



---

**Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal,  
Agronómica y de la Bioenergía**

**Campus de Soria**

**MÁSTER EN INGENIERÍA DE LA BIOENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA**

## **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**TÍTULO: Diseño de una planta de codigestión para la producción  
de biometano y fertilizante en la provincia de Soria**

~~~~~

**AUTOR: Laura Gabriela Rojas Delgado**

**DEPARTAMENTO: Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente**

**TUTOR/ES: Israel Diaz Villalobos  
Ignacio de Godos Crespo**

**SORIA, 21 DE JUNIO DE 2024**

# DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

D<sup>a</sup> Laura Gabriela Rojas Delgado, estudiante del Máster en Ingeniería de la Bioenergía y Sostenibilidad Energética de la Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal, Agronómica y de la Bioenergía de la Universidad de Valladolid, **DECLARO:**

Que el Trabajo Fin de Máster (TFM) que presento para su exposición y defensa titulado “Diseño de una planta de codigestión para la producción de biometano y fertilizante en la provincia de Soria”,

**es original y que todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo.**

Soria, 21 de junio de 2024

Fdo.: Laura Gabriela Rojas Delgado

# Resumen

Título: “Diseño de una planta de codigestión para la producción de biometano y fertilizante en la provincia de Soria”.

Departamento: Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente.

Tutores: Israel Diaz Villalobos e Ignacio de Godos Crespo.

Autor: Laura Gabriela Rojas Delgado

## Resumen:

Los residuos provenientes de regiones con alta actividad agrícola y ganadera como lo es Soria y la comarca de Almazán suponen un gran desafío en cuanto a su gestión. La digestión anaerobia de estos residuos orgánicos permite que sean revalorizados a un producto de alto valor como el biogás y fertilizantes.

Algunos residuos presentan ciertas limitantes en cuanto a la cantidad de biogás que pueden producir debido a su composición. Es por ello, que la realización de una codigestión anaerobia puede optimizar la producción de biogás si los sustratos que se escogen son complementarios entre sí. Un ejemplo de esto sería el caso a estudiar en este trabajo, donde se combinan con los purines y la paja de cereales. Los primeros tienen baja relación C/N y concentración de materia orgánica mientras que los segundos carecen de los nutrientes necesarios y tienden a acidificarse, por lo que su complementariedad permite mejorar la producción del biogás.

Este Trabajo Fin de Máster se centra en evaluar el potencial de producción de biogás y fertilizantes en la comarca de Almazán. Se diseña una planta de codigestión que emplee los sustratos más abundantes en esta localidad, analizando las tecnologías disponibles de upgrading acorde con la pureza que se quiere lograr del biometano y el potencial que tiene el biometano producido para su uso en vehículos.

Se obtuvo un potencial de producción de biogás de 4.717.565,26 m<sup>3</sup>/año y con un digestato (fertilizante) de 88.858.244,98 kg/año. Mientras que, para la planta de digestión se consideraron 3 digestores de 4000 m<sup>3</sup> de mezcla completa de tipo cilíndrico con cúpula y con agitación por bombeo. En cuanto al upgrading, se consideró adsorción con carbón activo impregnado para eliminar sulfuro de hidrogeno, enfriamiento y adsorción con gel de sílice para eliminar vapor de agua, y finalmente, para eliminar el dióxido de carbono se empleó membranas. El biometano que se obtiene luego del upgrading tiene el potencial de beneficiar a 2822 vehículos compactos.

**Palabras clave:** Codigestión anaerobia, residuos agrícolas y ganaderos, biogás, upgrading de biometano, fertilizante

# Abstract

Waste from regions with high agricultural and livestock activity, such as Soria and Almazán region, pose a significant challenge in terms of management. Anaerobic digestion of these organic waste allows for its revaluation, transforming it into a high-value product like biogas and fertilizers.

Some wastes products have limitations regarding the amount of biogas they can produce due to their composition. Therefore, performing anaerobic codigestion can optimize biogas if the chosen substrates are complementary. An example of this is the case to be studied in this work, where liquid manure from pigs and cereal straw are combined. The first have a low C/N ratio and organic matter concentration, while the latter lacks the necessary nutrients and tends to acidify. Their complementarity allows for improved biogas production.

This Final Master's Project (TFM) focuses on evaluating the potential for biogas and fertilizers in Almazán region. It designs a codigestion plant that utilizes the most abundant substrates in this area, analyzing available upgrading technologies according to the desired purity of biomethane and the potential of the produced biomethane for use in vehicles.

A biogas production potential of 4.717.565,26 m<sup>3</sup>/year and 88.858.244,98 kg/year of digestate (fertilizer) was obtained. For the digestion plant, three 4000 m<sup>3</sup> complete-mix digesters, cylindrical with a dome and agitation by pumping, were considered. Regarding upgrading, the process includes adsorption with impregnated activated carbon to remove hydrogen sulfide, cooling and adsorption with silica gel to remove water vapor, and membrane separation to remove carbon dioxide. The biomethane obtained after upgrading has the potential to benefit 2822 compact vehicles.

**Keywords:** Anaerobic codigestion, agricultural and livestock waste, biogas, biomethane upgrading, fertilizers

# Contenido

|                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD</b> .....                                                                 | i   |
| Resumen .....                                                                                                      | ii  |
| Abstract .....                                                                                                     | iii |
| Contenido .....                                                                                                    | iv  |
| Índice de tablas .....                                                                                             | v   |
| Índice de ilustraciones .....                                                                                      | v   |
| Introducción .....                                                                                                 | 1   |
| 1.1.    Introducción .....                                                                                         | 1   |
| 1.2.    Estado del Arte .....                                                                                      | 2   |
| 1.2.1.    Biogás y codigestión .....                                                                               | 2   |
| 1.2.2.    Upgrading .....                                                                                          | 5   |
| 2.    Objetivos .....                                                                                              | 7   |
| 2.1.    Objetivo general .....                                                                                     | 7   |
| 2.2.    Objetivos Específicos .....                                                                                | 7   |
| 3.    Metodología .....                                                                                            | 7   |
| 4.    Resultados y discusión .....                                                                                 | 8   |
| 4.1.    Identificación de los residuos disponibles para la codigestión .....                                       | 8   |
| 4.2.    Cuantificación del biogás .....                                                                            | 9   |
| 4.2.1.    Datos necesarios para calcular el biogás teórico .....                                                   | 9   |
| 4.2.2.    Cálculo de la relación C/N .....                                                                         | 10  |
| 4.2.3.    Cálculos del biogás teórico .....                                                                        | 10  |
| 4.2.4.    Resultados y discusión del cálculo de biogás teórico de la provincia de Soria y comarca de Almazán ..... | 11  |
| 4.3.    Diseño de la planta .....                                                                                  | 12  |
| 4.3.1.    Diseño del digestor .....                                                                                | 12  |
| 4.3.2.    Depósitos de almacenamiento .....                                                                        | 14  |
| 4.3.3.    Tuberías .....                                                                                           | 15  |
| 4.4.    Balance de energía .....                                                                                   | 16  |
| 4.4.1.    Requerimiento de calor del digestor (balance térmico) .....                                              | 16  |
| 4.4.2.    Requerimiento energético (balance energético) .....                                                      | 19  |
| 4.5.    Upgrading .....                                                                                            | 20  |
| 4.5.1.    Consideraciones sobre la tecnología a emplear .....                                                      | 20  |
| 4.6.    Fertilizante .....                                                                                         | 23  |

|      |                                                                          |    |
|------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.7. | Diagrama de bloque.....                                                  | 25 |
| 4.8. | Estimación de potencial para vehículos.....                              | 26 |
| 5.   | Conclusiones.....                                                        | 28 |
| 6.   | Bibliografía.....                                                        | 29 |
| 7.   | Anexos.....                                                              | 31 |
| 7.1. | Identificación de los residuos disponibles en la Provincia de Soria..... | 31 |
| 7.2. | Cálculo de relación C/N y cantidad de biogás.....                        | 33 |
| 7.3. | Concentraciones de los componentes del biogás.....                       | 35 |

## Índice de tablas

|            |                                                               |    |
|------------|---------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1.   | Residuos disponibles en la provincia de Soria.....            | 8  |
| Tabla 2.   | Materias primas por agrupación en Almazán.....                | 9  |
| Tabla 3.   | <i>Datos para cuantificación de biogás</i> .....              | 9  |
| Tabla 4.   | <i>Datos para relación C/N</i> .....                          | 10 |
| Tabla 5.   | Biogás teórico en la provincia de Soria.....                  | 11 |
| Tabla 6.   | Biogás teórico en la comarca de Almazán.....                  | 11 |
| Tabla 7.   | Resultados digestor.....                                      | 12 |
| Tabla 8.   | Resultados de diámetro y alturas.....                         | 14 |
| Tabla 9.   | Depósito de almacenamiento de purines.....                    | 14 |
| Tabla 10.  | Coeficiente de transmisión de calor global (Zhang, 2013)..... | 17 |
| Tabla 11.  | Resultados de calor perdido en el digestor.....               | 17 |
| Tabla 12.  | Datos para elevar la temperatura del sustrato.....            | 18 |
| Tabla 13.  | Componentes del biogás teórico.....                           | 21 |
| Tabla 14.  | Pureza requerida del biometano para vehículos.....            | 21 |
| Tabla 15.  | Balance de masa.....                                          | 22 |
| Tabla 16.  | Resultados de sólidos inertes y agua.....                     | 23 |
| Tabla 17.  | Resultados de digestato que se obtiene en la salida.....      | 23 |
| Tabla 18.  | Resultados del tanque de almacenamiento del digestato.....    | 24 |
| Tabla A 1. | Residuos Ganaderos de Soria.....                              | 31 |
| Tabla A 2. | Materias primas alimentarias de origen vegetal de Soria.....  | 32 |
| Tabla A 3. | Materias primas por agrupación en Almazán.....                | 32 |
| Tabla A 4. | Cálculo de relación C/N.....                                  | 33 |
| Tabla A 5. | Cálculo del potencial teórico de Soria.....                   | 34 |
| Tabla A 6. | Cálculo del potencial teórico Almazán.....                    | 34 |
| Tabla A 7. | Concentraciones de los componentes del biogás.....            | 35 |

## Índice de ilustraciones

|                |                                                            |    |
|----------------|------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1. | Digestor tipo cilindro con cúpula.....                     | 13 |
| Ilustración 2. | Temperatura media (°C) anual para Soria (AEMET, 2010)..... | 16 |

|                                                                                                       |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Ilustración 3. Diagrama de bloque del proceso. ....                                                   | 25        |
| Ilustración 4. Diagrama de bloque del upgrading. ....                                                 | 26        |
| <i>Ecuación 1. Relación C/N. ....</i>                                                                 | <i>10</i> |
| <i>Ecuación 2. Sólidos totales necesarios. ....</i>                                                   | <i>10</i> |
| <i>Ecuación 3. Tiempo de residencia hidráulico. ....</i>                                              | <i>12</i> |
| <i>Ecuación 4. Volumen del digestor. ....</i>                                                         | <i>12</i> |
| <i>Ecuación 5. Relación altura/diámetro. ....</i>                                                     | <i>13</i> |
| <i>Ecuación 6. Volumen del cilindro. ....</i>                                                         | <i>13</i> |
| Ecuación 7. Volumen de la cúpula. ....                                                                | 13        |
| Ecuación 8. Cálculo de diámetro de tuberías. ....                                                     | 15        |
| Ecuación 9. Calor perdido. ....                                                                       | 17        |
| Ecuación 10. Energía necesaria para elevar la temperatura del sustrato. ....                          | 18        |
| Ecuación 11. Energía térmica del biogás. ....                                                         | 18        |
| Ecuación 12. Balance global general. ....                                                             | 22        |
| Ecuación 13. Balance por componente. ....                                                             | 22        |
| Ecuación 14. Ecuación para calcular la densidad a partir de ecuación de estado de gases ideales. .... | 22        |

# Introducción

## 1.1. Introducción

La búsqueda de una transición energética para poder alcanzar la neutralidad climática en 2050 y la necesidad de gestionar los residuos orgánicos, ha impulsado la búsqueda de tecnologías que permitan transformar estos residuos en un producto de valor y aquí es donde entra en juego el biogás generado de una digestión anaerobia.

De acuerdo con el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) (2020), España cuenta con un gran potencial disponible para la producción de biogás, el cual ha ido creciendo de manera modesta comparado con el resto de Europa, ya que actualmente existen 146 instalaciones con una producción energética de 2,74 TWh (para el año 2020), cuyas plantas están asociadas a vertederos, depuración de aguas residuales, sector agropecuario e industrial. Se busca que para el 2030, se multiplique 3,8 veces la producción del año 2020 (Secretaría de Estado de Energía, 2022).

En el caso de Europa, se produjeron 21 bcm lo cual representa un 6 % del consumo de gas natural en Europa, mientras que, la producción de biometano solo creció de 3.5 bcm a 4.2 bcm. Un caso para resaltar es el de Dinamarca, cuya proporción de biometano en la red de gas estaba alrededor del 40% (EBA, 2024). En el 2019, Europa contaba con alrededor 18.943 instalaciones de producción de biogás, de las cuales 725 inyectaban el biometano generado a la red de gas (Secretaría de Estado de Energía, 2022; IDAE, 2020).

La gran ventaja que presenta la obtención de biogás a través de la digestión anaerobia es que este permite utilizar y darle un nuevo valor a los residuos ganaderos, agroindustriales, lodos de depuradoras (EDAR) y las fracciones orgánicas de los residuos sólidos urbanos (RSU) para obtener biogás y el digestato, este último se puede emplear como fertilizante, lo cual a su vez fomenta la economía circular.

Sin embargo, algunos residuos presentan cierta producción de biogás reducida debido a su composición. La codigestión anaerobia aprovecha la complementariedad de la composición de los residuos. Por ejemplo, los residuos ganaderos tienen una baja relación C/N y concentración de materia orgánica, pero tienen una concentración alta de nutrientes y capacidad de tapón. Por otro lado, los residuos alimentarios tienen una alta relación C/N y de materia orgánica, pero les falta ciertos nutrientes y suelen tener problemas de acidificación (Santolaria Capdevila, 2014). La combinación de ambos residuos puede lograr una buena complementariedad.

La provincia de Soria y la comarca de Almazán cuentan con una intensa actividad agrícola y ganadera, que seguramente genera una cantidad significativa de residuos orgánicos. La implementación de una planta de codigestión puede ayudar en la gestión de estos residuos, impulsando la producción de energía renovable de biometano y también de fertilizantes ricos en nutrientes.

Este Trabajo de Fin de Máster busca evaluar el potencial de producción de biogás y fertilizantes que tiene la provincia de Soria y la comarca de Almazán. Esto con el fin de diseñar una planta de codigestión que pueda aprovechar los residuos locales más abundantes, además se evaluará el posible uso del biometano como combustible para vehículos y se evaluará el mejor método de purificación del biometano para este uso.

Este proyecto se alinea con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, empezando con el objetivo 7 “Energía asequible y no contaminante” ya que se busca aumentar la producción de biometano y que sea empleado como fuente de energía renovable. El desarrollo de plantas de biogás fomenta la economía circular, por tanto, se ajusta al objetivo 12 “Producción y consumo responsable” debido a que promueve la gestión sostenible y eficiente de los residuos, revalorizándolos para darles otro uso. Finalmente, en la búsqueda por reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero, se ajusta al objetivo 13 “Acción por el clima”.

## 1.2. Estado del Arte

### 1.2.1. Biogás y codigestión

El biogás es una mezcla de gases resultante de una digestión anaerobia. La digestión anaerobia es un proceso biológico en ausencia de aire donde la materia orgánica biodegradable se degrada por acción de diversos microorganismos en productos como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y otros gases (Sebastián Nogués et al., 2010, p. 207), igualmente se obtiene un digestato que puede ser utilizado como fertilizante. Este proceso, además de ser una buena alternativa para el manejo de residuos, permite obtener energía renovable.

El digestato es el subproducto resultante de la digestión anaerobia que puede ser líquido, sólido o semilíquido. Su composición es, además de agua, materia orgánica parcialmente digerida, biomasa microbiana y materia inorgánica. Por esta composición, tiene uso potencial como fertilizante (Ramos Marín, 2015).

El proceso de una digestión anaerobia se divide en cuatro etapas:

1. **Etapas de hidrólisis:** Es la primera etapa, donde los microorganismos degradan la materia orgánica en compuestos como proteínas, carbohidratos y lípidos. Es la etapa limitante del proceso si el material orgánico es muy complejo (Barrio Pérez, 2019; Sebastián Nogués et al., 2010, p. 209).

2. **Etapa ácida:** En esta etapa los aminoácidos, azúcares y ácidos grasos se transforman en ácidos grasos volátiles de cadena corta (Barrio Pérez, 2019; Sebastián Nogués et al., 2010, p. 209).
3. **Etapa acetogénica:** Aquí los ácidos grasos volátiles se transforman en acetato, hidrogeno y dióxido de carbono (Barrio Pérez, 2019; Sebastián Nogués et al., 2010, p. 210).
4. **Etapa metanogénica:** Es la última etapa, donde las bacterias metanogénicas producen metano a partir del acetato, hidrogeno y dióxido de carbono (Barrio Pérez, 2019; Sebastián Nogués et al., 2010, p. 210).

Cuando se trata de procesos biológicos, hay ciertos parámetros que deben de tomarse con suma importancia y ser controlados constantemente. Según Flotats Ripoll et al. (2001), algunos de estos parámetros serían los siguientes:

- **pH y alcalinidad:** Dependiendo de la etapa en la que se encuentre el proceso, los microorganismos presentan una máxima actividad dentro de un rango de pH diferenciado (dentro de un rango neutro). Sebastián Nogués et al., (2010) explican que la alcalinidad es una medida de la capacidad tampón del medio; en una digestión anaerobia, el principal equilibrio que controla la alcalinidad es el dióxido de carbono/bicarbonato (p.245).
- **Potencial redox:** Deber ser suficientemente bajo para asegurar el desarrollo de poblaciones anaerobias estrictas.
- **Temperatura:** Una digestión anaerobia puede realizarse en tres diferentes rangos de temperatura. Psicrófilo: debajo de 20°C. Mesófilo: entre 30 a 40 °C. Termófilo: entre 50 a 70 °C. Con el aumento en el rango de temperaturas se aumenta la velocidad de crecimiento de las bacterias, la velocidad en la producción de biogás y una disminución de tiempos de retención.
- **Estabilidad, toxicidad e inhibición:** Las formas no ionizadas de los ácidos grasos volátiles, así como el amoniaco libre o el sulfuro de hidrógeno son inhibidores de importancia de las bacterias metanogénicas, sin embargo, es una inhibición de tipo reversible. Por su parte, los metales pesados son inhibidores o tóxicos a altas concentraciones.
- **Nutrientes:** Debe de haber una relación adecuada entre nutrientes para el desarrollo de las poblaciones bacterianas.

De este último parámetro es importante recalcar la relación Carbono – Nitrógeno (C/N). Esto se debe a que las bacterias metanogénicas utilizan el carbono y nitrógeno como su principal fuente de alimentación, donde el carbono les proporciona energía y el nitrógeno es necesario para la formación de nuevas células. Las bacterias metanogénicas consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de C/N debe de estar entre 20/1 y 30/1 (Barrios Pérez, 2019).

Si se cuenta con un exceso de nitrógeno es posible obtener una inhibición de la producción de metano a causa del aumento de amoniaco, mientras que, la falta de nitrógeno tiene consecuencias negativas en la formación de proteínas afectando

tanto la energía como el metabolismo del material estructural de los microorganismos (Deublein & Steinhauser, 2008).

Habitualmente los residuos ganaderos suministran la cantidad suficiente de concentración de nutrientes, siendo más común la presencia de problemas de exceso que por defecto de nutrientes. Una forma de equilibrar la relación C/N es mediante mezclas de residuos con diferentes relaciones de C/N (Mata Álvarez et al., 2000, como se citó en Santolaria Capdevila, 2014).

Es por ello que se emplea la codigestión que es el tratamiento que consiste en la mezcla de residuos de diferente origen y composición con el fin de mejorar el balance de nutrientes y características fisicoquímicas del sustrato que a su vez optimiza la producción de biogás que se puede obtener en la planta (Bernal-Martinez et al., 2020). Adicionalmente, la codigestión presenta otras ventajas, tales como las que se presentan a continuación:

- **Ventajas ambientales:** Al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al tener una mejor gestión de los residuos y, por otra parte, en el caso de los residuos ganaderos que contienen nitrógeno, se eliminan los residuos altamente contaminantes (Agencia Andaluza de la Energía, 2011).
- **Ventajas económicas:** Se pueden compartir las instalaciones de tratamientos para varios tipos de residuos, se amortiguan las variaciones en composición y producción de cada residuo por separado, lo que permite que se puedan reducir los costes de inversión y operación (Flotats Ripoll et al., 2001).

Debido a que este trabajo se enfoca en residuos ganaderos, especialmente los purines de cerdo, los tipos de digestores que se muestran a continuación son los empleados específicamente para este tipo de residuos, según Elías Castells, p. (2005, pp. 642-644):

- **Reactor-balsa o lagunas anaerobias:** son balsas profundas de aproximadamente 5 metros que funcionan durante largos periodos en condiciones anaerobias y a temperatura ambiente. Su superficie puede estar cubierta para recoger el biogás y minimizar la generación de malos olores. Sus desventajas incluyen la necesidad de requerir una gran cantidad de espacio, tienen bajas producciones relativas y son dependientes de la variación de la temperatura, especialmente las estacionales. Mientras que, sus ventajas son el bajo coste y permite emplear instalaciones preexistentes en las granjas.
- **Reactores discontinuos:** son reactores circulares o rectangulares empleados principalmente cuando se tienen residuos con consistencia sólida tales como los estiércoles de vacuno. Estos se alimentan con una mezcla de purín/estiércol e inóculo, esta relación inóculo/sustrato debe de ser estudiada previamente ya que este tipo de reactor suelen de ser inestables, además de que no son constantes las eliminaciones de sólidos volátiles.

- **Mezcla completa o CSTR:** son los reactores más comunes cuando se tienen residuos con más de 3% de sólidos. Cuya alimentación puede ser continua o semicontinua, constantemente agitados y suelen de tener calefacción con el fin de poder mantener la temperatura. Presentan la desventaja de pérdida de inoculo y baja eficiencia de cargas.
- **Reactores de flujo pistón:** estos reactores logran tiempos de retención más bajos que el equivalente de CSTR, esto significa menores volúmenes de reactores que, a su vez, puede reducir la inversión. Sin embargo, presentan una mayor complejidad tecnológica y de operación, por lo que suelen utilizarse para pequeños volúmenes de reacción.

### 1.2.2. Upgrading

A través del upgrading lo que se busca obtener es mejorar el porcentaje de biometano que se tiene del biogás, eliminando los otros componentes que se puedan encontrar en esta mezcla de gases, principalmente dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno. Principalmente se busca eliminar el sulfuro de hidrógeno, mientras que el dióxido de carbono reducirlo o eliminarlo dependiendo del uso de que se le quiera dar al biogás.

Las tecnologías de upgrading mediante la eliminación de dióxido de carbono, pueden ser químicas, físicas o biológicas, a continuación, se muestran las más relevantes, según Del Pino Gutiérrez (2022):

- **Lavado físico**  
Esta técnica aprovecha la solubilidad del dióxido de carbono frente al metano, donde se emplea una columna de absorción empacada con material de relleno y el biogás circula a contracorriente. Se emplea un líquido, ya sea agua o polietilenglicol (si es lavado orgánico), el cual es capaz de absorber dióxido de carbono.  
Entre sus ventajas tenemos que es un proceso simple, con bajo costes de operación y/o mantenimiento, con una pureza de metano de alrededor 96-98%. Sin embargo, es necesaria emplear grandes cantidades de agua y requiere una alta demanda energética.
- **Lavado químico**  
En este caso, el biogás circula a contracorriente con una solución química, usualmente dimetanolamina (DMEA) y monoetanolamina (MEA), y aprovechando la reactividad del dióxido de carbono se puede aumentar el porcentaje de metano. En este proceso es de suma importancia la temperatura ya que afectara la velocidad de la reacción.  
Las ventajas es que es un proceso más rápido y con mayor cantidad de dióxido de carbono disuelto por unidad de volumen, es decir, que se obtiene una pureza de metano bastante elevado >99%. Requiere una alta demanda de energía y pretratamiento previo.
- **Separación por membranas**  
Consiste en la separación mediante el uso de membranas como material permeable de los diferentes componentes que forman el biogás. Los tipos de

membranas pueden ser poliamida p acetato de celulosa, aunque existen también de carbón, silicio, zeolita y metales orgánicos. El proceso puede suceder dependiendo del estado de las corrientes: Separación gas-gas, donde el biogás es presurizado e inyectado en la membrana (requiere un pretratamiento que elimine el sulfuro de hidrogeno) y Separación gas-líquido, donde las impurezas son absorbidos por el líquido que circula a contracorriente.

Las ventajas es que un proceso sencillo y con bajos costos de mantenimiento como de consumo de energía. Pero al no alcanzar grandes selectividades, no se logran alcanzar grandes purezas del metano 92-96%.

En cuanto a la eliminación del sulfuro de hidrógeno, Morero et al. (2011) menciona las siguientes opciones:

- **Proceso seco de oxidación:** Este proceso se emplea cuando el contenido de azufre en el gas es bajo y se requiere una alta pureza. Los métodos empleados son: introducción de aire/hidrogeno dentro del sistema de biogás y adsorción química.

El primero es un proceso simple y de bajo costo, llegando a reducir el sulfuro de hidrogeno a menos de 50 ppm, pero esto dependerá de factores como la temperatura, el tiempo de la reacción y el lugar donde se agrega el aire.

El segundo método, se pone a reaccionar el sulfuro de hidrógeno con óxido de hierro, en una especie de esponja donde se hace pasar el gas, para formar sulfuro de hierro. Este método tiene la ventaja de ser fácil de operación y efectiva, sin embargo, es una tecnología que va disminuyendo su uso principalmente por los costos de operación y que se puede acumular una corriente continua de material de desecho agotado.

La adsorción química también puede llevarse a cabo con carbón activado, del cual se tiene tres tipos: como catalizador impregnado, carbones impregnados y carbones no impregnados.

- **Procesos de oxidación en fase líquida:** Es un proceso de absorción físico o químico, que se emplea a bajas concentraciones de sulfuro de hidrogeno. En el proceso de absorción física el sulfuro de hidrogeno es absorbido por un solvente, que suele ser agua con hidróxido de sodio para mejorar el proceso y formar sulfuro de sodio o hidrosulfuro de sodio. Mientras que, en la absorción química se emplea sólidos y líquidos (como, por ejemplo, quelato férrico) con torres de contacto batch o inyectarse directamente en la cañería del gas, el subproducto que se obtiene es separado y tratado como desecho.
- **Separación por membranas:** en este proceso se puede emplear zeolitas hidrofílicas para la adsorción del sulfuro de hidrógeno, como también se pueden emplear membranas de poliamida.
- **Procesos biológicos:** en este proceso se debe contar con bacterias que puedan mantener el carácter anaeróbico del gas y se puede convertir el sulfuro en azufre elemental.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo general

Evaluar el potencial de producción de biometano y fertilizantes en la provincia de Soria y en la comarca de Almazán, de acuerdo a los tipos de residuos disponibles, con el fin de diseñar una planta de codigestión.

### 2.2. Objetivos Específicos

- Identificar los residuos disponibles en la provincia de Soria y comarca de Almazán.
- Calcular el biometano disponible en la provincia de Soria y, específicamente, la comarca de Almazán.
- Diseñar de una planta de codigestión anaerobia utilizando los sustratos analizados de la comarca de Almazán.
- Identificar las técnicas de upgrading del biogás de acuerdo con la pureza que se quiere lograr del biometano.
- Elaborar un diagrama de bloques del proceso.
- Cuantificar el digestato disponible que puede utilizarse como fertilizante.
- Estimar el potencial que tiene el biometano producido en la planta de codigestión como combustible para vehículos.

## 3. Metodología

La metodología de trabajo será la siguiente:

- 1) Revisión bibliográfica para identificar los residuos disponibles en la provincia Soria y en la comarca de Almazán.
- 2) Cálculo de biometano disponible en la provincia de Soria y la comarca de Almazán.
- 3) Diseño de una planta de codigestión anaerobia utilizando los sustratos analizados de la comarca de Almazán.
- 4) Revisión bibliográfica sobre técnicas de upgrading del biogás, seleccionando las más adecuadas de acuerdo con la pureza que se quiere lograr del biometano.
- 5) Elaboración de un diagrama de bloques del proceso.
- 6) Análisis del postratamiento, gestión y utilización del digestato como fertilizante.
- 7) Estimación del potencial del biometano producido como combustible para vehículos.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Identificación de los residuos disponibles para la codigestión

A continuación, se muestran los residuos más relevantes para la provincia de Soria con sus respectivos rangos de la relación C/N:

Tabla 1. Residuos disponibles en la provincia de Soria

| Residuos disponibles en la provincia de Soria                   |                                 |                       |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| Tipo de residuo                                                 | Producción (t/año) <sup>1</sup> | C/N (rango)           |
| Purín de cerdo-cebo                                             | 335.460,00                      | 9-19 <sup>2</sup>     |
| Restos de otras especies-<br>ovejas y cabras (hembras y machos) | 120.235,00                      | 12-24 <sup>3</sup>    |
| Paja de cereal                                                  | 444.548,00                      | 80-150 <sup>2,4</sup> |

*Nota.* <sup>1</sup> los datos de producción de los residuos ganaderos son todos de la misma fuente: Alfonso et al., (2009). Mientras que la relación C/N viene de varias fuentes: <sup>2</sup>(Rynk et al., 1992), <sup>3</sup>(Adelekan & Bamgboye, 2009; Dioha et al., 2013) y <sup>4</sup>(Fry, 1973).

De acuerdo con lo observado en las Tabla 1. Residuos disponibles en la provincia de Soria, los residuos disponibles para la provincia de Soria más relevantes son los purines de cerdo y la paja de cereales (para ver los demás residuos disponibles, se puede observar los residuos en la Tabla A 1 y Tabla A2 en los Anexos). Es importante recalcar que, aunque existen otros materiales con porcentajes significativos dentro de esta tabla como lo son los residuos de ovejas y cabras, no se sabe exactamente cuántos corresponden a cada especie, por lo que se omitirán.

Otro punto por destacar es que, si bien los residuos mencionados anteriormente son los más significativos para la provincia de Soria, es posible que no estén ubicados cerca unos de otros. Esto implica que se debe de considerar el transporte de los residuos hasta la planta de codigestión. En este estudio, no se contempla una planta centralizada para la provincia, ya que esto implicaría la movilización de los residuos a utilizar desde diversas localidades hasta una sola planta, lo cual añade un coste adicional al proceso.

Por lo tanto, se decidió limitar los datos a la comarca de Almazán, donde sí sería viable una planta centralizada. Al limitar el alcance a una comarca específica, se facilita la gestión logística de los residuos en comparación con una planta centralizada a nivel provincial. Además, los ahorros en costes de transporte ayudan a que sea más viable el proyecto y permitiría evaluar posteriormente si este tipo de proyecto puede ser escalable a nivel de provincia.

A continuación, se muestran los residuos más relevantes en la comarca de Almazán con sus respectivos rangos de la relación C/N:

Tabla 2. Materias primas por agrupación en Almazán

### Materias primas por agrupación en Almazán

| Tipo de materia prima | Producción (t/año) <sup>1</sup> | C/N (rango)           |
|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|
| Purín de cerdo        | 87.720,00                       | 9-19 <sup>2</sup>     |
| Paja de cereal        | 78.222,00                       | 80-150 <sup>2,3</sup> |

Nota. <sup>1</sup> los datos de producción de los residuos ganaderos son todos de la misma fuente: Alfonso et al., (2009). Mientras que la relación C/N viene de varias fuentes: <sup>2</sup>(Rynk et al., 1992) y <sup>3</sup>(Fry, 1973).

Como se puede observar en la Tabla 2, los residuos más relevantes en la comarca de Almazán son los purines de cerdo y la paja de cereal (para ver los demás residuos disponibles, consulte la Tabla A3 en los Anexos). Estos dos sustratos han sido investigados ampliamente y, como se muestra en Tabla 2 con su relación C/N, se sabe que son complementarios. Por tanto, serán los sustratos que se emplearán en la planta de codigestión en este trabajo debido a su disponibilidad en la comarca y sus características complementarias para maximizar la producción de biogás.

## 4.2. Cuantificación del biogás

### 4.2.1. Datos necesarios para calcular el biogás teórico

Para iniciar el diseño de la planta de biometano, se debe primero cuantificar cuanto biogás se puede producir a partir de los sustratos escogidos. Adicionalmente, se necesitan datos sobre cada sustrato como el porcentaje de materia seca, porcentaje de sólidos volátiles y el rendimiento de biogás.

Tabla 3. Datos para cuantificación de biogás

|                                                | Purines de cerdo | Paja de cereal |
|------------------------------------------------|------------------|----------------|
| Porcentaje de materia seca <sup>1</sup>        | 3-10             | 86             |
| Porcentaje de sólidos volátiles <sup>2,3</sup> | 75%              | 91,10%         |
| Rendimiento de biogás <sup>1</sup>             | 0,3-0,8          | 0,2-0,5        |

Nota. <sup>1</sup> los datos de porcentaje de materia seca y rendimiento de biogás se obtienen de (Deublein & Steinhauser, 2008, pp. 60-62). Mientras que el porcentaje de sólidos volátiles viene de los informes de probiogás (informe de materias primas de origen ganadero e informe de materias primas alimentarias de origen vegetal) de: <sup>2</sup> (Alfonso et al., 2009, p. 8) y <sup>3</sup>(Alfonso et al., 2010, p. 27).

En cuanto a los datos que se muestran en un rango en la Tabla 3, en este caso se considera el promedio entre ambos números.

#### 4.2.2. Cálculo de la relación C/N

Como se menciona en el estado del arte, el valor ideal de esta relación C/N debe de encontrarse entre 20/1 y 30/1, así que a partir de la siguiente fórmula se puede calcular los sólidos totales de la paja de cereal que se necesitan para satisfacer la relación C/N y hacer la codigestión con los purines de cerdo.

Ecuación 1. Relación C/N

$$K = \frac{C_1 \cdot Q_1 + C_2 \cdot Q_2 + \dots C_n \cdot Q_n}{N_1 \cdot Q_1 + N_2 \cdot Q_2 + \dots N_n \cdot Q_n}$$

Donde:

K: C/N de la mezcla de materias primas.

C: Porcentaje de carbono orgánico contenido en cada materia prima.

N: Porcentaje de nitrógeno orgánico contenido en cada materia prima.

Q: Sólidos totales de cada sustrato (kg).

Despejando Q2, nos queda la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Sólidos totales necesarios

$$Q_2 = \frac{N_1 \cdot Q_1 \cdot \left[ K - \left( \frac{C}{N} \right)_1 \right]}{N_2 \cdot \left[ \left( \frac{C}{N} \right)_2 - K \right]}$$

Donde nos queda el cálculo para sólidos totales necesarios para el segundo sustrato a base de los datos de la relación C/N de cada sustrato.

Tabla 4. Datos para relación C/N

|                                  | Purines de cerdo                   | Paja de cereal                     |
|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Porcentaje de nitrógeno orgánico | 3,1 <sup>a</sup> -3,8 <sup>b</sup> | 0,7 <sup>a</sup> -0,5 <sup>b</sup> |
| Relación C/N                     | 14 <sup>a</sup> -15 <sup>b</sup>   | 80 <sup>a</sup> -150 <sup>b</sup>  |

Nota. <sup>a</sup>(Deublein & Steinhauser, 2008, pp. 60-62). <sup>b</sup>(Fry, 1973).

A partir de los datos de la Tabla 4, se calcular los sólidos totales de la paja de cereal necesarios.

#### 4.2.3. Cálculos del biogás teórico

Para calcular el biogás teórico, se realizó el siguiente procedimiento:

1. Cálculo de sólidos totales: se calcula con los datos de sustrato fresco (datos de probiogas) y con el promedio del porcentaje de materia seca. Queda en unidades de kg ST/año.

2. Cálculo de sólidos volátiles: se calcula con el valor resultante de sólidos totales y el porcentaje de sólidos volátiles. Queda en unidades de kg SV/año
3. Biogás teórico: se calcula con el valor resultante de sólidos volátiles y el rendimiento de biogás para cada sustrato. Queda en unidades de m<sup>3</sup>/año, aunque se puede después calcular para m<sup>3</sup>/día y m<sup>3</sup>/hora.

En el caso de la paja de cereal, se empieza el cálculo con la relación C/N donde se obtienen los sólidos totales que se necesitan para satisfacer la relación 30/1. De ahí se sigue el mismo procedimiento para calcular el biogás teórico, con la excepción que se determina también la cantidad de paja de cereal fresca que se necesita anualmente.

Se realizan estos cálculos para conocer el potencial de biogás en Soria como para la comarca de Almazán.

#### 4.2.4. Resultados y discusión del cálculo de biogás teórico de la provincia de Soria y comarca de Almazán

Consultar los anexos en las Tabla A 4, Tabla A 5 y Tabla A 6 para ver cómo se obtuvieron los siguientes resultados:

*Tabla 5. Biogás teórico en la provincia de Soria.*

|                                                                 |               |
|-----------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Cantidad de biogás de purines (m<sup>3</sup>/año)</b>        | 9.812.205,00  |
| <b>Cantidad de biogás de paja de cereal (m<sup>3</sup>/año)</b> | 8.228.771,32  |
| <b>Total cantidad de biogás (m<sup>3</sup>/año)</b>             | 18.040.976,32 |
| <b>Total cantidad de biogás (m<sup>3</sup>/día)</b>             | 49.427,33     |
| <b>Total cantidad de biogás (m<sup>3</sup>/hora)</b>            | 2.059,47      |

De la Tabla 5 se puede observar que se obtuvo un total de 18.040.976,32 m<sup>3</sup>/año, considerando la suma de ambos residuos. Esto representa una producción diaria de 49.427,33 m<sup>3</sup> y una producción horaria de 2.059,47 m<sup>3</sup>.

En cuanto a la comarca de Almazán, se obtuvieron los siguientes resultados:

*Tabla 6. Biogás teórico en la comarca de Almazán.*

|                                                                 |              |
|-----------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>Cantidad de biogás de purines (m<sup>3</sup>/año)</b>        | 2.565.810,00 |
| <b>Cantidad de biogás de paja de cereal (m<sup>3</sup>/año)</b> | 2.151.755,26 |
| <b>Total cantidad de biogás (m<sup>3</sup>/año)</b>             | 4.717.565,26 |
| <b>Total cantidad de biogás (m<sup>3</sup>/día)</b>             | 12.924,84    |
| <b>Total cantidad de biogás (m<sup>3</sup>/hora)</b>            | 538,53       |

De la Tabla 6 se puede observar que se obtuvo un total de 4.717.565,26 m<sup>3</sup>/año, considerando la suma de ambos residuos. Esto representa una producción diaria de 12.924,84 m<sup>3</sup> y una producción horaria de 538,53 m<sup>3</sup>.

Estos resultados demuestran el gran potencial que tiene Soria y la comarca de Almazán para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas y ganaderos. En este caso, Almazán representa alrededor de un 26% de toda la posible producción de biogás en Soria, un modelo piloto en esta comarca podría permitir evaluar la implementación de otras plantas de codigestión en las demás comarcas dentro de la provincia o incluso una centralizada en la provincia de Soria.

### 4.3. Diseño de la planta

#### 4.3.1. Diseño del digestor

El digestor que se va a utilizar en esta planta sería un tanque cilíndrico de mezcla completa (CSTR) con agitación de recirculación que trabaja a condiciones mesófilas a 35°C. Se seleccionó este digestor debido a que permiten tener una mezcla uniforme de los dos residuos seleccionados. Por su parte, la recirculación asegura de que se mantengan las condiciones del proceso y que se formen costras. La temperatura seleccionada es debido a que mientras más temperatura más eficiente es el proceso, garantizando así una mayor producción de biogás, pero sigue siendo una temperatura que no requiere un consumo excesivo de energía térmica.

A partir de la siguiente ecuación:

*Ecuación 3. Tiempo de residencia hidráulico.*

$$THR = \frac{V_D}{Q}$$

Donde THR: tiempo de retención hidráulica (día),  $V_D$  volumen del digestor ( $m^3$ ) y  $Q$  velocidad de carga ( $m^3/día$ ).

A partir de la

Ecuación 3, se despeja el volumen del digestor. Otras consideraciones que se deben de tomar en cuenta son las unidades de la velocidad de carga ( $m^3/día$ ), por lo que, se debe tomar en cuenta la densidad de la mezcla, en un estudio con los mismos sustratos tenían la siguiente densidad  $937,55 \text{ kg}/m^3$  (Barrio Pérez, 2019) y se emplea el flujo másico. Por otra parte, se debe de considerar un factor de corrección al volumen del digestor 1,24, esto es para tener en cuenta el volumen del gas. Por tanto, la ecuación queda así:

*Ecuación 4. Volumen del digestor.*

$$V_D = THR \cdot \frac{\dot{m}}{\rho} \cdot f$$

*Tabla 7. Resultados digestor.*

| <b>Digestor</b>                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| <b>THR (días)</b>                   | 30,00  |
| <b>densidad (kg/ m<sup>3</sup>)</b> | 937,00 |

|                                             |            |
|---------------------------------------------|------------|
| <b>flujo masico (kg/día)</b>                | 261.827,61 |
| <b>Q (m<sup>3</sup>/día)</b>                | 279,43     |
| <b>factor de corrección</b>                 | 1,4        |
| <b>Volumen del digestor (m<sup>3</sup>)</b> | 11.736     |

De la Tabla 7, se observa que se obtiene un volumen total de digestor de 11.736 m<sup>3</sup>, por lo que se consideraran 3 digestores de 4000 m<sup>3</sup>. Esto permitiría mejorar el manejo operacional, por si llega a existir alguna variación estacional de los sustratos que se van a utilizar. Además, el mantenimiento y reparación de 3 digestores más pequeños puede ser más fácil para limpiar y mantener, como también, no habría necesidad de parar la producción ya que mientras se hacen las obras en uno, el otro puede funcionar perfectamente.

Como se trata de un digestor de mezcla completa, se consideró del tipo cilindro vertical con una cúpula, parecido a la Ilustración 1. Para este caso se considera una relación altura/diámetro de 1/2.

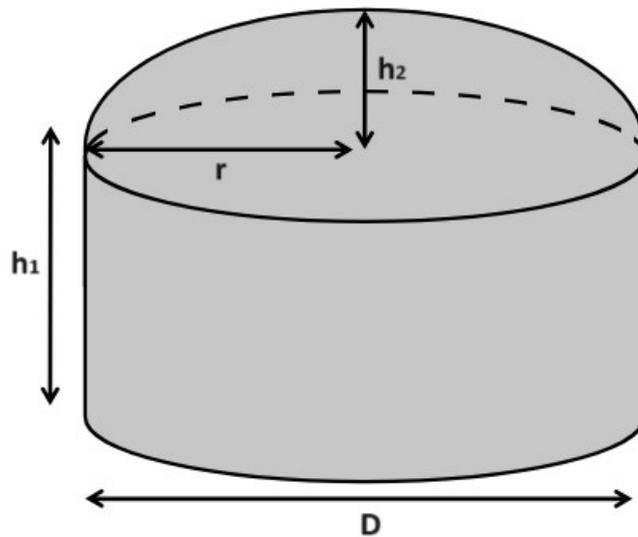


Ilustración 1. Digestor tipo cilindro con cúpula.

Ecuación 5. Relación altura/diámetro.

$$\frac{h}{D} = 1/2$$

Ecuación 6. Volumen del cilindro.

$$V_C = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot h_1$$

Ecuación 7. Volumen de la cúpula.

$$V_{cp} = \frac{\pi \cdot h_2}{6} \cdot (3r^2 + h_2^2)$$

Despejando y sustituyendo de la Ecuación 5 en la Ecuación 6, ya se puede conocer la altura y el diámetro del digester. En el caso de la Ecuación 7, se considera que  $h_2$  será la mitad de  $h_1$ . De esta forma, se obtienen que las alturas y el diámetro del digester (Considerar que en caso de quedar en fracción se redondea el valor):

Tabla 8. Resultados de diámetro y alturas.

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| <b>Diámetro (m)</b>                | 23 |
| <b>Altura <math>h_1</math> (m)</b> | 8  |
| <b>Altura <math>h_2</math> (m)</b> | 4  |

En cuanto a los materiales con los que se construirá el digester, se empleará hormigón reforzado (los tanques de preparación y de almacenamiento pueden ser de este material también) con alta resistencia a ataques químicos fuertes ya que pH varía durante la reacción y puede durar cierto periodo de tiempo en un pH más ácido. La parte del digester que esté en contacto con el gas no puede presentar zonas angulares.

La parte interior del digester debe agregar impermeabilización en la zona interna, se tienen dos opciones: pintura de poliuretano que puede ser una opción económica pero relativamente duradera y no requiere de tanto tiempo de trabajo para instalarlo; cemento asfáltico es la opción más duradera y dependiendo del grosor que se utilice, se puede evitar necesitar reparaciones complejas, pero es la más costosa de todas las opciones disponibles. Por lo que, la impermeabilización sería para este caso con poliuretano.

De igual forma, la parte exterior debe de aislarse para poder mantener las condiciones necesarias para la digestión anaerobia. Se empleará espuma de poliuretano.

#### 4.3.2. Depósitos de almacenamiento

Empleando nuevamente la Ecuación 3, se puede calcular el depósito de almacenamiento de purines. En este caso, se considera un tiempo de retención hidráulico de 10 días y una relación altura/diámetro de 1/4. Se obtiene los siguientes resultados:

Tabla 9. Depósito de almacenamiento de purines.

| <b>Depósito de Almacenamiento</b>  |            |
|------------------------------------|------------|
| <b>THR (días)</b>                  | 10,00      |
| <b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b> | 1.000,00   |
| <b>Flujo másico (kg/d)</b>         | 261.827,61 |
| <b>Caudal (m<sup>3</sup>/d)</b>    | 261,83     |

|                                             |      |
|---------------------------------------------|------|
| <b>Factor de corrección</b>                 | 1,25 |
| <b>Volumen del depósito (m<sup>3</sup>)</b> | 3273 |
| <b>Relación H/D</b>                         | 0,25 |
| <b>Diámetro (m)</b>                         | 9    |
| <b>Altura (m)</b>                           | 2    |

En cuanto a la paja de cereal, el sistema de almacenamiento es con silos, considerando una densidad de la paja de 100 kg/m<sup>3</sup> (AgroBioHeat, 2020) y de lo que se pueda almacenar de manera mensual. Se obtiene que en un mes el volumen necesario es de 6539 m<sup>3</sup>.

Esto se consideró de esta manera debido a que el volumen total que se necesitaría para guardar la paja de cereal necesaria para todo el año es de 78471 m<sup>3</sup>, lo cual implicaría un espacio enorme y no sería práctico, sobre todo porque la cosecha se realiza 1 vez al año. Por lo que, es mejor considerar que este último valor es el volumen total de todos los silos existentes distribuidos en los diferentes terrenos por la comarca de Almazán y que mensualmente, se transporta la paja de cereal necesaria hasta la planta.

Finalmente, se puede calcular el gasómetro o depósito de gas. De acuerdo a Deublein & Steinhauser (2008), la relación entre el volumen del digestor y el volumen del gasómetro se encuentra entre 1:1 a 1:3. En este caso, se emplea la relación 1:1, por lo tanto, el volumen del gasómetro será de 9819 m<sup>3</sup>.

En este caso específico, se puede considerar un gasómetro con cubierta móvil a baja presión. Esta elección es debido principalmente porque sería un almacenamiento temporal, antes de que sea usado para energía térmica o antes de que pase por el upgrading. Por lo que este es un sistema simple y de bajo coste operativo, que permite ser ajustado según las fluctuaciones en caso de que haya cambios según las temporadas.

El tanque de almacenamiento del digestato se podrá conseguir en la sección donde se cuantifica el fertilizante.

### 4.3.3. Tuberías

Para el cálculo de tuberías, se utiliza la siguiente ecuación para saber el diámetro de las tuberías:

*Ecuación 8. Cálculo de diámetro de tuberías.*

$$D = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{V \cdot \pi}}$$

Donde, Q es el caudal volumétrico (m<sup>3</sup>/s), V es la velocidad del fluido en el interior de la tubería (m/s).

En cuanto al caudal, este estará dividido entre tres, considerando que estas tuberías son las que transportan hacia los digestores.

| Tuberías                                        |         |
|-------------------------------------------------|---------|
| <b>Velocidad de flujo (m/s)</b>                 | 0,60    |
| <b>Caudal (m<sup>3</sup>/día)</b>               | 87,28   |
| <b>Caudal (m/s)</b>                             | 0,00101 |
| <b>Diámetro (m)</b>                             | 0,05    |
| <b>Diámetro (in)</b>                            | 1,82    |
| <b>Tamaño comercial de tuberías<sup>1</sup></b> | 2       |

Nota. <sup>1</sup> (Henares, 2023).

Las tuberías que se emplean son de material PVC para el trato con líquidos.

## 4.4. Balance de energía

### 4.4.1. Requerimiento de calor del digestor (balance térmico)

Para mantener las condiciones ideales para la generación del biogás, es necesario mantener la temperatura dentro de los parámetros para una digestión mesófila. Para los cálculos se escoge una temperatura de 35°C. También se buscó la temperatura media en la comarca de Almazán en la Asociación Estatal de Meteorología, como se observa en la siguiente Ilustración 2 la temperatura esta 10-12,5°C, por lo que la temperatura que se tomará será de 11,3°C.

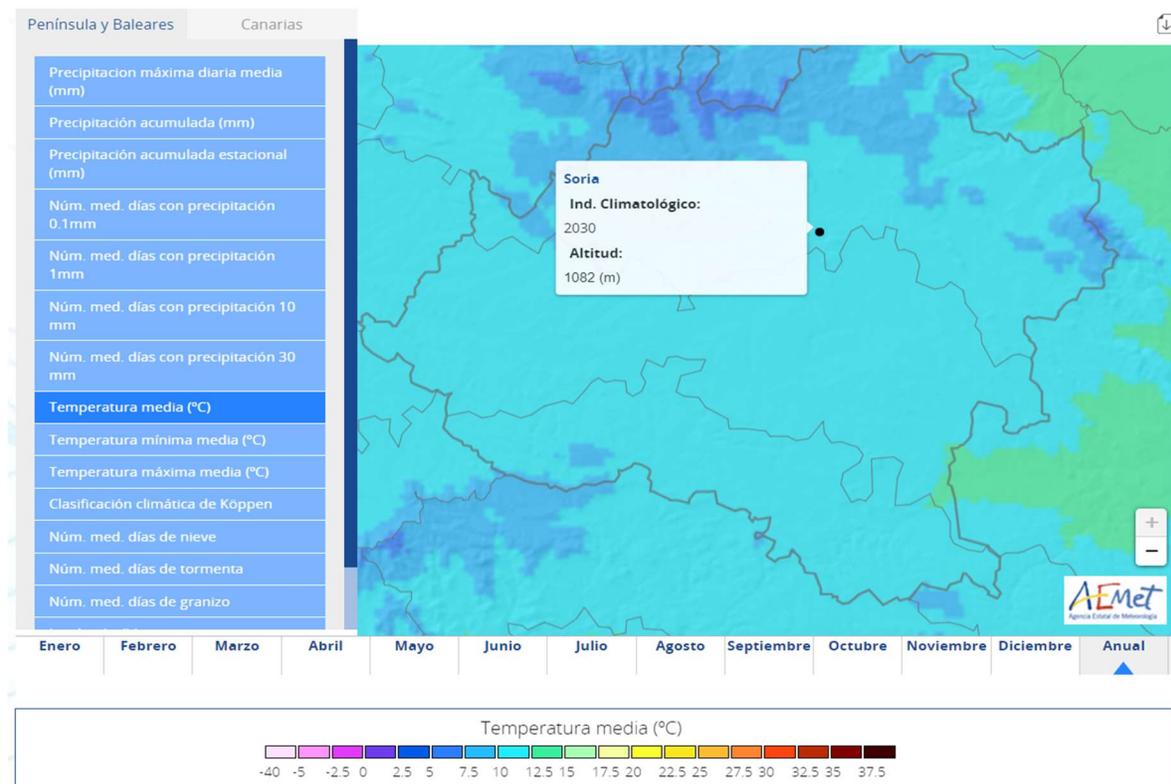


Ilustración 2. Temperatura media (°C) anual para Soria (AEMET, 2010).

Ecuación 9. Calor perdido.

$$\dot{Q}_{Digestor} = U \cdot A \cdot \Delta(T_1 - T_2)$$

Donde,  $\dot{Q}$  es el calor perdido (W), U es el coeficiente de transmisión de calor global (W/m<sup>2</sup>°C), A es el área de cada superficie del digestor y  $\Delta T$  es la diferencia entre la temperatura del digestor y la temperatura ambiente.

Los datos del coeficiente de transmisión de calor global se obtienen de la siguiente tabla:

Tabla 10. Coeficiente de transmisión de calor global (Zhang, 2013).

| Estructura                                                                | Coeficiente de transmisión de calor global (W/ m <sup>2</sup> °C) |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Pared de concreto de 300mm de espesor, sin aislamiento (en la superficie) | 4,7-5,1                                                           |
| Pared de concreto de 300mm de espesor, con aislamiento (en la superficie) | 0,6-0,8                                                           |
| Piso de concreto de 300mm de espesor (en contacto con tierra seca)        | 1,7                                                               |
| Cubierta de concreto fija de 100 mm de espesor con aislamiento de 25 mm   | 1,2-1,6                                                           |
| Cubierta flotante con aislamiento de 25 mm                                | 0,9-1,0                                                           |

Se obtiene los siguientes resultados:

Tabla 11. Resultados de calor perdido en el digestor.

| PARED                                                             |          |
|-------------------------------------------------------------------|----------|
| Área paredes (m <sup>2</sup> )                                    | 554,45   |
| Coeficiente de transmisión de calor global (W/ m <sup>2</sup> °C) | 0,8      |
| T1 (°C)                                                           | 35       |
| T2 (°C)                                                           | 11,3     |
| Calor perdido en la pared (W)                                     | 10512,34 |
| CUBIERTA                                                          |          |
| Área cubierta (m <sup>2</sup> )                                   | 276,50   |
| Coeficiente de transmisión de calor global (W/ m <sup>2</sup> °C) | 1,2      |
| T1 (°C)                                                           | 35       |
| T2 (°C)                                                           | 11,3     |
| Calor perdido en la cubierta (W)                                  | 7863,72  |
| SUELO                                                             |          |
| Área suelo (m <sup>2</sup> )                                      | 414,75   |
| Coeficiente de transmisión de calor global (W/ m <sup>2</sup> °C) | 1,70     |
| T1 (°C)                                                           | 35,00    |
| T2 (°C)                                                           | 11,30    |
| Calor perdido del suelo (W)                                       | 16710,41 |

| <b>TOTAL</b>                   |                 |
|--------------------------------|-----------------|
| <b>Calor perdido total (W)</b> | <b>35086,48</b> |

Para que nos quede en kWh/d, se realiza lo siguiente:

$$\dot{Q}_{total} = 35086,48 \text{ W} \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} = 842,08 \text{ kWh/d}$$

Para saber la energía necesaria que se requiere para el sustrato se emplea la siguiente ecuación, tal como aparece en Barrio Pérez (2019):

*Ecuación 10. Energía necesaria para elevar la temperatura del sustrato.*

$$E = Q \cdot \left( \frac{4,2 \text{ MJ}}{^{\circ}\text{C t}} \right) \cdot \Delta(T_1 - T_2)$$

Donde, Q es el caudal volumétrico diario (m<sup>3</sup>/d), el valor que le sigue es la capacidad calorífica específica y  $\Delta T$  es la diferencia entre la temperatura del digestor y la temperatura del sustrato que se considera igual a la temperatura ambiente.

A partir de la ecuación anterior, se obtiene el siguiente resultado:

*Tabla 12. Datos para elevar la temperatura del sustrato.*

|                                                  |          |
|--------------------------------------------------|----------|
| <b>Caudal (m<sup>3</sup>/día)</b>                | 279,43   |
| <b>T1 (°C)</b>                                   | 35,00    |
| <b>T2 (°C)</b>                                   | 11,30    |
| <b>Capacidad calorífica específica (MJ/°C t)</b> | 4,20     |
| <b>Energía necesaria (MJ/día)</b>                | 27814,64 |
| <b>Energía necesaria (kWh/día)</b>               | 7726,29  |

Finalmente, el consumo de energía térmica es:

$$\text{Energía térmica} = 7726,29 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} + 842,37 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} = 8568,37 \frac{\text{kWh}}{\text{d}}$$

Por lo que para estimar cuanto del biogás producido se necesitará para dar esta energía térmica, se empleará la siguiente ecuación:

*Ecuación 11. Energía térmica del biogás*

$$\text{Energía térmica} = Q_{biogás} \cdot PC \cdot \text{rendimiento}$$

Donde,  $Q_{biogás}$  es el caudal del biogás (m<sup>3</sup>/d), PC es el poder calorífico del biogás, el rendimiento es de acuerdo al equipo que se emplee para generar la energía térmica.

Considerando un PC:  $22.400 \text{ kJ/m}^3 = 6,22 \text{ kWh/m}^3$  (Sebastián Nogués et al., 2010, p. 302). En este caso, se empleará una caldera y se asumirá que su rendimiento esta alrededor de un 45%. Por tanto, el cálculo para saber cuánto biogás se necesitará al día para proporcionar la energía térmica calculada que de la siguiente manera:

$$Q_{\text{biogás}} = \frac{8568,37 \frac{\text{kWh}}{\text{d}}}{\left(6,22 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}\right) (0,45)} = 3061,23 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Dado que la cantidad de biogás que se produce al día es de  $12924,84 \text{ m}^3/\text{d}$ , el requerimiento de energía térmica se puede cumplir sin problemas, incluso para cuando se necesite más cantidad de biogás en días más fríos de la media considerada. La cantidad restante de biogás de  $9863,61 \text{ m}^3/\text{d}$  será al que se le hará el upgrading.

#### 4.4.2. Requerimiento energético (balance energético)

Se enfocará en los principales equipos para hacer el balance energético. Estos serían la trituradora de la paja de cereal y el sistema de agitación de los digestores.

Empezando por la trituradora de la paja de cereal, se utilizó como fuente de referencia (Tingshuang et al., 2001) donde muestran diferentes tipos de trituradoras para procesar paja de cereal. Se consideró una trituradora de tipo “kneading and cutting” 9LRZ-80. Tiene una potencia de 22 kW y dependiendo de la cantidad de humedad que tenga la paja fresca, su productividad es de 6-8 t/hora para una humedad de 40-70% o 3-5 t/hora para una humedad de 14-40%. Idealmente la paja de cereal no debe de tener tanto contenido de agua para evitar su descomposición mientras esta en el silo por lo que, se escogerá el valor de 3-5 t/hora para una humedad de 14-40%. El calculo queda de la siguiente manera:

$$\text{horas de trabajo} = 21498,85 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{5000 \text{ kg}} = 4,3 \text{ h/d}$$

$$\text{Energía eléctrica}_{\text{trituradora}} = 4,3 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot 22 \text{ kW} = 94,6 \text{ kWh/d}$$

En cuanto el sistema de agitación dentro de los digestores sería a través de bombeo interno. Para este cálculo se considera que la potencia recomendada sería de  $5 \text{ W/m}^3$  del reactor. Otra consideración es que solo se tomará el volumen del cilindro (es decir, como el digestor es de tipo cilindro con cúpula, solo se tomará el volumen del cilindro para este cálculo):

$$\text{Potencia} = \frac{5 \text{ W}}{\text{m}^3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{23 \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot 8 \text{ m} = 16619,03 \text{ W} \cong 17 \text{ kW}$$

$$\text{Energía eléctrica}_{\text{sist.agitación}} = 17 \text{ kW} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} = 408 \text{ kWh/d}$$

Se multiplica ese valor por el número de digestores, que sería 3.

En cuanto a la bomba encargadas de transportar los sustratos desde el tanque de almacenamiento de los purines hasta los digestores, se calcula según (Deublein & Steinhauser, 2008, p. 410) considerando el volumen del digestor y asumiendo que el tiempo que debería tomarle para llenar el digestor es de 5 h al día con una presión de cabezal de 1 bar y una eficiencia considerada de 0.5. El cálculo queda de la siguiente manera:

$$\text{capacidad del motor} = \left( \frac{\pi \cdot \left(\frac{23 \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot 8 \text{ m}}{18000 \text{ s}} \right) \cdot \frac{100000 \text{ Pa}}{0.5} = 36931,16 \text{ W} \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}}$$

$$= 36.93 \text{ kWh/d}$$

Se multiplica ese valor por el número de digestores, que sería 3.

El consumo de energía eléctrica se puede resumir de la siguiente manera:

| <b>Consumo de Energía Eléctrica</b> | <b>kWh/d</b> |
|-------------------------------------|--------------|
| <b>Trituradora</b>                  | 94,6         |
| <b>Sistema de agitación</b>         | 1224         |
| <b>Bombas</b>                       | 110,79       |
| <b>TOTAL</b>                        | 1429,39      |

Si bien, existen otros equipos de crucial importancia, tales como la transportadora de la paja de cereal desde el silo hasta el tanque de premezclado, así como los compresores necesarios para realizar el upgrading a las condiciones de trabajos de cada tecnología, en este trabajo no se realizarán los cálculos correspondientes a estos equipos.

Esto se fundamenta en enfocar los consumos eléctricos a aquellos componentes esenciales para el funcionamiento óptimo del digestor, que en este caso sería la trituradora, para asegurar que la degradación con la paja de cereal sea la óptima y el sistema de agitación dentro del digestor, un componente esencial para la digestión anaerobia. Por otra parte, estos componentes probablemente sean los que presenten un mayor impacto en el consumo eléctrico.

## 4.5. Upgrading

### 4.5.1. Consideraciones sobre la tecnología a emplear

Para realizar el upgrading se deben de hacer ciertas consideraciones, empezando por los componentes que se encuentran en el biogás y sus concentraciones. De acuerdo con las diferentes referencias bibliográficas consultadas se realizó una tabla con las diferentes concentraciones de los componentes del biogás (esta tabla puede consultarse en los anexos Tabla A 7) y a partir de esa tabla se realizó un promedio para el metano y sulfuro de hidrogeno, y se consideró que lo restante es dióxido de carbono y vapor de agua. Estos valores se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla 13. Componentes del biogás teórico.

|                                            | Porcentaje de concentración |
|--------------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Metano CH<sub>4</sub></b>               | 65%                         |
| <b>Dióxido de carbono CO<sub>2</sub></b>   | 33%                         |
| <b>Sulfuro de hidrogeno H<sub>2</sub>S</b> | 800 ppm                     |
| <b>Vapor de Agua</b>                       | 2%                          |

Debido a que el caso práctico que se le quiere dar al biometano que se obtiene es para ver cuántos vehículos puedan beneficiarse de este se debe de conocer el porcentaje de pureza que se requiere, según Deublein & Steinhäuser, (2008) como se citó Sebastián Nogués et al., (2010):

Tabla 14. Pureza requerida del biometano para vehículos

| Componentes del gas                        | % Para vehículos ISO/DIS15403 |
|--------------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Metano CH<sub>4</sub></b>               | >96%                          |
| <b>Dióxido de carbono CO<sub>2</sub></b>   | <3%                           |
| <b>Sulfuro de hidrógeno H<sub>2</sub>S</b> | ≤5mg/m <sup>3</sup> N         |
| <b>Vapor de Agua</b>                       | 0,03 g/ m <sup>3</sup> N      |

Por tanto, las tecnologías que se deben de considerar para lograr los valores anteriores serían las siguientes, tomando como referencia para las condiciones de trabajo las citadas en (Sebastián Nogués et al., 2010, pp. 281-291):

- 1) Para eliminar sulfuro de hidrógeno H<sub>2</sub>S, se propone la siguiente tecnología: adsorción sobre carbón activo impregnado. Ya que no se considera el oxígeno presente en el biogás y no será necesario inyectar aire. Además, tiene una simplicidad operativa que permitirá reducir el valor de H<sub>2</sub>S dentro del parámetro establecido. El agente impregnante es yoduro de potasio, con condiciones de trabajo: Temperatura=50°C y Presión=7,5 bar, permite que el sulfuro de hidrogeno que quedé este a 5 mg/ m<sup>3</sup>N.
- 2) Para eliminar el vapor de agua, se propone las siguientes tecnologías: enfriamiento y adsorción con gel de sílice. Con el enfriamiento se puede condensar el vapor de agua y el uso posterior del carbón activo permitirá además de que se pueda eliminar trazas de otros contaminantes. Con estas tecnologías se puede alcanzar el valor requerido. En primer proceso la temperatura es de -5°C con una presión de 10 bar, manteniendo la misma presión para el proceso de adsorción, pero con una temperatura ahora que se asume que estará alrededor de 25°C.
- 3) Para eliminar dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, se propone la siguiente tecnología: membranas. Debido a que permite obtener los valores requeridos de CO<sub>2</sub>, pero también permitirá eliminar trazas de contaminantes que podrían haber pasado por las etapas anteriores. Es importante mencionar, que si se quiere considerar este método para eliminar cualquier traza residual que haya quedado de sulfuro de hidrogeno, lo ideal sería que el material de la membrana sea una poliamida. Se asume una temperatura=25°C y

presión=13 bares (Ardolino et al., 2021) La eliminación con membranas tiene una eficiencia mayores o iguales a 99.5%.

#### 4.4.2. Balance de masa

Considerando los valores anteriores se procede a realizar el balance de materia, empleando las siguientes ecuaciones:

*Ecuación 12. Balance global general*

$$\dot{m}_{inicial} = \dot{m}_{eliminar} + \dot{m}_{final}$$

Donde,  $\dot{m}_{inicial}$  será el flujo másico inicial y luego será el que se obtenga después de que se vaya eliminando cada componente;  $\dot{m}_{eliminar}$  será el flujo másico de cada componente que se vaya eliminando, es decir, empezando con H<sub>2</sub>S, vapor de agua y terminado con CO<sub>2</sub>;  $\dot{m}_{final}$  será el flujo másico que se obtenga luego de cada proceso de eliminación hasta obtener el flujo de metano.

*Ecuación 13. Balance por componente*

$$\dot{m}_{inicial} \cdot x_{componente_i} = \dot{m}_{final} \cdot x_{componente_e} + \dot{m}_{final} \cdot x_{componente_f}$$

Donde,  $x_{componente_i}$  será la fracción inicial del componente a eliminar con los valores que se muestran en la Tabla 13;  $x_{componente_e}$  será la fracción para el flujo másico que se eliminará es siempre 1;  $x_{componente_f}$  será la fracción final del componente a eliminar con el valor que se muestran en la Tabla 14.

Considerando la ecuación de gases ideales: PV=nRT, se empleará para determinar la densidad de los gases a las condiciones de entrada asumiendo temperatura ambiente de 25°C y 1,01325 bar.

*Ecuación 14. Ecuación para calcular la densidad a partir de ecuación de estado de gases ideales*

$$\rho = \frac{P \cdot M}{R \cdot T}$$

Donde, P es la presión, M es la masa molar promedio de los gases, R la constante de los gases ideales y T es la temperatura en Kelvin. Se obtuvo una densidad de 1,04 kg/m<sup>3</sup>, con este dato ya se puede calcular el flujo másico inicial.

*Tabla 15. Balance de masa.*

| Balance de masa                                   |        |
|---------------------------------------------------|--------|
| Flujo másico inicial del biogás (kg/h)            | 425,62 |
| Eliminación de H <sub>2</sub> S                   |        |
| Flujo másico de salida de H <sub>2</sub> S (kg/h) | 0,34   |
| Flujo másico de final biogás (kg/h)               | 425,28 |

|                                               |        |
|-----------------------------------------------|--------|
| <b>Eliminación de vapor de agua</b>           |        |
| <b>Flujo másico de salida de H2O (kg/h)</b>   | 6,95   |
| <b>Flujo másico de final biogás (kg/h)</b>    | 418,33 |
| <b>Eliminación de CO2</b>                     |        |
| <b>Flujo másico de salida de CO2 (kg/h)</b>   | 136,64 |
| <b>Flujo másico de final biometano (kg/h)</b> | 281,69 |

A continuación, se muestran los resultados que se obtuvieron del balance de masa: En la Tabla 15, se observan los resultados que se obtuvieron del balance de masa. Se obtuvo un flujo másico de biometano de 281.69 kg/h.

#### 4.6. Fertilizante

Para estimar la cantidad de digestato que sale se deben de considerar los sólidos inertes que serían los componentes de la materia que no se descomponen en la digestión anaerobia (es decir, la materia inorgánica), para obtener la cantidad de sólidos inertes se restan los sólidos volátiles de los sólidos totales. Adicionalmente se calcula el agua presente en los sustratos, restando los sólidos totales del flujo másico inicial y el valor que se obtenga será el mismo en la salida. Finalmente, se considerará que el purín se degrada alrededor de un 85%, mientras que la paja de cereal al tener ciertos componentes como, por ejemplo: la lignina, se eliminará un 50%.

A continuación, se muestran los resultados para la entrada:

Tabla 16. Resultados de sólidos inertes y agua.

| Entrada                              | Purín         | Paja         | Total         |
|--------------------------------------|---------------|--------------|---------------|
| <b>Flujo másico (kg/año)</b>         | 87.720.000,00 | 7.847.078,57 | 95.567.078,57 |
| <b>Sólidos totales (kg ST/año)</b>   | 5.701.800,00  | 6.748.487,57 | 12.450.287,57 |
| <b>Sólidos volátiles (kg SV/año)</b> | 4.276.350,00  | 6147872,18   | 10.424.222,18 |
| <b>Sólidos inertes</b>               | 1.425.450,00  | 600.615,39   | 2.026.065,39  |
| <b>Agua</b>                          | 82.018.200,00 | 1.098.591,00 | 83.116.791,00 |

Los resultados para la salida se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 17. Resultados de digestato que se obtiene en la salida.

| Salida                               | Purín         | Paja         | Total         |
|--------------------------------------|---------------|--------------|---------------|
| <b>Flujo másico (kg/año)</b>         | 84.085.102,50 | 4.773.142,48 | 88.858.244,98 |
| <b>Sólidos totales (kg ST/año)</b>   | 2.066.902,50  | 3.674.551,48 | 5.741.453,98  |
| <b>Sólidos volátiles (kg SV/año)</b> | 641.452,50    | 3.073.936,09 | 3.715.388,59  |
| <b>% eliminación</b>                 | 85            | 50           | -             |
| <b>Sólidos inertes (kg/año)</b>      | 1.425.450,00  | 600.615,39   | 2.026.065,39  |

|             |               |              |               |
|-------------|---------------|--------------|---------------|
| <b>Agua</b> | 82.018.200,00 | 1.098.591,00 | 83.116.791,00 |
|-------------|---------------|--------------|---------------|

De la Tabla 17 se observa que digestato total que se obtiene es de 88.858.244,98 kg/año, donde un el 83.116.791,00 kg/año es de agua mientras que los sólidos totales son de 5.741.453,98 kg/año.

También, se calculó con el total inicial, el porcentaje de sólidos totales obteniendo 13,03% y el porcentaje de sólidos volátiles es de 10,91%. Para los valores de salida, el porcentaje de sólidos totales es de 6,46% y el porcentaje de sólidos volátiles es de 4,18%. La reducción en ambos casos significa la degradación de los sustratos y materia orgánica durante el proceso de digestión anaerobia y que se han transformado en biogás.

Conociendo el flujo másico, se puede calcular el tanque de almacenamiento de los purines. Se considera un tanque cilíndrico, con una relación altura/diámetro similar a la del depósito de almacenamiento, lo único que cambia sería el tiempo de retención hidráulica, que debe de ser de al menos 100 días (Martínez Hernández & Francesena López, 2018) y el factor de corrección es de 1,1 por cualquier gas que se pueda generar (Deublein & Steinhäuser, 2008). Siguiendo estas consideraciones, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 18. Resultados del tanque de almacenamiento del digestato.

| <b>Tanque de Almacenamiento del digestato</b>   |            |
|-------------------------------------------------|------------|
| <b>THR (días)</b>                               | 100,00     |
| <b>Densidad (kg/ m<sup>3</sup>)</b>             | 1.000,00   |
| <b>Flujo masico (kg/día)</b>                    | 243.447,25 |
| <b>Caudal (m<sup>3</sup>/día)</b>               | 243,45     |
| <b>Factor de corrección</b>                     | 1,1        |
| <b>Volumen total del tanque (m<sup>3</sup>)</b> | 26779      |
| <b>Relación H/D</b>                             | 0,25       |
| <b>Diámetro (m)</b>                             | 9          |
| <b>Altura (m)</b>                               | 2          |

El digestato puede utilizarse sin tratamiento previo siendo deseable que sea en las tierras adyacentes a la planta para evitar costes de transporte, así como también, facilita la manera de almacenamiento para transporte. Sin embargo, al no ser el caso muchas veces, el digestato puede ser expuesto a tratamientos con el fin de que la logística de transporte sea más económica (Martínez Hernández & Francesena López, 2018).

Usualmente el digestato suele tener una fracción líquida y una sólida luego de que este pase por un proceso de separación, como una centrifuga o prensa de martillo. La fracción líquida contiene un contenido de sólidos totales de 5% o inferior,

mientras que, la fracción sólida contiene un contenido de sólidos totales superiores a 20% (Ramos Marín, 2015).

La fase sólida, luego de su separación puede de ser utilizada de manera inmediata, como también se le pueden hacer tratamientos posteriores como compostaje para mejorar su estabilidad y características. Por otro lado, la fase líquida puede utilizarse directamente como irrigación del campo o desecharse (Martínez Hernández & Francesena López, 2018; Ramos Marín, 2015), pero dependerá de las normativas ambientales de como se debe ser su composición para su desecho.

#### 4.7. Diagrama de bloque

Para realizar el diagrama de bloque, se empleó el programa draw.io. Considerando los valores que se obtuvieron en los diferentes balances de masa realizados (estando en unidades de kg/d), se obtiene el siguiente diagrama:

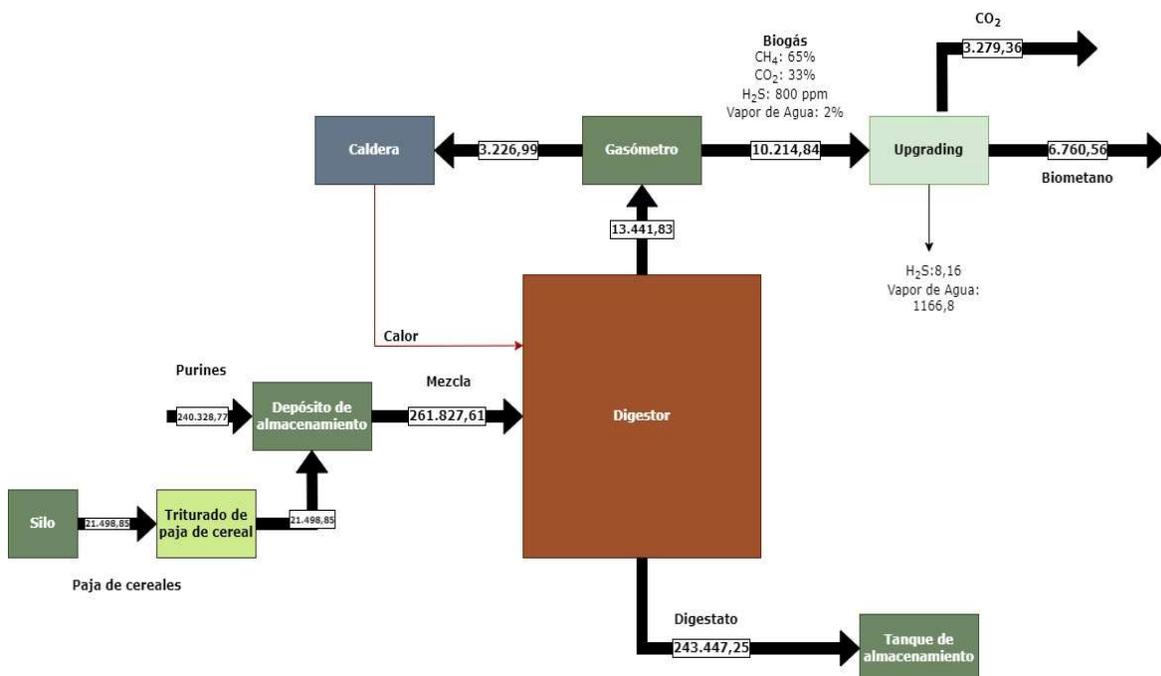


Ilustración 3. Diagrama de bloque del proceso.

En la Ilustración 3, se observa todo el proceso en general. Los purines se almacenan inicialmente en el depósito de almacenamiento que actuará a su vez como un tanque de premezclado, mientras que la paja de cereales viene del silo, pasando por una trituradora hasta llegar al tanque de premezclado/almacenamiento de purines.

Desde ahí, pasan al digestor, aunque es importante recordar que en el diseño se consideraron 3 digestores de menor tamaño, pero con el fin de explicar el proceso se simplificó, dibujando uno solo.

Finalmente, se obtienen las corrientes de biogás y digestato. El digestato pasa luego a un tanque de almacenamiento, que, según la sección anterior, luego se puede pasar por un post tratamiento para su uso como fertilizante. El biogás resultante tiene su almacenamiento (el gasómetro) y de ahí sale las corrientes, una hacia la caldera para poder suplir el calor que se necesita y la otra corriente que se hace pasar por el proceso de upgrading para obtener el biometano.

Con el fin de que se pudiera observar cada parte del proceso bien, también se hizo un diagrama de bloques del proceso de upgrading que realiza esta planta. Esto se puede visualizar en la siguiente ilustración:

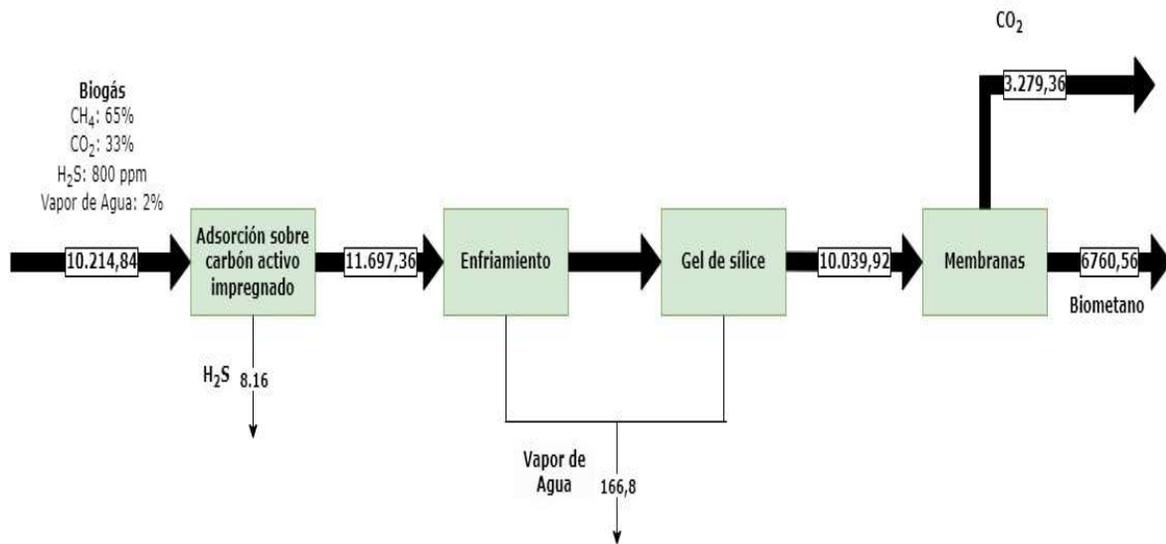


Ilustración 4. Diagrama de bloque del upgrading.

En la Ilustración 4, se puede observar cómo se van desarrollando el proceso de upgrading, luego de que la porción necesaria de biogás se va a la caldera para generar calor. El biogás con el que se empieza el proceso de upgrading, tiene la composición que se muestra en la ilustración, pasando primero por el proceso de eliminación de sulfuro de hidrogeno con adsorción sobre carbón activo impregnado, posteriormente se observa como las tecnologías de enfriamiento y adsorción con gel de sílice logran eliminar la cantidad de agua que sale del proceso. Finalmente, pasa el por las membranas para obtener el biometano mejorado.

#### 4.8. Estimación de potencial para vehículos

De acuerdo a Deublein & Steinhauser, p. (2008, p. 397), la presión necesaria que debe de tener un tanque en el vehículo debe de estar entre 200-250 bar. El tanque debe de tener un volumen de 200L. En teoría el biometano generado puede considerarse como GNC. Según (Ibáñez, 2020) los consumos de un vehículo pueden estar entre 3,5 a 4,37 kg por cada 100 km. Por lo tanto, si consideramos el consumo más grande de 4,37/100 km y que un vehículo al año recorre unos 20000 km/año, los cálculos quedan de la siguiente manera:

$$= \frac{281,61 \text{ kg}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ d}} \cdot \frac{365 \text{ d}}{1 \text{ año}} \cdot \frac{\text{potencial para vehículos}}{4,37} \cdot \frac{100 \text{ km}}{20000 \text{ km}} \cdot \frac{\text{vehículo} \cdot \text{año}}{1} = 2822 \text{ vehículos}$$

De lo anterior, se podrían beneficiar 2822 vehículos de todo el biometano generado al año. Este valor, sin embargo, está limitado a carros compactos, para vehículos empleados en una plantación agrícola puede que requiera más biometano para transportarse, incluso más si se tratan con camiones de transporte.

Si se quiere emplear el biometano para un uso como Gas Natural Vehicular, se deben de considerar varios aspectos técnicos y operativos en cuanto a su almacenamiento. Este tipo de biometano se encuentra a unas presiones muy altas, por lo que los tanques deben de ser de compuestos reforzados capaces de resistir estas altas presiones y con las dimensiones adecuadas para el almacenamiento del biometano. El sistema de almacenamiento debe de contar con todas las medidas de seguridad para mantener las condiciones seguras y estables, es por ello, que se deben de instalar válvulas de seguridad y sistemas de control de presión.

Por otra parte, se debe decidir si la planta contará con una estación de servicio para abastecer directamente a los vehículos, ya sea, porque lo emplearán los vehículos agrícolas o de transporte de la planta, o para abastecer al público local de la comarca. También, se puede considerar que el almacenamiento se haga a través del sistema de distribución del gas. Este último requerirá probablemente un diseño específico del sistema de almacenamiento y de logística operativa, además de que cumpla con todas las normativas y regulaciones que se requieran en del proceso.

## 5. Conclusiones

Se evaluó el potencial de producción de biometano y fertilizantes en la provincia de Soria y en la comarca de Almazán. A nivel de provincia, Soria es una localidad enfocada principalmente en la actividad agrícola y ganadera. Por tanto, los residuos más abundantes presentes en esta localidad son referentes a estas actividades, por lo que para este diseño se consideraron los purines de cerdo y la paja de cereales. En la provincia de Soria se obtuvo un potencial de biogás de 18.040.976,32 m<sup>3</sup>/año, sin embargo, las dificultades que presentaría llevar a cabo una planta centralizada a nivel provincial implicarían muchos problemas logísticos y económicos. Por ello se planteó una planta centralizada enfocada en la comarca de Almazán empleando los mismos cosustratos.

El diseño de la planta de codigestión que se propuso incluye 3 digestores de 4000 m<sup>3</sup> de mezcla completa de tipo cilíndrico con cúpula y con agitación por bombeo. Las tecnologías de upgrading que se consideraron son: adsorción con carbón activo impregnado para eliminar sulfuro de hidrogeno, enfriamiento y adsorción con gel de sílice para eliminar vapor de agua y finalmente para eliminar el dióxido de carbono se empleó membranas. Todo esto se puede visualizar en el diagrama de bloques realizado con los componentes más importantes del proceso.

Se obtuvo un potencial de producción de biogás de 4.717.565,26 m<sup>3</sup>/año y con una cantidad de digestato de 88.858.244,98 kg/año. Este último con un gran potencial para ser utilizado como fertilizante fomentando la economía circular. El biometano que se obtiene luego del upgrading es de 2.466.903,6 m<sup>3</sup>/año y cuenta con el potencial de beneficiar a 2822 vehículos compactos, promoviendo el uso de combustibles más limpios y reduciendo las emisiones de gases de invernadero. Esto último, ajustándose a los Objetivos 7, 12 y 13 de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

Finalmente, la implementación de una planta de codigestión anaerobia en la comarca de Almazán tiene un gran potencial ya que tiene múltiples beneficios ambientales al mejorar la gestión de residuos orgánicos y reduciendo posibles emisiones de gases de efecto invernadero, como también tiene grandes beneficios económicos ya que genera empleos durante la construcción y gestión de la planta. En general, contribuyendo al desarrollo sostenible de la región.

Para futuras líneas de trabajo, se propone considerar una localización específica dentro de la comarca de Almazán, tomando en cuenta los factores logísticos y de infraestructura necesarios para que la planta de codigestión anaerobia sea lo más eficiente posible en cuanto a su operación, así como también, se debe de considerar los materiales de construcción adecuados para cada equipo y componente del proceso. También es esencial, realizar un análisis detallado de consumo de energía eléctrica, incluyendo los equipos excluidos en este trabajo tales como las transportadoras o los compresores necesarios en el proceso. Además, se propone profundizar en el diseño de los reactores escogidos para el upgrading.

## 6. Bibliografía

- Adelekan, B., & Bamgboye, A. I. (2009). Comparison of biogas productivity of cassava peels mixed in selected ratios with major livestock waste types. *African Journal of Agricultural Research*, 4, 571-577.
- AEMET. (2010). *Valores climatológicos normales*. <https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos>.
- Agencia Andaluza de la Energía. (2011). *Estudio Básico del Biogás*. <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/es/biblioteca/estudio-basico-del-biogas>
- Alfonso, D., Brines, N., Peñalvo, E., Vargas, C. A., Pérez-Navarro, A., Gómez, P., Pascual, A., & Ruiz, B. (2009, noviembre 7). *Cuantificación de materias primas de origen ganadero*. <http://www.probiogas.es/>.
- Alfonso, D., Brines, N., Peñalvo, E., Vargas, C. A., Pérez-Navarro, A., Gómez, P., Pascual, A., & Ruiz, B. (2010, marzo 11). *Cuantificación de materias primas alimentarias de origen vegetal*. <http://www.probiogas.es/>.
- Ardolino, F., Cardamone, G. F., Parrillo, F., & Arena, U. (2021). Biogas-to-biomethane upgrading: A comparative review and assessment in a life cycle perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110588. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.110588>
- Barrio Pérez, A. (2019). *Proyecto de ejecución de planta de producción de biogás para el autoabastecimiento energético de explotación porcina, ubicada en el término municipal de El Cubo de la Solana (Soria)*. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/38110>
- Bernal-Martínez, A., González-López, G. I., & Cuevas-Rodríguez, G. (2020). Codigestión anaerobia como alternativa para el tratamiento de aguas residuales lácteas y la generación de biogás y biosólidos. En *Mujeres en la Ciencia Ciencias ambientales, uso de recursos* (pp. 115-141). ECORFAN. <https://doi.org/10.35429/H.2020.8.115.141>
- Castaño Pérez, V., & Domínguez Carrero, J. I. (2010). *Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás*. [http://213.229.136.11/bases/ainia\\_probiogas.nsf/DocumentosID/66BC65603F6658EAC125773D002A3F3E](http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/DocumentosID/66BC65603F6658EAC125773D002A3F3E)
- Del Pino Gutiérrez, R. (2022). *Evaluación de la utilización de biometano obtenido mediante upgrading a partir de biogás de la EDAR y el CTR de Valladolid como combustible en los autobuses urbanos* [Trabajo Fin de Máster]. Universidad de Valladolid.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from Waste and Renewable Resources*. Wiley-VCH.
- Dioha, I., Ikeme, C. H., & Nafiu, T. (2013). Effect of carbon to nitrogen ratio on biogas production. *Int Res J Nat Sci*, 1, 1-10.
- EBA. (2024). *Activity Report 2023*. <https://www.europeanbiogas.eu/eba-activity-report-2023/>
- Elías Castells, X. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos* (X. Elías Castells, Ed.) [Book]. Fundación Universitaria Iberoamericana.

- Flotats Ripoll, X., Campos Pozuelo, E., Palatsi Civit, J., & Bonmatí Blasi, A. (2001). (2001). Digestión anaerobia de purines de cerdo y codigestión con residuos de la industria alimentaria. *Porci*, 65, 51-65.
- Fry, L. J. (1973). *Methane Digesters for fuel gas and fertilizer* (3.<sup>a</sup> ed.).
- Henares. (2023, julio 25). *Diámetros tuberías PVC*. <https://www.desatascoshenares.com/blog/diametros-canerias-pvc-mm/>.
- Ibáñez. (2020). *Coches a gas natural comprimido en España: cómo funcionan, dónde repostar y todos los modelos que ya puedes comprar*. <https://www.xataka.com/automovil/coches-a-gas-natural-comprimido-como-funcionan-modelos-que-puedes-comprar>.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2020). *Biogás*. <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biogas>.
- Martínez Hernández, C. M., & Francesena López, Y. (2018). Tratamiento y utilización de efluentes instalaciones de biogás como abonos orgánicos, revisión y análisis. *Centro Agrícola*, 45(2), 83-92. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0253-57852018000200012&lng=es&nrm=iso&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852018000200012&lng=es&nrm=iso&tlng=en)
- Morero, B., Gropelli, E., & Campanella, E. A. (2011). *Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás*. <https://core.ac.uk/outputs/158829583/?source=oai>
- Muñoz Valero, J. A., Ortiz Cañavate, J., & Vázquez Minguela, J. (1987). *Técnica y aplicaciones agrícolas de la biometanización* (J. Ortiz-Cañavate & J. Vázquez Minguela, Eds.) [Unknown]. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Secretaría General Técnica.
- Probiogás. (2011, diciembre 20). *Informe comarcal integrado, Almazán*. Fichas comarcas. [http://213.229.136.11/bases/ainia\\_probiogas.nsf/DocumentosID/93E510D1974E08F9C1257A48004C0031](http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/DocumentosID/93E510D1974E08F9C1257A48004C0031)
- Ramos Marín, S. (2015). *Biodegradabilidad Anaerobia de fracción orgánica de residuo urbano pretratado mediante esterilización* [Proyecto Fin de Grado]. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. Universidad Politécnica de Madrid.
- Rynk, R., van de Kamp, M., Willson, G. B., Singley, M. E., Richard, T. L., Kolega, J. J., Gouin, F. R., Laliberty, L. Jr., Kay, D., Murphy, D. W., Hoitink, H. A. J., & Brinton, W. F. (1992). Appendix A. Characteristics of Raw Materials. En R. Rynk (Ed.), *On-Farm Composting Handbook* (pp. 106-113). Northeast Regional agricultural Engineering Service. Cooperative Extension.
- Santolaria Capdevila, C. (2014). *Diseño de un modelo semiempírico de Codigestión Anaerobia* [Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Zaragoza]. <https://zaguan.unizar.es/record/13372>
- Sebastián Nogués, F., García Galindo, D., & Rezeau, A. (2010). *Energía de la biomasa: Vol. II* (F. Sebastián Nogués, Ed.; 1a Ed.) [Book]. Prensas universitarias de Zaragoza.
- Secretaría de Estado de Energía. (2022). *Hoja de ruta del Biogás*. <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biogas>
- Tingshuang, G., Sánchez, M. D., Peiyu, G., Jianxin, L., Qingxiang, M., Cungen, Z., Zhenhai, Y., Zhishan, Z., Lujia, H., Jun, G., & Qiaojuan, Y. (2001). *Crop residue*

processing

machines.

<https://www.fao.org/4/Y1936E/y1936e0c.htm#TopOfPage>.

Zhang, Y. (2013, agosto 15). *Anaerobic digestion system. Energy balance*. [https://www.valorgas.soton.ac.uk/Pub\\_docs/JyU%20SS%202013/VALORGAS\\_JyU\\_2013\\_Lecture%2013.pdf](https://www.valorgas.soton.ac.uk/Pub_docs/JyU%20SS%202013/VALORGAS_JyU_2013_Lecture%2013.pdf).

## 7. Anexos

### 7.1. Identificación de los residuos disponibles en la Provincia de Soria

Para identificar los residuos disponibles en la provincia de Soria, se emplearon los datos de recopilados por Probiogás en su informe de cuantificación de materias primas de origen ganadero (Alfonso et al., 2009), donde detallan los residuos disponibles por provincias de España y las consideraciones que realizan para saber el potencial disponible. Los datos de esta encuesta para la provincia de Soria se muestran a continuación, considerando también el rango de la relación C/N para estos residuos:

Tabla A 1. Residuos Ganaderos de Soria.

| Residuos Ganaderos de Soria                                  |                                 |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Tipo de residuo                                              | Producción (t/año) <sup>1</sup> |
| Purín de cerdo-lechones                                      | 3.509,00                        |
| Purín de cerdo-cebo                                          | 335.460,00                      |
| Purín de cerdo-cerdas, verracos                              | 85.418,00                       |
| Estiércol de vaca-cebo                                       | 26.847,00                       |
| Estiércol de vaca-reposición hembra                          | 58.245,00                       |
| Estiércol de vaca-reposición macho                           | 749,00                          |
| Gallinaza-gallinas ponedoras                                 | 1.404,00                        |
| Gallinaza-pollos de carne y otros                            | 2.497,00                        |
| Restos de otras especies-ovejas y cabras (corderos y chivos) | 8.219,00                        |
| Restos de otras especies-ovejas y cabras (hembras y machos)  | 120.235,00                      |
| Restos de otras especies-equinos (caballos, asnos y mulas)   | 2.035,00                        |

Nota. <sup>1</sup> los datos de producción de los residuos ganaderos son todos de la misma fuente: Alfonso et al., (2009).

En la Tabla A 1, muestra como los purines de cerdo provenientes de cebos son los que mayor producción al año tienen de todos los residuos ganaderos de la provincia de Soria.

Tabla A 2. Materias primas alimentarias de origen vegetal de Soria.

| <b>Materias primas alimentarias de origen vegetal de Soria</b> |                                        |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>Tipo de materia prima</b>                                   | <b>Producción (t/año) <sup>1</sup></b> |
| <b>Retiradas hortalizas</b>                                    | 671,00                                 |
| <b>Retiradas frutales no cítricos</b>                          | 13,00                                  |
| <b>No conformes hortalizas</b>                                 | 130,00                                 |
| <b>No conformes tubérculos</b>                                 | 136,00                                 |
| <b>No conformes frutales no cítricos</b>                       | 4,00                                   |
| <b>Transformación hortalizas</b>                               | 253,00                                 |
| <b>Transformación tubérculos</b>                               | 54,00                                  |
| <b>Transformación frutales no cítricos</b>                     | 5,00                                   |
| <b>Residuos industria vino</b>                                 | 570,00                                 |
| <b>Paja de cereal</b>                                          | 444.548,00                             |
| <b>Lodos EDARI-Transformados vegetales</b>                     | 227,00                                 |

Nota. <sup>1</sup> los datos de producción de los residuos ganaderos son todos de la misma fuente: Alfonso et al., (2010).

En la Tabla A 2, se muestran las materias primas alimentarias de origen vegetal, donde se observa que la materia prima de paja de cereal es la más abundante en esta provincia, mientras que los demás no son tan significativos.

Para identificar los residuos disponibles en la comarca de Almazán, se emplearon los datos de recopilados por Probiogás en su informe comarcal integrado para la comarca de Almazán (Probiogás, 2011) donde detallan las materias primas por agrupación. Los datos de este informe se muestran a continuación, considerando únicamente aquellos que cuentan con datos y también el rango de la relación C/N para estos residuos:

Tabla A 3. Materias primas por agrupación en Almazán.

| <b>Materias primas por agrupación en Almazán</b> |                                        |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>Tipo de materia prima</b>                     | <b>Producción (t/año) <sup>1</sup></b> |
| <b>Purín de cerdo</b>                            | 87.720,00                              |
| <b>Gallinaza</b>                                 | 3,00                                   |
| <b>Restos de otras especies</b>                  | 9.151,00                               |

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| <b>Mat. primas matadero de carne</b> | 963,00    |
| <b>Mat. primas de estabulación</b>   | 357,00    |
| <b>Lodos EDARI-cárnica</b>           | 693,00    |
| <b>Excedentes hortalizas</b>         | 23,00     |
| <b>No conformes hortalizas</b>       | 450,00    |
| <b>No conformes tubérculos</b>       | 475,00    |
| <b>Transformación hortalizas</b>     | 52,00     |
| <b>Transformación tubérculos</b>     | 38,00     |
| <b>Paja de cereal</b>                | 78.222,00 |
| <b>Cultivos energéticos</b>          | 283,00    |

*Nota.* <sup>1</sup> los datos de producción de los residuos ganaderos son todos de la misma fuente: Probiogás (2011).

En la Tabla A 3, se muestran las materias primas por agrupación en la comarca de Almazán. En esta se puede observar que los datos más significativos vienen de los purines de cerdo de la paja de cereal.

## 7.2. Cálculo de relación C/N y cantidad de biogás

En la siguiente tabla se muestra el cálculo para la relación C/N:

Tabla A 4. Cálculo de relación C/N.

| <b>Soria</b>   |                  |                 |                                                 |                  |                 |                                              |
|----------------|------------------|-----------------|-------------------------------------------------|------------------|-----------------|----------------------------------------------|
| <b>k</b>       | <b>c/n<br/>1</b> | <b>n%<br/>1</b> | <b>Sólidos totales<br/>purines (kg ST/ año)</b> | <b>c/n<br/>2</b> | <b>n%<br/>2</b> | <b>Sólidos totales paja<br/>(kg ST/ año)</b> |
| 30             | 14               | 3,1             | 21.804.900,00                                   | 80               | 0,7             | 30.900.658,29                                |
| 30             | 15               | 3,8             | 21.804.900,00                                   | 150              | 0,5             | 20.714.655,00                                |
| <b>Almazán</b> |                  |                 |                                                 |                  |                 |                                              |
| <b>k</b>       | <b>c/n<br/>1</b> | <b>n%<br/>1</b> | <b>Sólidos totales<br/>purines (kg ST/ año)</b> | <b>c/n<br/>2</b> | <b>n%<br/>2</b> | <b>Sólidos totales paja<br/>(kg ST/ año)</b> |
| 30             | 14               | 3,1             | 5.701.800,00                                    | 80               | 0,7             | 8.080.265,14                                 |
| 30             | 15               | 3,8             | 5.701.800,00                                    | 150              | 0,5             | 5.416.710,00                                 |

En esta Tabla A 4, se hacen los cálculos con la Ecuación 2, aquí se obtienen los sólidos totales de paja que se necesitan para calcular la cantidad de biogás disponible en Soria y Almazán.

Tabla A 5. Cálculo del potencial teórico de Soria.

| <b>Potencial teórico de Soria</b>                       |                     |
|---------------------------------------------------------|---------------------|
| <i>Purines (kg/año)</i>                                 | 335.460.000,00      |
| <i>Porcentaje materia seca</i>                          | 0,07                |
| <i>Sólidos totales (kg ST/año)</i>                      | 21.804.900,00       |
| <i>Porcentaje de solidos volátiles</i>                  | 0,75                |
| <i>Sólidos volátiles (kg SV/año)</i>                    | 16.353.675,00       |
| <i>Rendimiento de biogás (m<sup>3</sup>/ kg SV/año)</i> | 0,60                |
| <b><i>Cantidad de biogás (m<sup>3</sup>/año)</i></b>    | <b>9.812.205,00</b> |
|                                                         |                     |
| <i>Paja fresca (kg/año)</i>                             | 30.008.903,07       |
| <i>Porcentaje materia seca</i>                          | 0,86                |
| <i>Sólidos totales (kg ST/ año)</i>                     | 25.807.656,64       |
| <i>Porcentaje de solidos volátiles</i>                  | 0,91                |
| <i>Sólidos volátiles (kg SV/año)</i>                    | 23.510.775,20       |
| <i>Rendimiento de biogás (m<sup>3</sup>/ kg SV/año)</i> | 0,35                |
| <b><i>Cantidad de biogás (m<sup>3</sup>/año)</i></b>    | <b>8.228.771,32</b> |

La Tabla A 5 muestra la secuencia de cálculos para obtener la cantidad de biogás de la paja y purines en Soria antes de hacer el total que se muestra en las secciones anteriores.

Tabla A 6. Cálculo del potencial teórico Almazán.

| <b>Potencial teórico de Almazán</b>                     |                     |
|---------------------------------------------------------|---------------------|
| <i>Purines (kg/año)</i>                                 | 87.720.000,00       |
| <i>Porcentaje materia seca</i>                          | 0,07                |
| <i>Sólidos totales (kg ST/año)</i>                      | 5.701.800,00        |
| <i>Porcentaje de solidos volátiles</i>                  | 0,75                |
| <i>Sólidos volátiles (kg SV/año)</i>                    | 4.276.350,00        |
| <i>Rendimiento de biogás (m<sup>3</sup>/ kg SV/año)</i> | 0,60                |
| <b><i>Cantidad de biogás (m<sup>3</sup>/año)</i></b>    | <b>2.565.810,00</b> |
|                                                         |                     |
| <i>Paja fresca (kg/año)</i>                             | 7.847.078,57        |
| <i>Porcentaje materia seca</i>                          | 0,86                |
| <i>Sólidos totales (kg ST/ año)</i>                     | 6.748.487,57        |
| <i>Porcentaje de solidos volátiles</i>                  | 0,911               |
| <i>Sólidos volátiles (kg SV/año)</i>                    | 6.147.872,18        |
| <i>Rendimiento de biogás (m<sup>3</sup>/ kg SV/año)</i> | 0,35                |
| <b><i>Cantidad de biogás (m<sup>3</sup>/año)</i></b>    | <b>2.151.755,26</b> |

La Tabla A 6 muestra la secuencia de cálculos para obtener la cantidad de biogás de la paja y purines en Almazán antes de hacer el total que se muestra en las secciones anteriores.

### 7.3. Concentraciones de los componentes del biogás

Tabla A 7. Concentraciones de los componentes del biogás.

| Gas/<br>Referencia                                               | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S | Vapor de<br>Agua    | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> |
|------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>(Castaño Pérez &amp; Domínguez Carrero, 2010, p. 39)</b>      | 45-80%          | 20-55%          | 0-8%             | Pequeñas cantidades | 0-20%          | 0-10%          | 0-5%           |
| (Muñoz Valero et al., 1987, p. 105)                              | 55-80%          | 45-20%          | 1-5%             | Variable            | 0,5-10%        | 0,1-1%         | 0-10%          |
| <b>Según residuos ganaderos</b><br>(ElíasCastells, 2005, p. 653) | 50-80%          | 30-50%          | 0-1%             | Saturado            | 0-1%           | 0-1%           | 0-2%           |
| <b>Según residuos agrícolas</b><br>(ElíasCastells, 2005, p. 653) | 50-80%          | 30-50%          | 100-700 ppm      | Saturado            | 0-1%           | 0-1%           | 0-2%           |

La Tabla A 7, muestra las diferentes concentraciones que pueden tener los componentes del biogás.