceso de deshidratación. Para ello, se han estudiado tres tecnologías, seleccionando la Centrifugadora Decantadora como la más óptima debido a su alta eficiencia en la separación sólido-líquido. Una vez seleccionada la tecnología se ha modelado el proceso en SIMAPRO introduciendo los datos necesarios de entradas, salidas, consumos y emisiones.
- Se ha analizado el digestato obtenido a la salida del digestor y a la salida del proceso de deshidratación. Obteniéndose en cada caso las cantidades obtenidas, los rendimientos, los impactos ambientales de su generación y las fracciones líquidas y sólidas.
- Se ha llevado a cabo la comprobación de que el digestato obtenido es válido para su posterior uso como fertilizante. Se ha comprobado que el digestato que se genera en el proyecto es válido y se considera un digestato de valor.
- Una vez obtenidas las cantidades de digestato generadas en los procesos y su composición. Se compara el digestato seco obtenido a la salida del proceso de deshidratación que es considerado un fertilizante orgánico, con un fertilizante inorgánico NPK fabricado industrialmente.
 - En esta comparación se obtiene que gracias al fertilizante orgánico obtenido en este proyecto se pueden sustituir anualmente 57,26 toneladas de fertilizante inorgánico solo en la región de Andalucía.

- Esta sustitución lleva consigo una reducción de emisiones anuales de 55,59 toneladas de CO₂. Lo que ayudaría a reducir el impacto ambiental asociado a los cultivos donde se utilizase este fertilizante. Esta reducción de emisiones equivale a la eliminación de la huella generada por 30 coches de gasolina.
- Se obtiene que gracias al fertilizante generado con las 1.431 toneladas de residuos generados en los 5 grandes mercados de Andalucía se podrían cultivar 2000 toneladas anuales de aceitunas en esta región. Favoreciendo así la economía circular y el negocio de proximidad.
- Por último, el fertilizante orgánico generado tiene un alto contenido en materia orgánica (76% COT) lo que es beneficioso para el suelo y hace que este fertilizante sea de mayor calidad y más beneficioso para los cultivos.

Capítulo 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Secretaría de Estado de Energía. Hoja de ruta del biogás. Marzo 2022:
https://energia.gob.es/es-es/Novidades/Documents/00HR_Biogas_V6.pdf
- [2] Dirección General de Recursos Agrícolas y Ganaderos. EL SECTOR DEL BIOGÁS AGROINDUSTRIAL EN ESPAÑA. Septiembre 2020:
https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/requisitos-y-condicionantes-de-la-produccion-ganadera/DOCBIOGASVersion21-09-2010_tcm30-110139.pdf
- [3] MERCASA. Red de Mercas:
<https://www.mercasa.es/red-de-mercasa/>
- [4] INE (Instituto Nacional de Estadística) Cantidad de residuos generados por actividad económica (CNAE-2009), clase de residuo y tipo de peligrosidad:
<https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?tpx=30628>
- [5] The Global Goals. THE 17 GOALS.
<https://www.globalgoals.org/goals/>
- [6] SG de Medios de Producción Agrícolas y Oficina Española de Variedades Vegetales. Legislación de los productos fertilizantes. 2021:
https://www.mapa.gob.es/images/ca/ponencia-3_tcm34-622550.pdf
- [7] Nutriman. El uso del digestato como fertilizante en el norte de Europa. Abril 2021.
https://nutriman.net/sites/default/files/2021-04/Thematic_training_material_DIGESTATE_NE_ES.pdf
- [8] HTN Biogás, S.L. Dossier de Prensa HTN.pdf.
- [9] Planta de tratamiento de biogás Valdemingomez - Ayuntamiento de Madrid. Personal del centro.
- [10] Drosig, B., Fuchs, W., Al Seadi, T., Madsen, M., Linke, B. Agosto 2015. Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing. IEA Bioenergy, UK.
- [11] Ablieieva I. Yu., Geletukha G. G., Kucheruk P. P., Enrich-Prast A., Carraro G., Berezhna I. O., Berezhnyi D. M. (2022). Digestate potential to substitute mineral fertilizers: Engineering approaches. Journal of Engineering Sciences, Vol. 9(1)

- [12] Pedro Raúl Solorzano. Minuta Agropecuaria. P2O5 y K2O expresan el contenido de fósforo y potasio de los fertilizantes. 2018. P2O5 y K2O expresan el contenido de fósforo y potasio de los fertilizantes. - Minuta Agropecuaria
- [13] Junta de Andalucía. Aforo de producción de olivar en Andalucía. Octubre 2022:
https://www.juntadeandalucia.es/sites/default/files/inline-files/2022/10/Estimacion_ACEITE_MESA_2022_23.pdf
- [14] Statista. Valor de la Producción Agraria Final en España en 2021, por comunidad autónoma. <https://es.statista.com/estadisticas/1219154/agricultura-valor-de-la-produccion-en-espana-por-region/#:~:text=El%20valor%20de%20la%20producci%C3%B3n%20agr%C3%ADcola%20en%20Espa%C3%B1a%20super%C3%B3%20los,de%20producci%C3%B3n%20agr%C3%ADcola%20m%C3%A1s%20elevado.>
- [15] Mercamadrid. Estadísticas Productos Vendidos 2022:
<https://www.mercamadrid.es/estadisticas/>
- [16] Mercamadrid. Experiencia piloto con residuos orgánicos. Enero 2018:
<https://www.mercamadrid.es/experiencia-piloto-residuos-organicos/>
- [17] Cadis (Simapro Partner). Presentación de cómo realizar asignación de cargas en Simapro. Amalia Sojo 2020:
http://simapro.mx/archivos/SP_ACVETI_1_3_ASIGNACION.pdf
- [18] ICAI-4º GITI Ingeniería Medioambiental. Presentación: Life Cycle Impact Assessment (LCIA). Carlos Martín Sastre. 2022-2023.
- [19] Laboratorio del departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela Técnica superior de Ingeniería (ICAI).
- [20] Revista IMU, Ingeniería Municipal. Edición marzo | abril 2023.
- [21] AINIA Cómo convertir los residuos agroalimentarios en energía renovable para varios usos. 03 Julio 201:.
<https://www.ainia.es/ainia-news/como-convertir-los-residuos-agroalimentarios-en-energia-renovable-para-varios-usos/>
- [22] IDAE, Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía. Consumo y emisiones de CO2. <https://coches.idae.es/consumo-de-carburante-y-emisiones>
- [23] ARVAL. ESTUDIOS, ANÁLISIS, PREVISIONES Y TENDENCIAS DE LA MOVILIDAD. 2020.

https://www.arval.es/sites/default/files/inline-files/Arval_AMO_2020_0.pdf

[24] Nicole Olguín. El País. Así se calcula el gasto de gasolina y el consumo de litros por kilómetro. Mayo 2023.

<https://motor.elpais.com/conducir/asi-se-calcula-el-gasto-de-gasolina-y-el-consumo-de-litro-por-kilometro/>

[25] Eurofins. Análisis de Ciclo de Vida (ACV): qué es y para qué sirve. Abril 2021:

<https://www.eurofins-environment.es/es/analisis-de-ciclo-de-vida-que-es/>

[26] Simapro. Que es SIMAPRO:

<https://www.simapro.mx/>

[27] Sembralia. Fertilizantes NPK: ¿Qué son y para qué sirven? Agosto 2020:

<https://sembralia.com/blogs/blog/fertilizantes-npk>

[28] Renovables Verdes. La primera planta de biogás agroindustrial de Andalucía. German Portillo. Julio 2023:

<https://www.renovablesverdes.com/la-primera-planta-biogas-agroindustrial-andalucia/>

[29] COEMFRE Confederación Nacional de Empresarios Mayoristas de Frutas y Hortalizas de España. La red de mercas vende el 55% de frutas y hortalizas que se consumen en España. Junio 2016:

[30] <http://coemfe.com/2016/06/29/la-red-de-mercas-vende-el-55-de-frutas-y-hortalizas-que-se-consumen-en-espana/>

[31] Genia Bioenergy. Biofertilizantes de calidad a partir del digestato:

<https://geniabioenergy.com/biofertilizantes-a-partir-del-digestato/>

[32] Genia Bioenergy. El digestato: del residuo al recurso agrícola:

<https://geniabioenergy.com/digestato-del-residuo-al-recurso-agricola/>