

Análisis de sostenibilidad de un sistema cerrado de producción de algas para la fijación de CO₂



Universidad de Oviedo

Máster en biotecnología del medio ambiente y la salud

Trabajo de fin de máster. Julio 2016



Autora: Sandra Álvarez Alonso

Tutora: Rocío Luiña Fernández



Universidad de Oviedo

ROCÍO LUIÑA FERNÁNDEZ, Profesora Asociada del Área de Proyectos de Ingeniería de la Universidad de Oviedo y responsable del Área de Servicios Científicos de Innvel S.L.L.

CERTIFICA:

Que el presente trabajo titulado "Análisis de sostenibilidad de un sistema cerrado de producción de algas para la fijación de CO₂" ha sido realizado por la Graduada en Biología Sandra Álvarez Alonso en el Área de Proyectos de Ingeniería bajo su dirección, constituyendo el Trabajo Fin de Máster de la interesada, cuya presentación se autoriza.

Oviedo, 30 de junio 2016

Fdo. Rocío Luiña Fernández

Resumen.

La digestión anaerobia es una tecnología adecuada para la producción de energía renovable en forma de biogás a partir de restos vegetales y animales. El biogás es una energía renovable compuesta principalmente por metano (60%) y dióxido de carbono (35-40%), además de otros gases en pequeñas cantidades (H₂S). Este biogás debe ser depurado y existen en el mercado multitud de metodologías destinadas a este fin.

Este estudio evalúa tres metodologías de reformado con su gestión de residuos correspondiente por medio de la evaluación del ciclo de vida. Se realiza un estudio profundo de dos de las técnicas más usadas en la actualidad: el método criogénico y la tecnología PSA y se plantea un método basado en un consorcio microalga-bacteria capaz de eliminar de la mezcla de gases los principales contaminantes. En cada uno de estos tres escenarios se plantea la reutilización de los residuos generados en forma de fertilizante.

A través de este estudio se concluye que la tecnología de reformado criogénico requiere una elevada demanda de energía, lo que limita la eficiencia del proceso y la sostenibilidad del mismo. El reformado mediante la tecnología PSA y el método biológico presentan impactos semejantes en el ACV, es en la fase de elaboración de los fertilizantes donde se observan las mayores diferencias. El fertilizante elaborado a base de biomasa algal, es el más favorable y determina la viabilidad medioambiental del método propuesto.

Abstract.

Anaerobic digestion has been known as a prospective technology for the production of clean energy in the form of biogas from animal and vegetal feedstocks. Biogas is a sustainable energy carrier which is mainly composed of methane (60%) and carbon dioxide (35–40%), among low quantities of other elements (H₂S). This biogas must be refined and there are a lot of methodologies in the market to carry out this.

This study evaluates three upgrading methodologies attached to its corresponding waste management through life cycle assessment. A deep study of two of the techniques used today is performed: the cryogenic method and PSA technology and a microalgae-bacterial consortium capable of removing the major pollutants from the gas mixture is proposed. In each of these three scenarios reuse of waste as fertilizer is raised.

Through this study we conclude that cryogenic technology requires high energy demand, which limits the efficiency and sustainability of the process. The PSA technology and the biological method have similar impacts on the infrastructure; it is in the phase of fertilizers development where there are greatest differences. The fertilizer made from algal biomass, is the most favorable and determines the environmental feasibility of the proposed method.

Índice

1	Introducción	1
1.1	La sostenibilidad como requisito para el desarrollo.	1
1.2	Panorama actual y claves para un desarrollo sostenible.	1
1.3	Potencial del biogás como estrategia de sostenibilidad.	2
1.4	La ecología industrial, un factor fundamental para conseguir un desarrollo sostenible... 2	
1.5	Estructura del trabajo.....	3
2	Definición del problema	4
2.1	Descripción del problema.	4
2.2	La producción de microalgas planteada como una solución sostenible dentro del marco de la ecología industrial.	5
3	Tecnologías y desarrollos	7
3.1	Producción de biogás.	7
3.1.1	Recepción y pre-tratamiento de materias primas.	7
3.1.2	Co-digestión anaeróbica de materias primas.....	9
3.2	Reformado del biogás.	10
3.2.1	Método biológico.	11
3.2.2	Métodos físicos.	14
4	Caso de aplicación	17
4.1	Producción de biogás.	17
4.1.1	Recepción y pretratamiento de materias primas.	17
4.1.2	Co-digestión anaerobia.	18
4.2	Reformado del biogás mediante la utilización de un consorcio microalga-bacteria.	19
4.3	Aprovechamiento de la biomasa algal.	19
4.3.1	Cosecha de la biomasa algal.....	19
4.3.2	Secado de la biomasa algal.	20
5	Metodología utilizada	22
5.1	Concepto de análisis de ciclo de vida (ACV).....	22
5.2	Normativa que rige el ACV.	22
5.3	Definición de objetivos y alcance.....	23
5.3.1	Unidad funcional.	24
5.3.2	Escenarios.....	24

5.3.3	Límites del sistema.....	25
5.3.4	Calidad de los datos.	25
5.3.5	Bases de datos y software.....	25
5.3.6	Criterios de corte.....	26
5.3.7	Categorías de impacto ambiental.	26
6	Análisis ambiental	28
6.1	Inventario del ciclo de vida.	28
6.1.1	Producción de biogás.	28
6.1.2	Reformado del biogás.	32
6.2	Análisis e interpretación del impacto del ciclo de vida.....	40
6.2.1	Análisis global del impacto de los tres escenarios propuestos.	40
6.2.2	Análisis comparativo del impacto del ciclo de vida de los escenarios 1 y 2.	44
7	Conclusiones.....	49
8	Bibliografía	51

Figuras

Figura 1. Purificación de biogás mediante un sistema biológico utilizando un consorcio microalga-bacteria. Fuente: elaboración propia.	6
Figura 2. .Etapas del proceso de generación y reformado del biogás. Fuente: elaboración propia.	7
Figura 3. Fases de la digestión anaeróbica. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010.	10
Figura 4. Esquema de purificación de biogás. Fuente: elaboración propia.	12
Figura 5. Esquema del proceso de floculación. Fuente: adaptado de Salim, 2011.	13
Figura 6. Reformado del biogás por el método de PSA. Fuente: elaboración propia.	15
Figura 7. Reformado criogénico del biogás. Fuente: elaboración propia.	16
Figura 8. Esquema de las etapas llevadas a cabo para la obtención de biogás reformado y biofertilizante. Fuente: elaboración propia.	17
Figura 9. Esquema del proceso de floculación mediante el uso de un sedimentador coalescente. Fuente: elaboración propia.	20
Figura 10. Secado por la tecnología de "refractance window drying". Fuente: adaptado de Nindo, 2007.	21
Figura 11. Etapas del ACV. Fuente: elaboración propia.	23

Tablas

Tabla 1. Características del biogás bruto y estándares de calidad.	4
Tabla 2. Volumen de entrada de materias primas en la planta de producción de biogás y cálculo en unidades TKm.	29
Tabla 3. Inventario de la infraestructura de la planta de digestión anaerobia.	31
Tabla 4. Infraestructura del tanque de almacenamiento.	33
Tabla 5. Infraestructura de la columna de absorción.	34
Tabla 6. Infraestructura para el cultivo de microorganismos.	34
Tabla 7. Resumen del inventario del escenario 1.	35
Tabla 8. Emisiones del residuo gaseoso a la atmósfera.	37
Tabla 9. Emisiones a la atmósfera del proceso de compostaje.	37
Tabla 10. Resumen del inventario del escenario 2.	38
Tabla 11. Inventario de la infraestructura necesaria para el método criogénico.	38
Tabla 12. Resumen del inventario del escenario 3.	39

1 Introducción

1.1 La sostenibilidad como requisito para el desarrollo.

Es indiscutible que todas las actividades humanas producen impactos sobre el entorno que se traducen en algún efecto sobre el medioambiente, sin embargo, la preocupación por las consecuencias de estas actividades en el entorno natural es reciente. Desde los años 50 comenzó a surgir, en la comunidad científica, un interés por la cuantificación de los impactos medioambientales, pero fue en 1972 cuando se celebró la primera conferencia de la ONU sobre cuestiones ambientales internacionales, lo que marcó un punto de inflexión en el desarrollo de la política internacional en materia de medio ambiente comenzando a definirse unos principios de desarrollo teniendo en cuenta el factor de impacto ambiental. Poco después se comenzó a hablar de lo que hoy se conoce como desarrollo sostenible, la Comisión de Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas en el informe de Brundtland de 1987 define el desarrollo sostenible como “el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades”. Aunque este concepto es confuso en cuanto a su aplicación, tanto los gobiernos como las sociedades son cada vez más conscientes del agotamiento de recursos y la contaminación global generada, por lo que se demanda el desarrollo de nuevas tecnologías, que favorezcan la consecución de ciertos estándares que permitan alcanzar un desarrollo sostenible, y hoy en día no se concibe el desarrollo si no es de la mano de la sostenibilidad.

1.2 Panorama actual y claves para un desarrollo sostenible.

Hoy en día, la contaminación atmosférica y el calentamiento global son las principales preocupaciones del ser humano relacionadas con el entorno natural. Este problema podría atribuirse al aumento, en las últimas décadas, de la liberación de gases de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) producidos a partir de la quema de combustibles fósiles y también como consecuencia del aumento de la población mundial (Abdeshahian, 2016). Debido a la preocupación que suscita este tema, la sustitución de las fuentes de energía convencionales por energías renovables constituye uno de los pilares en los que se asienta el panorama energético actual. Los nuevos objetivos propuestos en el marco de la Unión Europea en materia de producción energética de cara a las próximas décadas, persiguen un aumento en la sostenibilidad de las actividades humanas e industriales como requisito indispensable para el desarrollo. De acuerdo con esto se establece que en el año 2020 el 20% de la energía utilizada debe proceder de fuentes renovables y para el año 2030, la contribución de la energía renovable al cómputo total debe ser de, al menos, un 27% (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010).

Aunque la contribución del sistema de producción de energía al cómputo total de GEI es superior al resto de actividades, el aporte de la agricultura al balance total de los GEI es innegable, como así lo ha descrito el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007). Las actividades agrícolas son responsables de 405 Tm CO₂eq por año lo que supone el 10% del total de las emisiones de gases de efecto invernadero de Europa (Bacenetti, 2013). Las emisiones de óxido nitroso (provenientes de la aplicación de fertilizantes y el manejo del estiércol) representan aproximadamente 210 Tm CO₂eq, mientras que las emisiones de metano (de la fermentación entérica, manejo del estiércol, y el cultivo de arroz) cuentan aproximadamente con 195 Tm CO₂eq (De Cara, 2005). De lo que se deduce que es necesaria una gestión adecuada de estos residuos.

El uso de energías renovables es una estrategia que permite reducir las emisiones y retrasar el agotamiento de los combustibles fósiles. Además, tienen un valor añadido las formas de generación de energía que permiten mitigar la contribución de GEI provenientes de la agricultura y la ganadería (Bacenetti, 2013).

1.3 Potencial del biogás como estrategia de sostenibilidad.

El biogás es un biocombustible que se adapta a las exigencias del nuevo entorno en el que nos encontramos y debido a ello la industria global de la producción de biogás ha experimentado un enorme crecimiento en los últimos 10 años (IEA, 2015) y se espera que la bioenergía desempeñe un papel clave en la consecución de los ambiciosos objetivos aprobados por la directiva de energías (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010). En el Plan de Energías Renovables (PER) 2005-2010 se considera la producción de biogás como una energía renovable que además representa una solución medioambiental y de tratamiento de residuos, puesto que el biogás se genera a partir de residuos procedentes de la agricultura, la ganadería, la industria alimentaria y del tratamiento de aguas que de no ser aprovechados en este proceso deberían ser gestionados de otro modo. Además, se considera al biogás una fuente de energía con un balance de carbono neutral ya que el carbono emitido durante la combustión es carbono atmosférico que ha sido recientemente fijado por las plantas u otros organismos, al contrario que lo que ocurre durante la combustión de combustibles fósiles donde se emite a la atmósfera el carbono que ha estado secuestrado durante millones de años (Abdeshahian, 2016). Así mismo, también se tiene en cuenta que el biogás en general, y el del sector agroindustrial en particular, es una energía renovable, que además tiene una componente medioambiental de reducción de emisiones evitadas de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

1.4 La ecología industrial, un factor fundamental para conseguir un desarrollo sostenible.

El concepto de desarrollo sostenible sirvió como base de lo que hoy se conoce como ecología industrial, concepto que hace referencia a un nuevo modo de ver los procesos

industriales, en el que se tiene en cuenta que la evolución de la actividad industrial debe pasar por una forma de producción más sostenible. En este nuevo escenario, el cambio hacia un sistema sostenible va de la mano de la optimización del uso de materiales, tendiendo hacia sistemas industriales de ciclo cerrado, donde los residuos de una industria son la materia prima de otra o de otro proceso diferente para generar nuevos productos, asimilándose a los ecosistemas naturales, donde los ciclos siempre son cerrados y los recursos siempre son aprovechados por los distintos elementos del sistema. De este modo se pueden crear redes tan grandes que pueden englobar los sistemas industriales a nivel mundial o se puede utilizar a escala individual. Para conseguir crear estas sinergias se debe priorizar la valorización de los subproductos limitando los residuos no reutilizables. También prima en este tipo de sistemas el autoabastecimiento de energía, tendiendo hacia la generación de energías renovables.

1.5 Estructura del trabajo.

Utilizando como referencia la idea de desarrollo sostenible, y como base el principio de ecología industrial, en este estudio se analizan, desde una perspectiva medioambiental, las etapas del proceso de generación de biogás a partir de residuos, el reformado del biogás y la gestión de los residuos originados en el proceso.

En este trabajo se desarrolla una tecnología basada en la ecología industrial, dándole al proceso de producción y reformado del biogás en conjunto un valor añadido gracias al uso de un sistema innovador que permite subsanar los principales problemas encontrados con la metodología convencional, transformando las dificultades en oportunidades de producción de nuevas líneas de productos, evitando así la generación de residuos.

Este sistema se analiza dentro del marco del análisis de ciclo de vida (ACV) ya que esta metodología permite tener en cuenta todos los impactos relevantes que se producen durante todo el ciclo de vida de un producto. El sistema propuesto en este estudio será comparado con otros escenarios de uso común en la industria del biogás, ya que el ACV permite obtener una visión comparativa de los potenciales impactos de varias tecnologías.

2 Definición del problema

2.1 Descripción del problema.

El biogás se obtiene como resultado de un proceso de digestión anaerobia (DA) de diferentes materias primas, mediante el cual, los microorganismos son capaces de degradar, en ausencia de oxígeno, compuestos orgánicos a sustancias simples con la liberación asociada de biogás (Merlin, 2014). El producto final o biogás en su mayoría está compuesto por metano (60%), aunque las propiedades del biogás varían en función de las materias primas utilizadas (Abdeshahian, 2016). Además del metano, el biogás contiene cantidades significativas (30%) de dióxido de carbono (CO₂) y bajas cantidades de otros gases como amoníaco (NH₃), sulfuro de hidrógeno (H₂S), hidrógeno (H₂), oxígeno (O₂), nitrógeno (N₂), agua y monóxido de carbono (CO) (Sun, 2015) (Abdeshahian, 2016), cuyas proporciones promedio se muestran en la tabla 1. Este biogás podría ser utilizado directamente para generar energía, pero el gran volumen de CO₂ que contiene reduce el poder calorífico del gas y aumenta los costes de transporte. Además, para poder ser suministrado a la red debe adecuarse a los estándares de calidad del gas natural indicados en la tabla 1 (Ministerio de industria, 2011). Para ello es necesaria una reducción en el contenido de CO₂ y H₂S, ya que este último se trata de un compuesto altamente corrosivo (Sun, 2015) (Budzianowski, 2016).

Tabla 1. Características del biogás bruto y estándares de calidad.

Componente	Biogás bruto	Estándar de calidad	Unidades
CH₄	60-70	>95	% (mol)
CO₂	30-40	<2,5	% (mol)
H₂S	0-4000	<9,89	Ppm
H₂	0	<5	% (mol)
H₂O	1-5	<2	% (mol)
N₂	0,2	<6,5	% (mol)
O₂	0	<0,01	% (mol)
NH₃	100	<3,96	Ppm
Poder calorífico inferior	23	37	MJ/Nm ³

Por tanto, el biogás debe ser reformado y aunque el proceso global de producción de biogás es considerado medioambientalmente favorable, existen algunas limitaciones tecnológicas en el proceso de reformado con las técnicas actuales ya que los sistemas convencionales de purificación de biogás llevan asociadas emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y requieren un elevado gasto energético (Koszel, 2015). Como consecuencia, el reformado del biogás es un tema muy destacado en los artículos

científicos publicados en los últimos años en este campo (Abatzoglu, 2009) (Starr, 2012) (Bauer, 2013) (Sun, 2015) y uno de los problemas que se plantean en este estudio.

Por otro lado, un punto clave en cualquier sistema de producción sostenible basado en el principio de ecología industrial es el tratamiento de los residuos generados en el proceso productivo. En este caso, como producto secundario del proceso de digestión anaeróbica se obtiene el digestato, que se puede definir como el líquido procedente de la descomposición anaeróbica de los residuos animales y vegetales (Koszel, 2015). El digestato es rico en nutrientes como nitrógeno, potasio y fósforo (Uusitalo, 2014) y se puede emplear como fertilizante, desplazando a los abonos convencionales producidos a base de combustibles fósiles ("Centre for Climate and Energy Solutions", 2015). La forma más simple de emplear este producto es mediante la aplicación directa al campo, pero este procedimiento trae asociadas múltiples desventajas, causando eutrofización, contaminación química, física o biológica y sobre-aplicación en las áreas cercanas a las plantas productoras de biogás (Xia, 2016).

Existe una amplia gama de tecnologías basadas en mecanismos físico-químicos que pueden ser aplicadas para la eliminación de CO₂ o H₂S del biogás primario, y existen formas de gestión del digestato de forma paralela. Sin embargo, aplicando las técnicas convencionales se observa una falta de tecnologías capaces de hacer frente de forma simultánea a ambos problemas y que sean, a su vez, respetuosas con el medio ambiente.

2.2 La producción de microalgas planteada como una solución sostenible dentro del marco de la ecología industrial.

En este estudio se plantea una solución a las dos dificultades encontradas en el proceso productivo del biogás: la optimización del proceso de refinado y el aprovechamiento y revalorización del digestato, esta solución converge en la utilización de un sistema biológico capaz de subsanar las dos dificultades al mismo tiempo.

El desarrollo tecnológico alcanzado en las últimas décadas ha favorecido el desarrollo de nuevas tecnologías basadas en la utilización de elementos vivos con aplicación a nivel industrial. Si hay una especie utilizada en múltiples procesos es *spirulina platensis* que es, sin duda, una de las especies de microalgas más estudiadas, y, sus condiciones de cultivo, tasa de crecimiento y requerimientos nutricionales y ambientales están bien definidos, además es fácilmente cultivable en condiciones de laboratorio y ha sido utilizada previamente en procesos industriales.

El procedimiento aquí descrito se basa en la capacidad fotosintética de las algas, se plantea un sistema que utiliza un consorcio microalga-bacteria capaz de eliminar simultáneamente ambos contaminantes del biogás (CO₂ Y H₂S) a bajo coste y con un mínimo impacto ambiental. En él se plantea la eliminación del CO₂ de la mezcla de gases que componen el biogás primario mediante un cultivo de microalgas asociado a un flujo de gas bruto constante. Como resultado del proceso fotosintético, se genera oxígeno que

es aprovechado por bacterias oxidadoras de azufre que consiguen eliminar el H₂S, obteniéndose finalmente sulfato. Un esquema de este proceso se muestra en la figura 1.

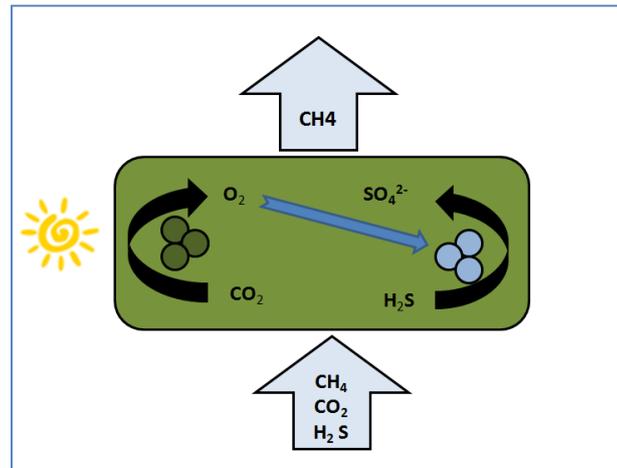


Figura 1. Purificación de biogás mediante un sistema biológico utilizando un consorcio microalga-bacteria.
Fuente: elaboración propia.

Otro de los problemas que se encontraban en el proceso de generación de biogás hacía referencia a la gestión del digestato, la correcta gestión del mismo representa un punto clave para lograr sistemas sostenibles. Este sistema de organismos puede utilizar como fuente de energía nitrógeno, potasio y fósforo, que es aportado por el digestato, que en otros escenarios sería gestionado como un residuo. De este modo, el digestato ocupa un papel fundamental en el proceso siendo introducido de manera eficiente dentro del mismo. Además, como proceso secundario al reformado del biogás y al aprovechamiento del digestato, se obtiene un volumen elevado de biomasa algal, que puede tener múltiples aplicaciones, entre otras, podría emplearse como fertilizante de alto valor después de ser sometido a un proceso de secado (Han, 2014). Algunos artículos recientes asemejan los efectos en cuanto al desarrollo vegetal del biofertilizante a base de *spirulina* a la fórmula comercial más utilizada, conocida como Triple Pro 15 15 15, atendiendo a parámetros como longitud del tallo, tamaño de las raíces, número de hojas o contenido en clorofila (Wuang, 2016).

De esta forma se consigue desarrollar una solución al problema planteado, basada en recursos biológicos sin apenas generar residuos. Eliminando las impurezas de la mezcla de gases y aprovechando el digestato como fuente de energía para el cultivo que será procesado como un fertilizante de alto valor, generándose así a partir de elementos considerados como residuos en otros escenarios un compuesto de alto valor añadido cuya producción está asociada a la producción de energía renovable.

3 Tecnologías y desarrollos

En este capítulo se hace una revisión de las tecnologías y desarrollos que es necesario conocer para comprender las características del estudio planteado. Todas las etapas contempladas en este estudio se pueden englobar en dos grandes puntos: producción de biogás y reformado del biogás. Un esquema del proceso general se muestra en la figura 2:

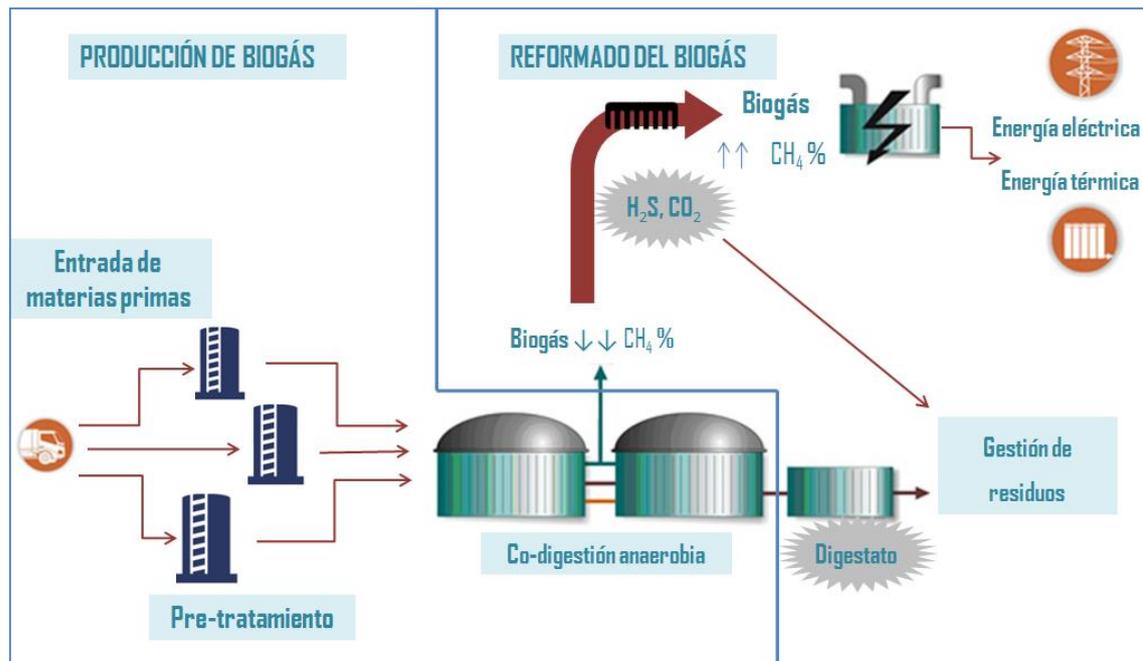


Figura 2. .Etapas del proceso de generación y reformado del biogás. Fuente: elaboración propia.

3.1 Producción de biogás.

El biogás es el producto que se obtiene como resultado de la digestión anaerobia de diferentes materias primas que tiene lugar en digestores con unas condiciones controladas, y el fin más común del biogás es la generación de calor y electricidad en motores o en turbinas de gas (Uusitalo, 2014).

En este apartado se ha dividido el proceso completo de producción de biogás en diferentes etapas: recepción y pre-tratamiento de materias primas, y co-digestión anaerobia.

3.1.1 Recepción y pre-tratamiento de materias primas.

3.1.1.1 Tipos de materias primas.

Las materias primas de partida utilizadas en el proceso de digestión anaerobia pueden ser muy variadas, pueden ser introducidas en los digestores: restos de la industria

alimentaria, restos provenientes de la ganadería y la agricultura, y lodos de diferentes orígenes. Cabe mencionar, por su potencial en producción de biogás las siguientes:

- Productos de origen animal: estiércol, purín y gallinaza.
- Productos de origen vegetal: hierba, hoja de remolacha, paja, trigo y cultivos energéticos, entre otros.
- Productos de la industria alimentaria: desechos de la industria cervecera, desechos hortícolas, aceites y subproductos de origen animal.

Todas estas materias primas, con la excepción de los cultivos energéticos como el maíz, son consideradas como materiales de desecho y, por medio de esta técnica, se consigue reutilizar y revalorizar estos residuos, que, de otra forma, causarían un impacto ambiental considerable. De hecho, en algunos casos, se considera que la alimentación de los digestores con purines es una de las mejores técnicas para conseguir una valorización energética de estos subproductos (Bacenetti, 2013). A pesar de esto, son pocas las plantas de biogás que utilizan este tipo de residuos, la mayoría de las plantas de biogás se alimentan con cultivos energéticos debido al mayor rendimiento en cuanto a la generación de biogás que presentan este tipo de materias primas y se estima que los ensilajes de cereales son la principal materia prima para la producción de biogás en países europeos (Bacenetti, 2013), lo que supone un problema, al entrar en conflicto con otros tipos de usos.

3.1.1.2 Pre-tratamiento de las materias primas.

Los procesos de pretratamiento pueden ser opcionales dependiendo del origen de las materias primas. En algunas ocasiones se pueden emplear procesos de pretratamiento de las materias primas con el objetivo de acelerar el proceso de hidrólisis de la materia orgánica para incrementar la producción, la calidad del biogás, y reducir el tiempo de residencia en el digestor, debido al aumento de la biodegradabilidad (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010). En otras ocasiones, el pretratamiento es totalmente necesario, esto ocurre cuando se tratan subproductos de origen animal que pueden ser potencialmente peligrosos para la salud humana, animal o para el medio ambiente. La norma sanitaria que regula el procedimiento que se ha de llevar a cabo cuando se tratan este tipo de residuos es el reglamento (CE) No 1069/2009 del parlamento europeo y del consejo de 21 de octubre de 2009 por el que se establecen "las normas sanitarias aplicables a los subproductos animales y los productos derivados no destinados al consumo humano" (SANDACH). En esta norma se recogen, en diferentes categorías, los subproductos SANDACH en función del riesgo que implican para la salud pública, animal y medio ambiente, y el riesgo que implican para la protección de la cadena alimentaria humana y animal:

- Categoría 1: se engloban aquellos materiales que presentan un riesgo mayor. El único destino posible de estos materiales es la eliminación. Algunos ejemplos son: materiales específicos de riesgo (MER), productos derivados de

animales a los que se hayan administrado sustancias prohibidas, residuos de catering internacional, etc.

- Categoría 2: materiales que presentan un riesgo intermedio y cuyos usos son distintos de la alimentación animal. Ejemplos: estiércol y contenido del tubo digestivo o animales que mueren sin ser sacrificados para el consumo, incluida la erradicación de enfermedades, entre otros.
- Categoría 3: son los que tienen un menor riesgo; por ello, los usos son más amplios que en las otras dos categorías, incluyendo la alimentación animal en algunos casos. Son las partes de animales que se consideran aptos para el consumo humano de conformidad con la normativa comunitaria, pero que no son destinados a este fin.

En el reglamento (CE) nº 1069/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo, se establecen también los tratamientos que deben recibir para su uso estos materiales en las plantas de biogás. Así es que, ciertos materiales de la categoría 2 (estiércol, tubo digestivo y su contenido, etc.) pueden ser utilizados directamente para su uso en plantas de biogás, el resto de materiales de categoría 2 deben ser sometidos a esterilización. Los materiales de categoría 3 pueden ser utilizados en plantas de biogás sin ningún tratamiento previo. Además, los digestatos obtenidos a partir de material de la categoría 1 deberán ser eliminados, mientras que los digestatos obtenidos a partir de la categoría 2 y 3, pueden ser utilizados como enmienda orgánica en el campo.

3.1.2 Co-digestión anaeróbica de materias primas.

Teóricamente, la digestión anaeróbica consiste en la degradación, por consorcios bacterianos, de los sustratos orgánicos consiguiendo como resultado de este proceso biogás y como co-producto digestato (Heribert, 2015). Existen diferentes tecnologías que permiten llevar a cabo la digestión anaerobia, pero el proceso es similar en todos los desarrollos, variando el rendimiento del proceso en función del tipo de materias primas, del modo de aporte de las mismas y de la proporción de la mezcla (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010). La digestión anaeróbica siempre tiene lugar en las mismas etapas, que se pueden dividir en dos fases; una primera fase hidrolítica y una segunda fase metanogénica. Inicialmente, se produce la hidrólisis de las proteínas, carbohidratos y grasas en sus monómeros. Posteriormente, estos monómeros son metabolizados en un proceso de acidogénesis a ácidos carboxílicos. En el siguiente paso, el de la acetogénesis, los ácidos grasos volátiles son procesados a acetato y como subproductos de esta fase se generan: CO₂ y H₂. Por último, en la última fase, la metanogénica, se obtiene como producto final el biogás (Figura 3).

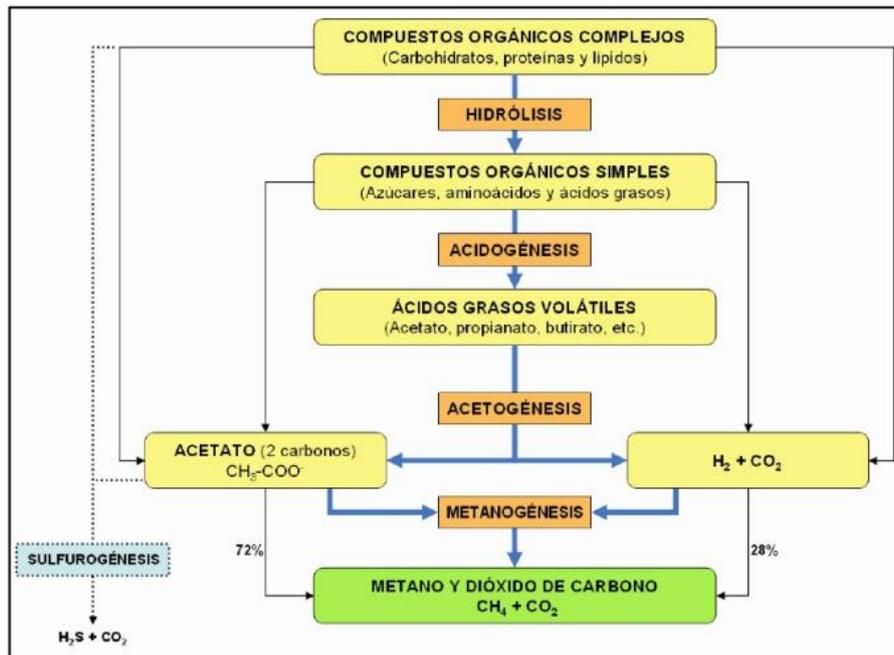


Figura 3. Fases de la digestión anaeróbica. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010.

Como se explicaba en capítulos anteriores, el biogás generado tras la digestión anaeróbica es denominado biogás primario o bruto y contiene cantidades significativas de otros elementos distintos del metano, por lo tanto, debe someterse a un proceso de reformado para alcanzar unos valores adecuados que permitan su aprovechamiento como forma de energía y que cumplan con los estándares del gas natural para ser suministrado a la red. Existen múltiples estrategias de reformado del biogás bruto, por lo que este punto es el que ofrece mayor variación en el proceso global.

Además del biogás, en este proceso se genera el digestato, que es un subproducto importante de la DA ya que puede alcanzar volúmenes elevados, por lo que la sostenibilidad del proceso productivo del biogás depende en gran parte del reciclaje adecuado del material digerido, que debe ser tratado y reutilizado correctamente, evitando así cualquier impacto ambiental negativo (Heribert, 2015).

3.2 Reformado del biogás.

El biogás bruto obtenido en la fase de digestión anaerobia puede ser reformado por medio de múltiples tecnologías que se pueden englobar en métodos físicos, químicos o biológicos. Por otra parte, el digestato también se puede gestionar de diferentes formas y resulta interesante hacerlo teniendo en cuenta el concepto de ecología industrial, englobando esta gestión dentro del proceso general. En este apartado se describen tres metodologías de reformado del biogás y la gestión del digestato más adecuada para cada una de ellas.

3.2.1 Método biológico.

3.2.1.1 *Reformado del biogás mediante el uso de microalgas en un sistema cerrado.*

En este procedimiento se utiliza un consorcio microalga-bacteria capaz de eliminar de la mezcla de gases los principales gases contaminantes: CO₂ y H₂S. Se trata de un método biológico ya que el fundamento de la técnica reside en la utilización de elementos vivos asimiladores de estos compuestos.

El biogás bruto obtenido en la fase de producción es depurado según se muestra en la figura 4, el biogás es suministrado a una columna de absorción por la parte inferior de la misma, mientras un flujo constante de agua con microorganismos degradadores H₂S y algas captadoras de CO₂ es bombeado al interior de la columna de absorción. El consorcio alga-bacteria puede ser cultivado en piscinas abiertas o en fotobioreactores cerrados, lo que conlleva diferencias en cuanto a la densidad del cultivo, la demanda de energía y el coste. La densidad es 10 veces mayor en los fotobioreactores, aunque estos sistemas demandan una gran cantidad de energía y su coste es elevado. Una vez los microorganismos y los gases se encuentran en contacto dentro de la columna, los gases son aprovechados por los microorganismos en su metabolismo y por lo tanto eliminados del flujo de gas, reduciéndose el contenido en CO₂ un 90% y el de H₂S en un 100%, así el gas queda parcialmente libre de impurezas y puede ser inyectado posteriormente a la red y utilizado por las mismas instalaciones. Aplicando este procedimiento de reformado del biogás, el digestato juega un papel protagonista ya que puede ser aportado al cultivo formando parte del aporte de nutrientes esenciales: fósforo, nitrógeno y potasio, consiguiendo así englobarlo en el proceso y constituyendo un ciclo cerrado.

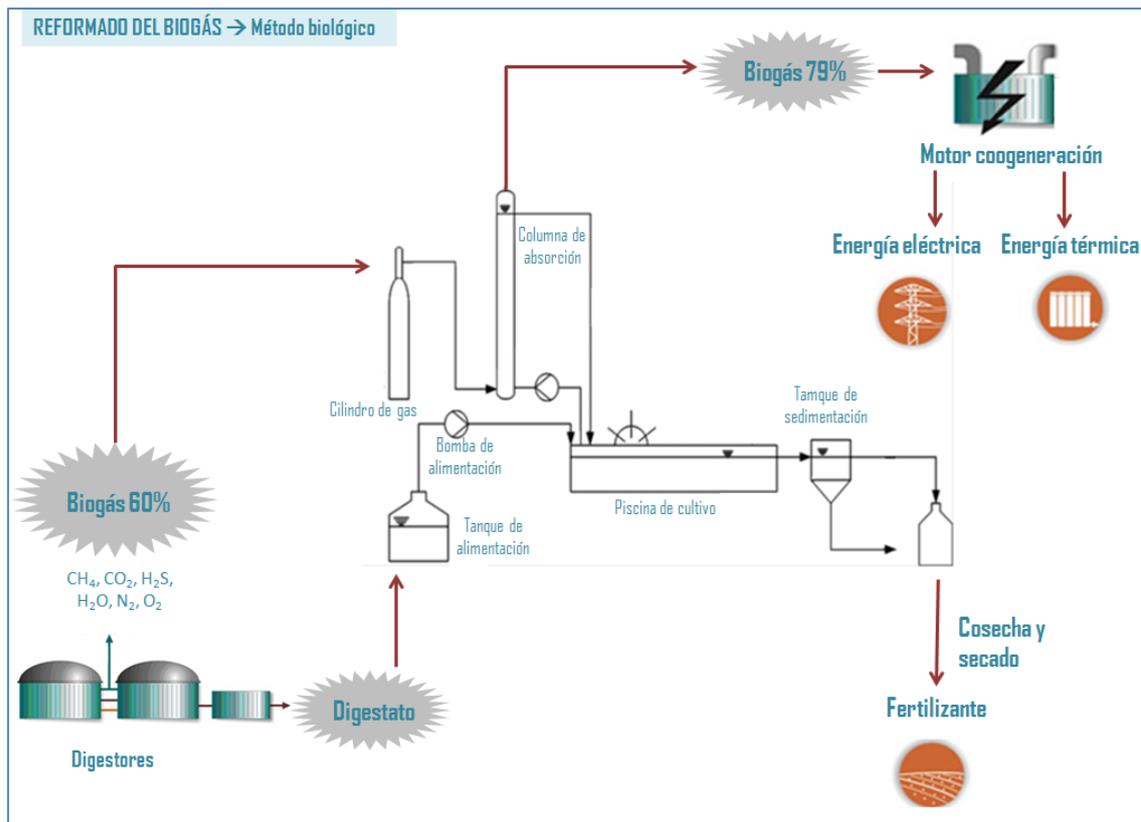


Figura 4. Esquema de purificación de biogás. Fuente: elaboración propia.

3.2.1.2 Aprovechamiento de la biomasa algal.

Tras este proceso se genera un volumen elevado de biomasa algal, que puede ser aprovechada en múltiples procesos. Actualmente, los esfuerzos en investigación en el campo del estudio de las aplicaciones de las microalgas son muy intensos, y las principales aplicaciones que presentan se pueden dividir en dos grandes grupos atendiendo a su uso: aplicaciones energéticas o no energéticas. La mayoría de la biomasa algal se emplea actualmente como biocombustible, siendo el biodiesel el tipo de combustible con mayor trayectoria hasta el momento, aunque también tienen un enorme potencial en la generación de otras fuentes de energía como bioetanol o biogás. Al margen de los procesos energéticos, la producción mundial de microalgas para la generación de compuestos de elevado valor añadido cobra cada vez más importancia, ya que la biomasa de algas, además de contener proteínas, lípidos esenciales, pigmentos, carbohidratos, minerales y vitaminas, posee excelentes cualidades para la obtención de productos naturales. La mayor parte de esta biomasa se comercializa como elementos medicinales en forma de tabletas o polvo para aditivos (Trivedi, 2015). También se pueden extraer compuestos con valiosas aplicaciones como: pigmentos, aditivos alimentarios, antioxidantes y cosméticos. En el campo de la agricultura, estos organismos también tienen un enorme potencial ya que pueden ser usados como biofertilizantes. Se ha demostrado que la suplementación con *S. platensis* favorece el crecimiento de numerosos cultivos vegetales. El uso de *S. platensis* ha sido comparado con el uso de

fertilizantes convencionales y se ha visto que se puede asemejar a algunos de los más usados en agricultura como el Triple Pro 15-15-15, obteniéndose valores similares en los parámetros de crecimiento de las plantas y mejores en algunas especies como la rúcula, donde se vio que la germinación de las semillas se veía acelerada cuando se utilizaban fertilizantes a base de *Spirulina* (Wuang, 2016).

Uno de los principales problemas de todos los procesos que tienen como objetivo el aprovechamiento de la biomasa algal se encuentra en la fase de cosecha y secado, especialmente cuando se trata de cultivos en estanques abiertos, donde las concentraciones de los cultivos de microalgas son generalmente bajas, presentando valores de 0,5g/L. Esto significa que tiene que ser eliminado un gran volumen de agua para cosechar la biomasa. En cultivos de algunos tipos de algas es posible la recolección por simple sedimentación pero en otros casos, como el de *Spirulina*, el pequeño tamaño de las células (2-20 μ m) y su estabilidad coloidal en suspensión no permite obtener buenos rendimientos de recolección con este método (Vandamme, 2013).

Un método muy común que permite realizar el cosechado de la biomasa algal es la centrifugación, aunque es una técnica simple no es viable económicamente para un proyecto a gran escala y presenta un alto consumo de energía asociado. Para reducir los costes de recolección y la demanda de energía se puede optar por pre-concentrar las células por floculación (Brentner, 2011). La floculación es una técnica que favorece la formación de agregados celulares que pueden ser separados del medio por sedimentación por gravedad (Figura 5). La floculación es una de las partes que forman el proceso de secado y permite concentrar la suspensión diluida de partida (0,5 g / L) entre 20 a 100 veces a una suspensión más concentrada (10-50 g / L) (Vandamme, 2013). La siguiente fase de este proceso consistiría en la sedimentación de los fragmentos agregados.

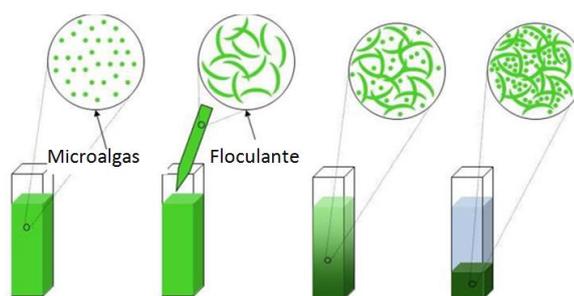


Figura 5. Esquema del proceso de floculación. Fuente: adaptado de Salim, 2011.

La floculación de las células se puede conseguir aplicando diferentes estrategias, si bien el fundamento en el que se basan todas ellas es el mismo. Las partículas suspendidas en el agua, por lo general, tienen una superficie cargada positiva o negativamente. Para mantener la neutralidad eléctrica, tales partículas cargadas se sienten atraídas por iones con carga opuesta a la solución formándose una nube de contraiones alrededor de la

partícula, lo que produce la repulsión eléctrica entre partículas. El potencial z, es la diferencia de potencial entre el fluido y la capa de contraiones que permanece asociada a la partícula cargada cuando la partícula se está moviendo a través de la solución y es un indicador útil del grado de repulsión entre partículas cargadas en una suspensión. Cuando el potencial z es alto (> 25 mV, positivo o negativo), la repulsión eléctrica entre partículas es fuerte y la suspensión se dice que es estable. Cuando el potencial z es cercano a cero, las partículas pueden acercarse entre sí en un punto en el que se ven atraídas por las fuerzas de Van der Waals. Cuando eso sucede, las partículas se agregan y ocurre la floculación (Vandamme, 2013).

Tras la etapa de cosecha se emplean comúnmente, procesos de deshidratación para aumentar el contenido de sólidos de las suspensiones de algas antes de pasar a otros procedimientos, tales como la extracción de biofuel o la elaboración de fertilizantes. Diversas tecnologías, incluyendo las cintas de filtración por prensado, el secado térmico y la centrifugación han sido utilizadas para la deshidratación de las algas en estudios previos (Udom, 2013). La selección de una tecnología de filtración apropiada se basa típicamente en el contenido de sólidos iniciales de la suspensión de algas y el contenido final de sólidos requerido.

3.2.2 Métodos físicos.

3.2.2.1 *Reformado del biogás mediante PSA.*

La técnica de adsorción por cambio de presión (en inglés "Pressure Swing Adsorption" o PSA) es una tecnología utilizada para separar gases de acuerdo con sus características moleculares y su afinidad por el material adsorbente aplicando cambios de presión (Zhao, 2010). Aplicando esta tecnología las moléculas del gas son adsorbidas selectivamente a superficies sólidas o adsorbentes de acuerdo a su tamaño molecular del siguiente modo, el biogás bruto entra en la columna (Figura 6), donde el CO₂ es adsorbido sobre el material del lecho mientras que el metano fluye a través de la columna, debido al tamaño mayor de la molécula de CH₄ respecto a las otras moléculas que componen la mezcla de gases (Patterson, 2011), cuando el lecho está saturado de CO₂ se purga la columna simplemente disminuyendo la presión y el gas rico en CO₂ se bombea fuera de la columna, la columna se regenera y puede ser represurizada volviendo a utilizarse (Zhao, 2010).

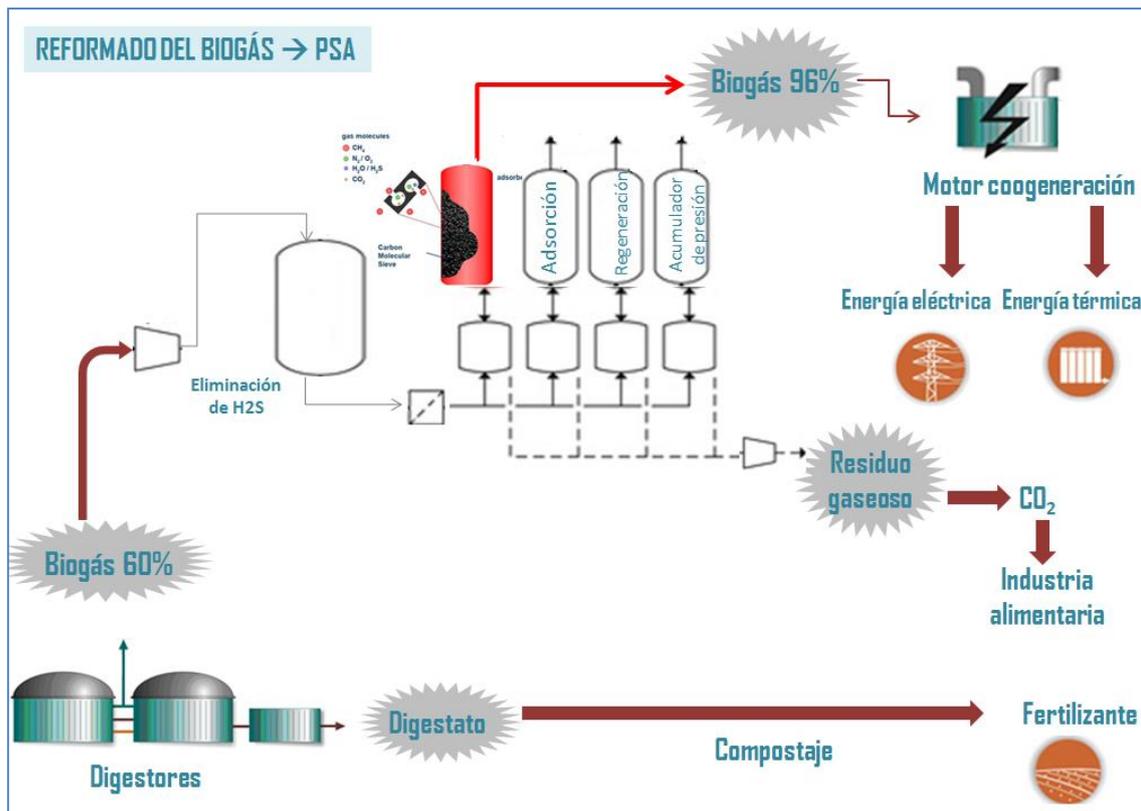


Figura 6. Reformado del biogás por el método de PSA. Fuente: elaboración propia.

Entre las principales ventajas que ofrece esta técnica, cabe mencionar que se puede conseguir más de un 97% de enriquecimiento de CH₄, además presenta una demanda de energía baja, y la emisión de gases es baja (Sun, 2015). Sin embargo, es necesario aplicar una etapa inicial de eliminación de H₂S, que consiste normalmente en la incorporación de una columna específica de adsorción para este compuesto. Además, este proceso tiene un coste elevado y los gases eliminados de la mezcla deben ser tratados o gestionados (Zhao, 2010). Por otra parte al no poder introducirse el digestato en el ciclo este debe ser gestionado en otro proceso.

3.2.2.2 Reformado del biogás mediante el método criogénico.

Esta técnica se basa en que el CO₂, el H₂S y los demás contaminantes del gas licuan a diferentes combinaciones de presión y temperatura, lo que hace sencillo separarlos del metano. El proceso requiere una serie de compresores e intercambiadores colocados en línea. En un primer momento el biogás pasa por un intercambiador de calor que baja la temperatura del gas hasta los -70°C aproximadamente. A continuación pasa por diferentes compresores e intercambiadores de calor en cascada que llevan el gas a -100°C y 40 bares de presión, condiciones en las que entra en una columna de destilación que separa el metano de los contaminantes. Se puede utilizar para tratar altas cantidades de gas con resultados de gran pureza, sin embargo se debe contemplar que este proceso tiene dos salidas principales: biogás reformado y CO₂ a presión. El CO₂ puede ser utilizado, en la industria alimentaria (Figura 7). La principal ventaja de esta técnica es que se

pueden almacenar todos los gases resultantes por lo que el CO₂ no se emite a la atmósfera, y como principal desventaja esta técnica presenta un fuerte consumo de energía. En este caso el digestato tampoco puede ser incorporado en el proceso, por lo que es necesario gestionarlo de forma paralela.

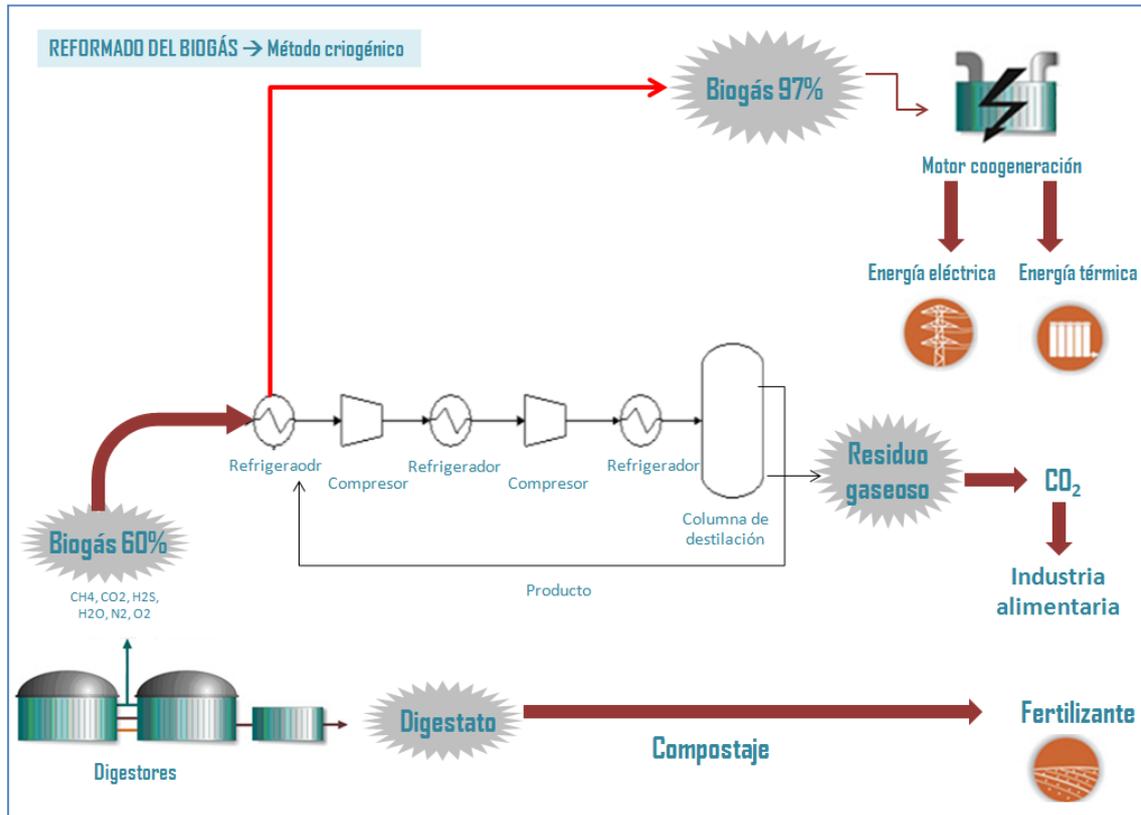


Figura 7. Reformado criogénico del biogás. Fuente: elaboración propia

3.2.2.3 Aprovechamiento del digestato.

Aplicando los métodos físicos descritos arriba, el digestato se debe gestionar por separado y no se puede incluir en el proceso, aún así una correcta gestión del mismo es fundamental para conseguir sistemas eficientes debido al enorme volumen de material que representa. La forma más fácil de aprovechamiento del digestato es su aplicación directa al campo. El digestato contiene una alta proporción de nitrógeno (N), especialmente en la forma de amonio que es la forma disponible para las plantas y contiene otros macro y microelementos necesarios para el crecimiento de las plantas (Makádi, 2012). Por otra parte, las fracciones orgánicas del digestato pueden contribuir al aumento de la materia orgánica del suelo e influir en sus características físicas, químicas y biológicas. Estos residuos orgánicos son adecuados para contribuir a mantener en el suelo los niveles de nutrientes y la fertilidad adecuados (Tambone, 2010). Por tanto, puede ser una fuente útil de nutrientes para las plantas y parece ser un fertilizante efectivo para el desarrollo de algunos tipos de cultivos ya que el digestato se asemeja al fertilizante de fórmula 6-2-2 utilizado en césped y jardines.

4 Caso de aplicación

En este estudio se muestra un procedimiento de reformado del biogás ubicado en Asturias. El sistema que se describe cuenta con una fase de producción de biogás y una fase de reformado mediante el método biológico, este método será evaluado medioambientalmente mediante la metodología del ACV. En la figura 8 se muestra el esquema general del proceso.

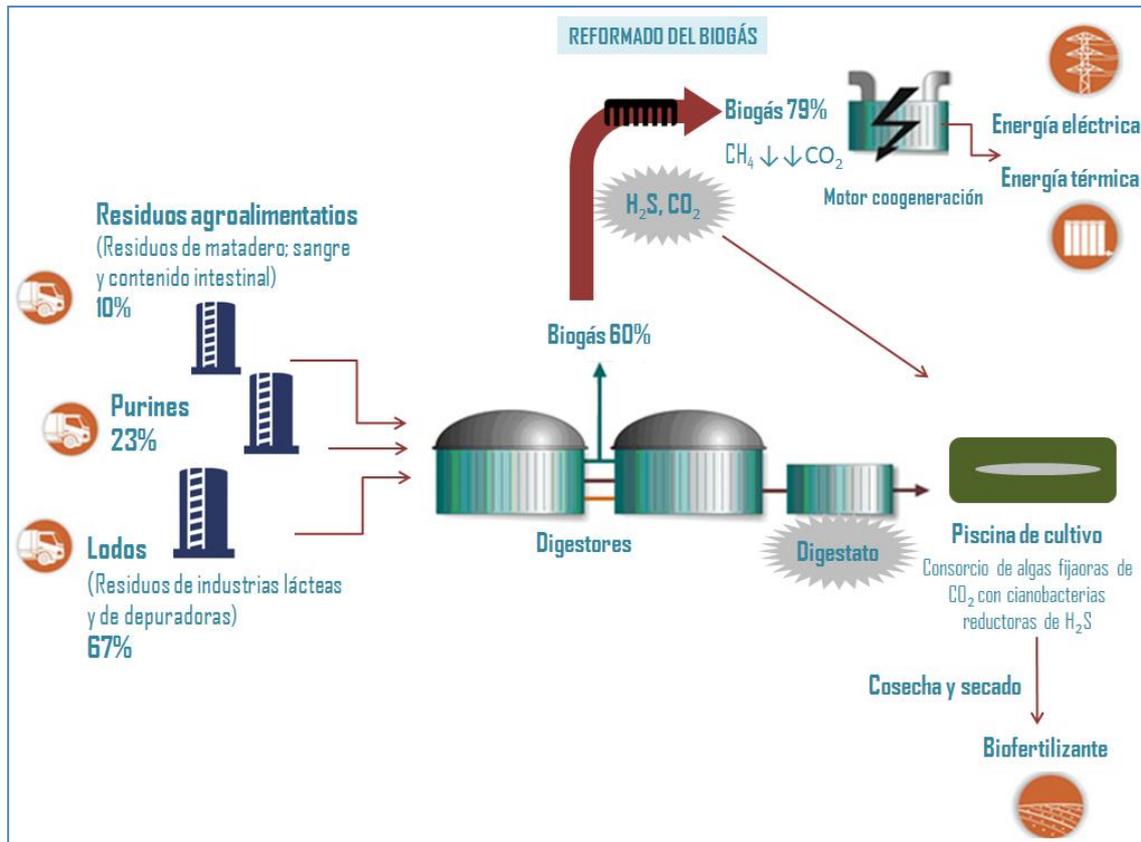


Figura 8. Esquema de las etapas llevadas a cabo para la obtención de biogás reformado y biofertilizante.
Fuente: elaboración propia.

4.1 Producción de biogás.

4.1.1 Recepción y pretratamiento de materias primas.

4.1.1.1 Tipos de materias primas y transporte hasta la planta.

Teniendo en cuenta la ubicación de la planta, es lógico considerar el aprovechamiento de los principales residuos de la zona para la producción de biogás. Debido a esto, y teniendo en cuenta que el Principado de Asturias es una zona con una elevada carga ganadera, parte de las materias primas de partida utilizadas se componen de purines, provenientes de ganaderías cercanas a la planta. Por otro lado, las plantas depuradoras de agua generan un gran volumen de lodos que es necesario gestionar, se cuenta en esta planta,

con un aporte de lodos procedentes de depuradoras importante y también se utilizan en este sistema lodos de otros orígenes, se cuenta con lodos de las principales industrias lácteas de la región y lodos de la propia fosa séptica de las instalaciones. Por último, también se utilizan residuos de la industria alimentaria, compuestos por sangre y el tubo digestivo y su contenido.

4.1.1.2 Pretratamiento de materias primas.

El aporte de materias primas de origen animal define en este caso la necesidad de la aplicación de un método de esterilización, según el reglamento (CE) nº 1069/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo. Los productos de origen animal tratados por la planta son restos del sacrificio de animales sin enfermedades transmisibles, que engloban el tubo digestivo y su contenido y sangre, lo que en este reglamento se considera como material de categoría 2. Según el citado reglamento, estos restos deben ser sometidos a un proceso de esterilización previo a su utilización que consiste en la pasteurización con unas condiciones de temperatura de 70°C durante al menos 60 minutos sin interrupción, tras este tratamiento se considera que estas materias primas no generan riesgos para la salud pública y animal y el medio ambiente, y son almacenadas en tanques.

4.1.2 Co-digestión anaerobia.

Como ya se indicó, las principales diferencias que se encuentran entre los distintos procesos de digestión anaerobia están íntimamente relacionadas con las materias primas de entrada, tanto en la cantidad, como en la proporción de las mismas. En este proceso las materias primas son mezcladas en digestores anaerobios siguiendo unas proporciones determinadas de acuerdo al volumen relativo de materias primas generado en la región.

- Residuos agroalimentarios: residuos de matadero (sangre, tubo digestivo y su contenido), suponen un 10% de la mezcla.
- Purines: constituyen un 23% del volumen final.
- Lodos: residuos de industrias lácteas, depuradores y fosa séptica, 67% del volumen total.

La planta cuenta con dos tipos de digestores (dos digestores termófilos y dos digestores mesófilos). La mezcla es sometida a un primer ciclo de digestión anaerobia en los digestores termófilos y posteriormente es pasada a los digestores mesófilos para continuar de este modo el proceso de digestión. En ambos digestores la mezcla y el calentamiento es continuo.

- En los digestores termófilos la temperatura se mantiene en un rango entre 55-70 °C, con un tiempo de residencia de las materias primas (o almacenamiento) de 20 días.
- En los digestores mesófilos la temperatura se mantiene a 35°C. El tiempo de almacenamiento será de 30-40 días.

Durante todo el proceso se produce biogás bruto que es reformado continuamente y transformado en biogás final, con un contenido más elevado en metano.

4.2 Reformado del biogás mediante la utilización de un consorcio microalga-bacteria.

La especie *spirulina platensis* ha sido ampliamente estudiada, y sus condiciones de cultivo, tasa de crecimiento y requerimientos nutricionales y ambientales están bien definidos. Es fácilmente cultivable en condiciones de laboratorio y ha sido utilizada previamente en procesos industriales, es por ello que ha sido seleccionada como eliminador natural de CO₂ del biogás en este proyecto. Siendo uno de los pilares clave de este proyecto el concepto de ecología industrial, se persigue englobar el sistema dentro de un proceso cerrado y circular eliminando la generación de residuos. En base a esto, el biogás de entrada, que presenta un bajo contenido en metano (64,5% CH₄, 35% CO₂, 0,5% H₂S), es reformado en una columna de absorción, utilizando un consorcio microalga-bacteria alimentado por los gases del biogás y por el digestato. Tras pasar por la columna, el biogás se considera reformado y presenta una composición de 79% CH₄, 21% CO₂ y 0% H₂S. No se generan residuos en este proceso y las únicas salidas del sistema son: el oxígeno resultante del proceso fotosintético, el biogás reformado y la biomasa algal, que es continuamente recogida y secada para ser utilizada en el proceso de generación del biofertilizante. Las características del biogás en cuanto a composición en masa de los diferentes elementos se muestran en la figura 9 y definirán el volumen de biogás generado por el sistema.

El cultivo de microorganismos se realiza en piscinas de cultivo abiertas en lugar de fotobioreactores debido a que conllevan un menor coste. Las piscinas utilizadas en este proceso son poco profundas para favorecer el contacto con la luz de toda la biomasa y se favorece el movimiento continuo del cultivo con el objetivo de promover la mezcla de nutrientes y un crecimiento uniforme en toda la superficie, para lo cual se utilizan paletas eléctricas que remueven la mezcla (Handler, 2012).

4.3 Aprovechamiento de la biomasa algal.

4.3.1 Cosecha de la biomasa algal.

El mecanismo de floculación es aplicado para concentrar la biomasa, en este caso no se utilizan mecanismos que requieran la aplicación de compuestos químicos ni que requieran una elevada demanda de energía. Se utiliza la tecnología del sedimentador coalescente, una técnica novedosa en la que la biomasa saturada de agua es bombeada a través de paquetes de platos, que crean un patrón de flujo, los agregados de algas se hunden hasta el fondo donde se drenan por los grifos de cosecha y se recogen (Figura 9). La mayor ventaja que ofrece este método es que no se requiere la utilización de productos químicos, por otra parte, es relativamente fácil de manejar, fácil de escalar a

volúmenes más grandes y adecuado para entornos agrarios. Tras la aplicación de esta tecnología la biomasa es parcialmente secada y puede ser sometida al siguiente proceso, el proceso de secado final.

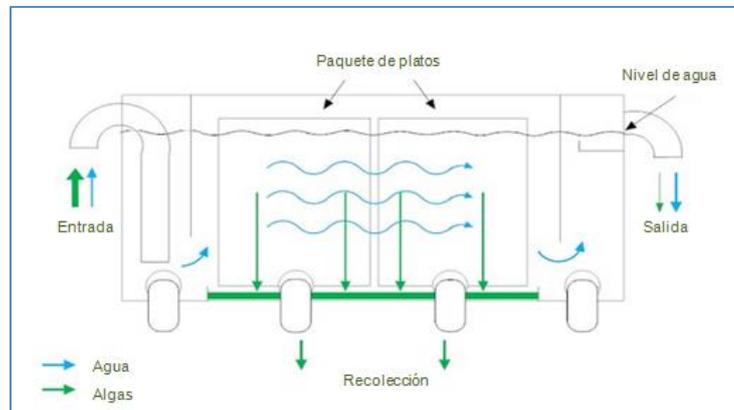


Figura 9. Esquema del proceso de floculación mediante el uso de un sedimentador coalescente. Fuente: elaboración propia.

4.3.2 Secado de la biomasa algal.

En esta etapa del proceso se utiliza el método conocido como “refractance window drying”, es un método de secado de cuarta generación que permite hacer un mayor énfasis en la calidad de los materiales secados, siendo idóneo para la deshidratación de sustancias utilizadas en alimentación (Nindo, 2007). Este método de secado consiste en el acoplamiento de una capa de agua caliente (generalmente a 95-97°C) a un sistema similar a una cinta transportadora, de este forma se consigue que la energía térmica del agua caliente que discurre por la parte inferior por ranuras a modo de acanaladuras se transfiera al material húmedo depositado a modo de película delgada sobre una cinta transportadora. La cinta se mueve mientras está en contacto con el agua caliente y el secado se produce de forma rápida. El producto seco es entonces raspado fuera del transportador mediante una rasqueta que se extiende a lo ancho de la cinta (Nindo, 2007). Esta biomasa totalmente seca es directamente aplicada al campo como fertilizante en la agricultura (Wuang, 2016).

"Análisis de sostenibilidad de un sistema cerrado de producción de algas para fijación de CO₂"

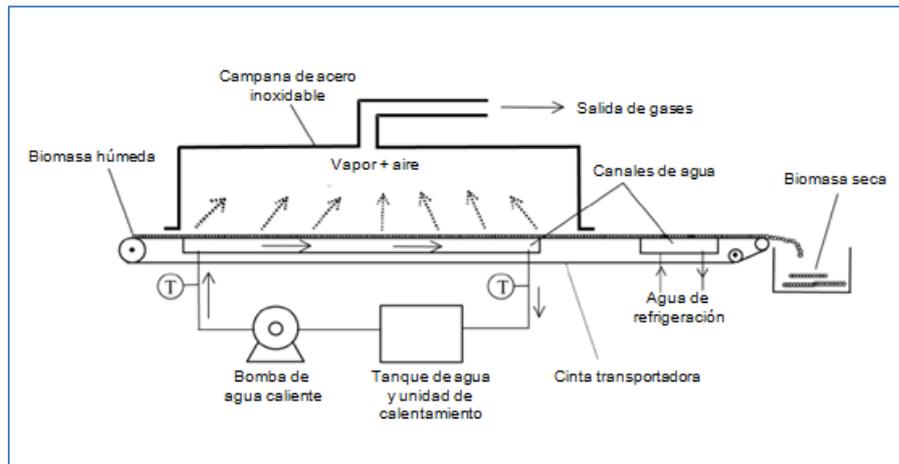


Figura 10. Secado por la tecnología de "refractance window drying". Fuente: adaptado de Nindo, 2007.

5 Metodología utilizada

5.1 Concepto de análisis de ciclo de vida (ACV).

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta metodológica que se define según la norma UNE-EN ISO 14040:2006 de gestión ambiental como: una técnica que permite evaluar los aspectos ambientales y los potenciales impactos asociados con un producto, proceso o actividad a través de: la recopilación de un inventario de entradas y salidas relevantes del sistema, la evaluación de los potenciales impactos ambientales generados y la interpretación de los resultados de las dos etapas anteriores. Mediante el ACV se analizan todos los aspectos ambientales y los consecuentes impactos a lo largo de la vida de un producto, identificando y cuantificando los consumos de energía y materiales y los residuos generados, permitiendo así identificar y evaluar las alternativas que puedan suponer mejoras ambientales. Por ello, el ACV puede ayudar en la identificación de potenciales mejoras en las distintas etapas del ciclo de vida de un producto, en la planificación de estrategias, el establecimiento de prioridades o el rediseño de productos o procesos, entre otros.

La principal característica de esta herramienta es su enfoque holístico, ya que se basa en la idea de que las propiedades de un sistema no pueden ser determinadas o explicadas de una manera individual como la suma de sus componentes, sino que el sistema completo se comporta de manera diferente que la suma de sus partes.

5.2 Normativa que rige el ACV.

La Organización Internacional de Normalización (ISO) ha desarrollado una serie de normas sobre el ACV y Gestión ambiental que se engloban en la serie ISO 14040. (ISO 14040, 2006)

- ISO 14040 (2006): Norma sobre Gestión Ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Principios y estructura (1997, actualizada en 2006). Ofrece una visión general de la práctica, aplicaciones y limitaciones del ACV.
- ISO 14044 (2006): Gestión Ambiental- Análisis del Ciclo de Vida y requerimientos.
- ISO/TR 14047 (2012): Norma sobre Gestión Ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Ejemplos de aplicación de la ISO 14044 (2003).
- ISO/TS 14048 (2002): Norma sobre Gestión Ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Normalización de datos e información para una evaluación de ciclo de vida (2002).
- ISO/TR 14049 (2012): Norma de Gestión Ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Ejemplos de aplicación para realizar un ICV de acuerdo con ISO 14044 (2000).

En este trabajo se han seguido las normas ISO 14040/44:2006 que establecen un marco metodológico para la ejecución del ACV en cuatro pasos: definición de objetivos y alcance, análisis del inventario del ciclo de vida, asignación y evaluación del impacto e

interpretación. Estas fases no son secuenciales y el ACV es una técnica iterativa que permite ir incrementando el nivel de detalle.

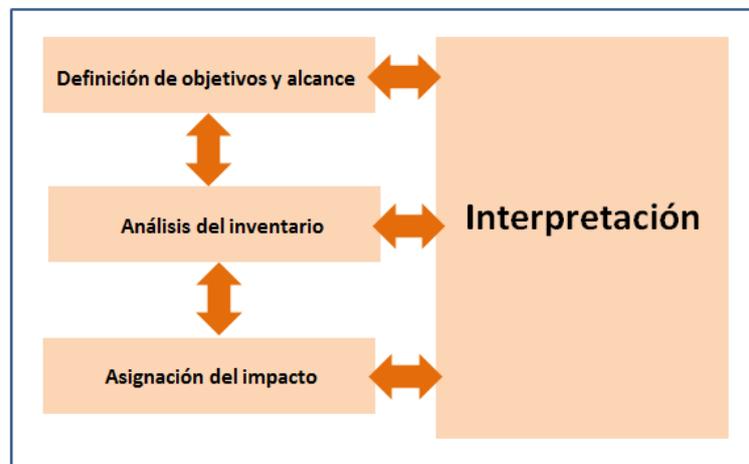


Figura 11. Etapas del ACV. Fuente: elaboración propia.

- **Definición de objetivos y alcance:** un ACV comienza con una declaración explícita del alcance, la unidad funcional, los límites del sistema, asunciones, limitaciones, métodos de asignación de impacto utilizado y las categorías de impacto utilizadas.
- **Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (AICV):** en esta etapa se realiza una modelización de todos los flujos de entrada y salida que entran en juego en el sistema definido previamente para obtener el Inventario de Ciclo de Vida. Estos flujos son, por ejemplo, recursos, energías, emisiones al aire y al agua, y la generación de residuos. Todas estas cargas ambientales han de estar referidas a la unidad funcional.
- **Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV):** este proceso consiste en la caracterización de los datos del inventario en términos de impactos ambientales potenciales. La caracterización supone la conversión, mediante factores de caracterización, de los resultados del inventario en unidades comunes y su agregación en categorías de impacto.
- **Interpretación:** se estudian los resultados obtenidos tanto en la fase de inventario como en la de evaluación del impacto para llegar a una serie de conclusiones y formular las recomendaciones que se consideren oportunas.

5.3 Definición de objetivos y alcance.

El objetivo de este estudio es comparar diferentes escenarios de reformado del biogás y de gestión del digestato generados a partir de la digestión anaeróbica. Esta comparación se establece en base a la unidad funcional seleccionada para ello que será 1 tonelada de fertilizante.

El alcance de este estudio engloba todo el proceso desde la recolección de las materias primas hasta la elaboración final de un fertilizante, bien sea un fertilizante con base algal o simplemente un fertilizante producto del compostaje del digestato. En cuanto al biogás en sí, el alcance del estudio comprende hasta la obtención del biogás reformado.

5.3.1 Unidad funcional.

La unidad funcional es el elemento clave del ACV y ha de ser definido claramente. Es la medida de la función del sistema estudiado y da una referencia de cuáles son las entradas y salidas relacionadas y permite la comparación de dos sistemas diferentes. Existen estudios aplicados a diferentes tecnologías de reformado de biogás que utilizan como unidad funcional la energía eléctrica generada, por ejemplo 1MWh (Turconi, 2013), otros utilizan también la energía eléctrica generada pero referida a 1 MJ (Perilhon, 2012). Puesto que el objetivo de este estudio es comparar diferentes estrategias de reformado del biogás sería lógico considerar alguna de estas unidades funcionales, sin embargo, cada estrategia de reformado ofrece diferentes eficiencias de transformación y, además del biogás reformado, también se obtiene un volumen elevado de fertilizante, por lo que la unidad funcional escogida para este sistema es 1 tonelada de fertilizante obtenido.

5.3.2 Escenarios.

Se definen tres escenarios, basados en diferentes tecnologías de reformado y gestión del digestato.

5.3.2.1 *Escenario 1. Reformado del biogás mediante el método biológico y elaboración de un biofertilizante a base de microalgas (caso de aplicación).*

En este escenario se contempla la estrategia biológica de reformado del biogás, utilizando un consorcio microalga-bacteria, para conseguir eliminar de la mezcla las impurezas, obteniendo finalmente biogás y una biomasa algal que es secada y comercializada como biofertilizante con características similares al comúnmente conocido Triple Pro 15-15-15.

5.3.2.2 *Escenario 2. Reformado del biogás mediante la tecnología PSA y elaboración de un fertilizante a base de digestato.*

En este escenario se plantea un reformado del biogás siguiendo el método "Pressure Swing Absorption" o PSA, mediante el cual se obtiene el biogás reformado y un efluente de CO₂ y otros gases. En cuanto al digestato, se plantea su aplicación al campo después de ser secado y compostado, utilizándolo como abono, siendo este similar al comercialmente conocido N-P-K 6-2-2, utilizado en jardinería.

5.3.2.3 *Escenario 3. Reformado del biogás mediante el método criogénico y elaboración de un fertilizante a base de digestato.*

En este caso se plantea un reformado del biogás por medio del método criogénico, con la obtención de biogás reformado y un efluente de CO₂ separado del resto de gases, se

plantea aquí la gestión del CO₂ por medio de la industria alimentaria, mediante el envío a la embotelladora de sidra El Gaitero, situada en Villaviciosa, Asturias. El digestato se gestiona de la misma forma que en el caso anterior y es aplicado como abono, con unas características similares al citado N-P-K 6-2-2.

5.3.3 Límites del sistema.

Los límites del sistema definen los procesos unitarios que forman parte del análisis (Luiña, 2012), qué cargas ambientales deben ser estudiadas, así como el nivel de detalle al que se pretende llegar. Se analizó el sistema considerando los impactos desde el transporte de las materias primas hasta la obtención del biofertilizante o del compost. Se incluyen las infraestructuras necesarias, así como los procesos de obtención de los materiales e insumos.

Se ha considerado el mix energético eléctrico español y el suministro de gas natural de España. La extensión del estudio a otros países requeriría las adaptaciones correspondientes.

5.3.4 Calidad de los datos.

La calidad de los datos se basa en la precisión (medida, calculada o estimada), la integridad, la coherencia (uniformidad en la metodología utilizada) y la representatividad (período de tiempo, geografía y tecnología).

Los datos se han obtenido a partir de las siguientes fuentes:

- Datos bibliográficos. Se priorizaron los datos de instalaciones existentes y de capacidad equivalente.
- Datos procedentes de bases de datos de ICV actualizadas, se utilizó en este caso la base de datos de Ecoinvent.

5.3.5 Bases de datos y software.

Como base de datos se utiliza Ecoinvent, desarrollada por el centro suizo del mismo nombre, cuyos inventarios engloban datos internacionales sobre consumo de energía, extracción de recursos, distintos tipos de materiales, productos químicos, metales, procesos agrícolas, gestión de residuos y servicios de transporte. Hoy en día, es la base de datos más extendida en la mayoría de las herramientas del ACV, si bien es cierto que durante los últimos años la base de datos PE Internacional está ganando posiciones, ya que contiene la misma base de datos que Ecoinvent y además añade algún otro proceso.

El software utilizado para el desarrollo de este análisis es SimaPro, que es un software de referencia en todo el mundo, desarrollado por la consultora holandesa PréConsultants, que permite realizar análisis de ciclo de vida, mediante el uso de bases de datos de inventario propias y bibliográficas (Ecoinvent, BUWAL, IDEMAT, ETH, IVAM).

5.3.6 Criterios de corte.

Los criterios de corte permiten la exclusión de los materiales, la energía y los datos de emisiones siguiendo los siguientes criterios:

- **Masa:** si el proceso representa menos del 3% de la masa primaria total del inventario puede ser excluido, siempre y cuando el impacto ambiental no sea relevante.
- **Energía:** si el proceso representa menos del 3% de la energía primaria total del inventario puede ser excluido, siempre y cuando el impacto ambiental no sea relevante.
- **Relevancia ambiental:** supone que un proceso particular que cumpla con las condiciones anteriores, debido a las características especiales del material o de la forma de producción de la energía tiene un impacto ambiental en algunas de las categorías mayor del 5%. En tal caso no podrá ser excluido.

Los procesos que han quedado excluidos debido a su baja relevancia final en el proceso son los siguientes:

- El transporte de los trabajadores hasta la planta.
- El consumo de carbones activados en el sistema PSA ya que así se recomienda en Ecoinvent.

5.3.7 Categorías de impacto ambiental.

La Evaluación del Impacto es un paso importante para medir los impactos ambientales en el ACV. Los métodos deben contener los siguientes aspectos:

- **Caracterización:** Las sustancias que contribuyen a una categoría de impacto se multiplican por un factor de caracterización que expresa la contribución relativa de la sustancia.
- **Evaluación del daño:** Para ello se hace uso de los métodos de puntos finales, como Eco-indicador 99. Su finalidad es combinar los indicadores de categorías de impacto con las categorías de daño. En este paso se pueden añadir los indicadores de categoría de impacto que tengan unidades comunes.
- **Normalización:** Muchos métodos permiten comparar los resultados de indicadores de categoría de impacto por un valor de referencia. Una referencia usada normalmente es la carga ambiental media anual por país o continente dividida entre el número de habitantes.
- **Ponderación:** Algunos métodos permiten ponderar mediante las categorías de impactos. Esto significa que el indicador de la categoría de daño o de impacto resulta de multiplicar por un factor de ponderación, y se añade para crear una única puntuación. La ponderación se puede aplicar en puntuaciones que hayan sido normalizadas o no.

La norma ISO 14044 no especifica ninguna metodología ni hace ninguna recomendación sobre la elección del método o de las categorías de impacto.

De entre todos los métodos disponibles se han seleccionado los que mejor se adaptan a las características de este estudio y son los siguientes:

- **ReCiPe**, ya que es la actualización de Ecoindicador 99 (el método más extendido hasta ahora) y CML (basado en el análisis de la categoría de "agotamiento de recursos abióticos") y que cuenta con una categoría de impacto intermedio (Midpoints) que es "Cambio Climático", permitiendo así conocer la Huella de Carbono, así como otra categoría de impacto intermedio que es "Agotamiento de Agua", que se traduciría como la Huella Hídrica.
- **CExD (Cumulative Exergy Demand)** que permite cuantificar la energía total demandada a lo largo del ciclo de vida del producto conocida como la suma de la energía de todos los recursos utilizados en el sistema.
- **"Ecological scarcity"** ya que mide el peso de los impactos ambientales (emisiones contaminantes y consumo de recursos) aplicando eco-factores. El eco-factor de una sustancia deriva de la legislación ambiental o de los objetivos políticos correspondientes, así cuanto más se sobrepasen las emisiones contaminantes o el consumo de recursos mayor será el eco-indicador.
- **Berger et al., 2014**, se trata de un indicador de la huella hídrica, es decir, del uso del agua tanto directo como indirecto, se mide en términos de volumen de agua consumida (evaporada o que no retorna) y/o contaminada por unidad de tiempo.

6 Análisis ambiental

6.1 Inventario del ciclo de vida.

La manera y forma en la que se recopilan las entradas/salidas en un análisis de ciclo de vida se conoce como Inventario de ciclo de vida (ICV), y es la fase del análisis del ciclo de vida que más esfuerzos requiere. En esta etapa es necesario recopilar todos los datos de entradas y salidas del sistema, bien sea mediante información propia del sistema, bases de datos como EcoInvent o referencias bibliográficas. El inventario se estructura de acuerdo a los diferentes escenarios definidos, existe una parte común a todos los escenarios que es la parte referente a la producción de biogás que se describe de forma independiente y que será tomada en consideración por todos los escenarios planteados.

6.1.1 Producción de biogás.

6.1.1.1 *Transporte de las materias primas de entrada.*

Las materias primas de partida que se utilizan para la obtención del biogás son residuos de diferentes tipos de industrias y ganaderos y se pueden clasificar en tres bloques:

- **Purines:** procedentes de las explotaciones ganaderas de vacuno cercanas a la planta, considerándose un radio de 15 km.
- **Lodos:** residuos procedentes de las principales industrias lácteas y depuradoras del Principado de Asturias.
- **Residuos agroalimentarios:** compuestos por sangre y contenido intestinal de origen avícola, procedentes de un matadero situado a 200 km de distancia.

Se trata en todos los casos de sustancias que deberían ser gestionadas como residuos y cuya gestión lleva asociados unos impactos ambientales de emisiones de gases de efecto invernadero, de consumo de energía o de infraestructuras destinadas a tal fin, sería lógico considerar que gracias a su reutilización se han evitado los impactos que conllevaría el tratamiento de los mismos en instalaciones específicas. Sin embargo, como esto es difícil de determinar se ha optado por no tener en cuenta estos impactos, que serían en todo caso impactos evitados de cara al análisis de ciclo de vida, para minimizar lo máximo posible los errores que se pudiesen cometer y sólo se tiene en cuenta el transporte de estas materias primas hasta la planta de digestión. El inventario del proceso de transporte de las materias primas a la planta tiene en cuenta los impactos producidos medidos en unidades tkm, lo que equivale al desplazamiento de una tonelada de producto a una distancia de un kilometro (Luiña, 2012). Para realizar la asignación de los impactos de la fase de transporte hasta la planta se tienen en cuenta los valores registrados en la base de datos de EcoInvent modelados de acuerdo a las características del transporte.

La planta de generación de biogás que se plantea en este estudio se sitúa en Asturias, una zona con una carga ganadera elevada, por lo que el aporte de purines se realizará desde granjas cercanas a la planta. Se considera que los purines recogidos provienen de un radio de 15 km como máximo respecto a la planta de tratamiento y que el transporte se realiza en los propios tractores de los ganaderos de la zona. Como existen diferentes tipos de tractores, se considera que corresponden a las categorías EURO 0 a EURO 4, lo que permite englobarlos a todos. El volumen anual de entrada de este tipo de residuo es de 536 toneladas/año.

Los residuos de matadero se componen de restos de origen avícola y son transportados desde unos 200 km de distancia a la planta, son llevados a la planta en camiones de la categoría EURO 5 con una capacidad de 10-20 toneladas, llegando a la planta 233 toneladas/año.

Los lodos procesados en esta planta tienen tres orígenes: lodos de depuradoras, lodos de industrias lácteas y lodos de la propia fosa séptica de la industria. Las depuradoras que envían sus lodos a la planta se encuentran en un radio de 70 kilómetros y los residuos se transportan en camiones de la categoría EURO 5 de una capacidad de 20-40 toneladas, representan un volumen de 723 toneladas/año. Los lodos de origen lácteo provienen de las principales industrias lácteas de la región, que son Danone, la Central Lechera Asturiana, Industrias Lácteas Monteverde y RenyPicot, se les asigna de media un recorrido de 65 km hasta la planta y representan un volumen de entrada de 536 toneladas/año. El resto de lodos tratados en la planta provienen de la propia fosa séptica de la industria y son residuos acuosos del lavado de las cisternas de los vehículos o los equipos, representan unas 303 toneladas/año y no requieren de transporte por lo que no se tienen en cuenta para calcular el total de tkm pero si se tiene en cuenta este volumen como una entrada, en el sentido en el que se engloban en el proceso posterior de pasteurización. Teniendo en cuenta todo lo anterior, el volumen total de entrada de las materias primas a la planta de digestión anaerobia se considera constante, con una entrada anual de 2.331 toneladas totales, las cuales se distribuyen de acuerdo a las proporciones indicadas en la tabla 2.

Tabla 2. Volumen de entrada de materias primas en la planta de producción de biogás y cálculo en unidades TKm.

Tipo de materia prima	Proporción	Volumen anual (Tn/año)	Distancia recorrida (km)	TKm
Purines	23%	536	15	8.040
Lodos				
Lodos de depuradora	31%	723	70	50.610
Lodos lácteos	23%	536	65	34.840
Lodos de fosa séptica	13%	303	0	0
Residuos agroalimentarios	10%	233	200	46.600

6.1.1.2 *Digestión anaerobia.*

Como ya se indicó, la cantidad de biogás generado depende de las materias primas utilizadas y de sus proporciones principalmente, siendo especialmente relevante el contenido en sólidos volátiles (SV) de la mezcla.

La cantidad media de purín producido por un rumiante de unos 250 kg al día se estima que es igual al 9% de su peso corporal, lo que se corresponde con unos 22,5 kg/día (Abdeshahian, 2016), el purín tiene una proporción de sólidos volátiles del 19,52 % y un rendimiento en producción de biogás de 182 mL/g SV (Qiao, 2011). En base a estos datos y teniendo en cuenta que se gestionan 536 toneladas/año de purines, se estima que se gestionan 104,627 toneladas/año de SV provenientes de este material, a partir de los cuales se estima que se generan 19.042 Nm³ de biogás/año.

Se entiende que la cantidad de contenido intestinal y de sangre obtenida de animales es proporcional al peso corporal y edad del animal, se considera que es del 8% del peso corporal en los grandes rumiantes y del 3% del peso corporal en los pequeños animales (Abdeshahian, 2016), a la planta llegan restos de origen avícola, con una proporción de sólidos volátiles del 17,04% que presentan un rendimiento de 781mL/gSV (Qiao, 2011). El volumen de entrada de este producto es de 233 toneladas/año, que contienen 39,7 toneladas/año de SV y a partir de ellos se producen 31.008 Nm³ biogás/año.

Los lodos contienen una proporción de sólidos volátiles de 10,63% (Qiao, 2011) y su rendimiento en producción de biogás es de 202mL/g de SV (Qiao, 2011). Ya que se aportan en total 1.562 toneladas/año, con un contenido en SV de 166 toneladas/año, el volumen final de biogás producido a partir de lodos es de 33.540 Nm³ biogás/año.

Teniendo en cuenta todos los cálculos explicados anteriormente se estima que se producen al año 83.590 Nm³biogás/año.

- **Infraestructura.**

○ **Tanques de pasteurización y almacenamiento.**

Las materias primas, según llegan a la planta son almacenadas individualmente en los tanques de pasteurización y posteriormente son pasteurizadas a 70°C durante 60 min. Los tanques que se utilizan en este proceso son los registrados en la base de datos de Ecoinvent, se trata de cuatro tanques de pasteurización de una capacidad de 4.000 m³ cada uno, 16.000 m³ en total, con una vida media de 50 años.

○ **Digestores anaerobios.**

Las materias primas, una vez pasteurizadas, son enviadas, mediante tuberías, a los digestores que se encuentran en las propias instalaciones. Las materias primas tienen un tiempo de residencia en los digestores de 30 días, tiempo en el que se produce la digestión anaeróbica y se genera el biogás. Se cuenta con 4 digestores, dos mesófilos y dos termófilos, cuya infraestructura se muestra en la tabla 3. Cada uno de estos digestores tiene una vida media de 25 años.

Tabla 3. Inventario de la infraestructura de la planta de digestión anaerobia.

Infraestructura DA	Valor
Número de digestores	4
Componentes de 1 digestor:	
Arena	11.146 kg
Hormigón	1.853 kg
Cloruro de polivinilo	10.536 kg
Aluminio	3.052 kg
Acero de refuerzo	319 kg
Aleación de aluminio	119.958 kg
Hierro fundido	187.934 kg
Polietileno	3.910 kg
Cobre	2.993 kg
Grava	197.183 kg
Vida media	25 años

○ **Almacenaje del digestato.**

El digestato debe ser almacenado antes de su reutilización, para ello se tiene en cuenta en este inventario, que se necesitan tuberías y un tanque de almacenamiento. Las tuberías son de acero recubiertas de plástico similares a las destinadas para el transporte de purín, estas tuberías se toman de la base de datos de Ecoinvent y tienen una vida media de 30 años. El digestato es almacenado en tanques de 16.000 m³ con una vida media de 50 años, obtenidos de la base de datos de Ecoinvent.

- **Demanda energética.**

Basándose en un modelo similar a este (Luiña, 2015) se estima que la demanda energética de del proceso de digestión anaerobia es de 11,62 MWh eléctricos y de 71 MWh de calor. Esta energía se produce por la propia planta y la demanda energética de este proceso se tiene en cuenta dentro del balance global de cada escenario, considerando este punto igual para todos ellos.

- **Emisiones y residuos.**

No se cuenta con emisiones en este proceso ya que los escapes de gases son inexistentes al contar con sistemas herméticamente cerrados. El volumen de digestato generado tras este proceso es elevado y podría considerarse como un residuo de esta etapa, sin embargo, este digestato es procesado en todos los escenarios propuestos aunque de forma diferente. El volumen de digestato producido en el proceso de digestión anaeróbica por esta planta ha sido estimado en función del obtenido en una planta con unas características similares y con una composición de materias primas de entrada equivalente al caso planteado en este estudio. En este trabajo se estimaba que la proporción de materias primas que se convierten en digestato es del 96% (Luiña, 2012), teniendo en cuenta que en el sistema planteado en este estudio se contaba con un volumen inicial de materias primas de 2.331 ton/año, la producción anual de digestato corresponde a 2.242 toneladas/año.

Del proceso de digestión anaerobia se obtiene como salidas biogás y digestato, el biogás es tratado y será la entrada principal de los tres escenarios propuestos. El digestato es gestionado de diferentes formas según el escenario en el que nos encontremos.

6.1.2 Reformado del biogás.

6.1.2.1 *Escenario 1. Reformado del biogás mediante el método biológico y elaboración de un fertilizante con base de microalgas.*

En el proceso de digestión anaerobia se generaban 83.590 Nm³ de biogás al año sin reformar, con un contenido en metano del 64,5 %, este biogás es reformado en la columna de absorción. Además del biogás, el cultivo de microorganismos se introduce en la columna desde la piscina de cultivo por medio de difusores. El digestato generado en la fase anterior, 2.242 ton/año, es introducido como fuente de nutrientes para el cultivo en este escenario. El biogás final obtenido con este proceso cuenta con una pureza en metano de un 79%, siendo el 21% CO₂. Teniendo en cuenta que la densidad del metano es de 0,656 kg/m³ y que la densidad del CO₂ es de 1,842 kg/m³ en condiciones de presión y temperatura normales, el volumen de biogás con una pureza del 79% obtenido tras la purificación del biogás bruto a una temperatura de 35°C y a una presión de 1 atmósfera es de 48.015 Nm³ de biogás/año.

De este proceso, además del biogás purificado se obtiene un volumen de cultivo que debe ser secado, este cultivo presenta una concentración de 2000 g/m³, lo que equivaldría a 25.496 kg/año de biomasa húmeda. Esta biomasa es sometida a un proceso de secado, obteniéndose finalmente 1.020 kg de biomasa seca que será empleada como biofertilizante.

- **Infraestructura.**

La aplicación de este método requiere un sistema de infraestructuras complejas que se componen por: un tanque de almacenamiento, una columna de absorción, 10 piscinas de cultivo cubiertas, difusores y válvulas.

○ **Tanque de almacenamiento.**

El biogás de entrada, obtenido en el proceso anterior es introducido en un tanque de almacenamiento según se genera. El tanque de almacenamiento del biogás tiene una forma esférica y es de acero inoxidable con una capacidad, estimada de acuerdo al estudio propuesto por (Lajo, 2015), de 19 m³, se estima que tiene una vida media de 50 años. El tanque recibe un flujo de 9,5 Nm³/h de biogás y tiene una superficie de 42 m², se compone principalmente por acero, utilizándose 50 kg de acero/m² (Lajo, 2015), por lo que se requieren 2.100 kg de acero.

Tabla 4. Infraestructura del tanque de almacenamiento.

Tanque de almacenamiento	Valor
Volumen del tanque	19m ³
Superficie del tanque	42 m ²
Materiales:	
Acero	2.100 Kg
Vida media	50 años

○ **Columna de absorción.**

Del tanque de almacenamiento, el biogás pasa a la columna de absorción para ser depurado. Las columnas de absorción tienen una superficie de 0,646 m² y están compuestas por PVC, se estima que se utilizan 15 kg/m² de este material (Lajo, 2015) por lo que se requieren 9,7 kg de PVC. Las columnas tienen una vida media de 25 años. La columna de absorción cuenta con 4 difusores que se deben cambiar cada 3 meses, por lo que su vida media es de ¼ año. Cada difusor está compuesto por 1 kg de acero.

Tabla 5. Infraestructura de la columna de absorción.

Columna de absorción	Valor
Superficie de la columna	0,64 m ²
Materiales: PVC	9,7 kg
Vida media	25 años
4 Difusores	
Materiales: Acero	1X4 kg
Vida media	¼ año

○ **Piscinas de cultivo.**

Los microorganismos eliminadores de gases de la mezcla son cultivados en 10 piscinas con una capacidad, cada una, de 135 m³ con dimensiones de 7 metros de ancho x 42 metros de largo x 0,75 metros de profundidad que se componen principalmente de polietileno y PVC. El área de cada piscina es de 117 m², teniendo en cuenta un espesor de polietileno de 5 mm (Luiña, 2012) se usarán 5kg/m², lo que supone un total de 589 kg de polietileno por cada piscina. En cuanto al PVC, se estima que el contenido en PVC es de 15 kg/m² (Luiña, 2012), por lo que se requieren 1.768 kg de PVC para la construcción de cada piscina. La vida media de las piscinas es de 20 años.

Las piscinas están cubiertas, para mantener el calor, por una estructura constituida por polietileno de alta densidad y acero cromado, se estima que se requieren 1,14 kg de PE/m² y 1,29 kg de acero/m² (Luiña, 2012), por lo que se emplean 133 kg de polietileno y 150,9 kg de acero para la cubierta de cada piscina. Las cubiertas tienen una vida media de 5 años debido al deterioro que ocasiona la incidencia del sol sobre la capa de plástico. La piscina se encuentra en constante agitación usando paletas que mantienen la circulación interna del sistema a una velocidad de aproximadamente 20 cm/s las cuales se estima que tienen una vida media de cinco años. Las piscinas cuentan con válvulas compuestas por 4,7 kg de acero.

Tabla 6. Infraestructura para el cultivo de microorganismos.

Piscinas de cultivo (1 piscina)	Valor
Superficie	117m ²
Materiales: Polietileno PVC	589 kg 1.768 kg
Vida media	20 años
Cubierta (1 piscina)	
Superficie cubierta	117 m ²
Materiales cubierta: Polietileno de alta densidad Acero cromado	133 kg 150,9 kg

Vida media	5 años
Paletas	
Materiales:	
Acero	20 kg
Vida media	5 años

○ **Decantador de filtro coalescente.**

El proceso de cosechado se lleva a cabo en un decantador realizado en poliéster reforzado con fibra de vidrio de 5,8 m de alto y 2,65 m de diámetro que se modela como 14.300 kg de dicho material (Luiña, 2015).

○ **"Refractance window drying"-**

El proceso de secado se lleva a cabo por medio de una cinta transportadora que se asemeja a las cintas transportadoras de plástico de Ecoinvent, por lo que se toman como referencia en este estudio.

- **Balance energético.**

Dentro de este escenario se tiene en cuenta que, el proceso de digestión anaerobia consume al año 11,62 MWh eléctricos, la columna de absorción consume 0,12 MWh eléctricos anuales, y la parte de cosecha y secado representa 4,54 MWh eléctricos anuales. El consumo de calor es igual al calor producido por la planta por lo que el balance final es cero.

La planta de cogeneración está compuesta por un motor GE Jenbacher J208 GS – C225 que se alimenta del biogás producido en la planta de DA, en total 48.015 Nm³ anuales, a partir de los cuales generan 71 MWh de calor, que a su vez se consumen en la planta, y 93 MWh de electricidad, de los cuales, según este escenario, se invierten en el sistema 16,28 MWh y 76,72 MWh se vierten a la red.

- **Emisiones y residuos.**

En este escenario solo se producen emisiones atmosféricas en la fase cultivo de los microorganismos, pero se trata de oxígeno que no es perjudicial para el medioambiente y no se produce ningún otro gas. No se cuenta con residuos en este escenario.

- **Resumen del inventario del escenario 1.**

Tabla 7. Resumen del inventario del escenario 1.

ENTRADAS	
Materias primas	2.331 ton/año
Tanque de pasteurización	4 unidades
Tanque de DA	4 unidades
Tanque de almacenamiento de digestato	4 unidades

Tanque de almacenamiento de biogás	1 unidad
Columna de absorción	1 unidad
Difusores	4 unidades
Piscinas de cultivo	10 unidades
Cubierta piscinas	10 unidades
Paleta	1 unidad
Filtro coalescente	1 unidad
Refractance Window Drying	1 unidad
Electricidad	16,28 MWh
Calor	71 MWh
SALIDAS	
Energía eléctrica a la red	76,72 MWh
Fertilizante	1.020 kg/año

6.1.2.2 Escenario 2. Reformado del biogás mediante la tecnología PSA y elaboración de un fertilizante con base de digestato.

El proceso de reformado mediante la tecnología PSA está registrado en Ecoinvent por lo que se toma directamente como datos de inventario los registrados en esta base de datos. En este escenario se tiene en cuenta un volumen de entrada de biogás bruto igual al producido en la fase de digestión anaerobia, 83.590 Nm³/año. Como se deben introducir en el sistema 1,54 Nm³ de biogás bruto para conseguir 1 Nm³ de biogás reformado (Ecoinvent), se puede estimar que se obtienen por este método 54.279 Nm³ de biogás refinado al año que serán utilizados por la planta y enviados a la red eléctrica igual que en el escenario antes descrito.

- Balance energético.

El biogás es introducido en la columna con un flujo de 9,54 Nm³/h y se generan 6,14 Nm³/h de biogás reformado y un residuo gaseoso de 3,40 Nm³/h. Se estima, según Ecoinvent, que se invierten 0,33 kWh/Nm³ biogás reformado, por lo que el consumo energético de este proceso es de 17,75 MWh/año. Además del consumo del reformado del biogás, se debe añadir el consumo del proceso previo de DA, que es de 11,62 MWh/año.

En este escenario se tiene en cuenta un motor GE Jenbacher J208 GS – C225, como en los demás escenarios, que se alimenta del biogás reformado producido en la planta de DA que se corresponde con un volumen de 54.279 Nm³ anuales a partir de los cuales genera 71 MWh de calor, que a su vez se consumen en la planta, y 105 MWh de electricidad, de los cuales, según este escenario, se invierten en el sistema 29,37 MWh y 75,63 MWh se vierten a la red.

- Emisiones y residuos.

El residuo gaseoso generado en este proceso se compone principalmente de CO₂ (90,65%) y contiene pequeñas cantidades de CH₄ (6%) y de H₂S (0,000446%), también contiene N₂/O₂ (3,35%). Estos gases residuales producen unas emisiones atmosféricas, se tiene en cuenta un volumen de residuos gaseosos de 0,55 Nm³ por cada Nm³ de biogás reformado y las cantidades vertidas por cada gas a la atmósfera teniendo en cuenta la cantidad de biogás reformado se engloban en la tabla 9:

Tabla 8. Emisiones del residuo gaseoso a la atmósfera.

Residuo gaseoso	Cantidad/Nm ³ biogás producido	Cantidad total
Emisiones de CO₂	0,866 kg CO ₂ /Nm ³ producto	47.005 kg CO ₂
Emisiones de CH₄	0,0223 kg CH ₄ /Nm ³ producto	1.210 kg CH ₄
Emisiones de H₂S	0,00000349 kg H ₂ S/Nm ³ producto	0,18 kg H ₂ S

Como residuos de este proceso podría considerarse el digestato, en este escenario se plantea un aprovechamiento del mismo mediante el compostaje y su aplicación al campo como abono.

- **Gestión del digestato.**

El digestato en este escenario es secado con el método propuesto para el secado de la biomasa algal, planteado en el escenario 1 y posteriormente procesado mediante compostaje. La proporción solido/liquido del digestato es de 0,057, con un volumen de compost generado en la DA de 2.242,46 toneladas se obtienen 129,5 toneladas de compost de digestato al año. El material digerido se composte en pilas que se alojan en dos naves de dimensiones 30 x 30 m ocupando una superficie industrial de 1.800 m². Además, requiere de una pala de 74,5 kW de potencia con un cazo de 1 m³ con una dedicación parcial de 4 horas diarias. Esta maquinaria se modela a partir de un flujo similar de la base de datos Ecoinvent particularizándola al uso dado. Al no disponer de emisiones reales del proceso particular del sistema, se han tomado las emisiones de un proceso equivalente en condiciones similares de la base de datos Ecoinvent. Se tiene en cuenta que las emisiones de este proceso quedan parcialmente mitigadas gracias a la incorporación de una malla geotextil.

Tabla 9. Emisiones a la atmósfera del proceso de compostaje.

Emisiones a la atmósfera	Valor
CH₄	378,5 kg
NO_x	16,92 kg
NH₄	36,53 kg
CO	314,95 kg
N₂O	10,49 kg
HS	10,75 kg
CO₂	314,95 kg

- **Resumen del inventario del escenario 2.**

Tabla 10. Resumen del inventario del escenario 2.

ENTRADAS	
Materias primas	2.331 ton/año
Tanque de pasteurización	4 unidades
Tanque de DA	4 unidades
Tanque de almacenamiento de digestato	4 unidades
Tanque de almacenamiento de biogás	1 unidad
Columna PSA	1 unidad
Refractance Window Drying	1 unidad
Electricidad	29,37 MWh
Calor	71 MWh
SALIDAS	
Energía eléctrica	76,63 MWh
Fertilizante	129,5 tn/año
EMISIONES A LA ATMÓSFERA	
CH ₄	378,5 kg
NO _x	16,92 kg
NH ₄	36,53 kg
CO	314,95 kg
N ₂ O	10,49 kg
HS	10,75 kg
CO ₂	314,95 kg

6.1.2.3 Escenario 3. Reformado del biogás mediante el método criogénico y elaboración de un fertilizante a base de digestato.

En este escenario, igual que en los demás, se tiene en cuenta un volumen de entrada de biogás generado en la DA de 83.590 Nm³ de biogás al año. Se estima que se requiere 1,73 Nm³ de biogás bruto para obtener 1 Nm³ de biogás reformado, por lo que se obtienen al final 48,318Nm³ de biogás reformado utilizando el método de reformado criogénico. Como en los escenarios anteriores se considera el inventario del proceso de digestión anaerobia dentro de este escenario y como en el caso del escenario 2 se considera el mismo proceso de gestión del digestato.

- **Infraestructura.**

Se considera que esta instalación tiene una vida media de 15 años y las principales entradas de la misma en cuanto a infraestructura se recogen en la tabla 11.

Tabla 11. Inventario de la infraestructura necesaria para el método criogénico.

Infraestructura método criogénico	Valor
Acero de baja aleación	21.232 kg

Acero cromado 18/8	12.454 kg
Material de soldadura, libre de Cd	2.474 kg
Productos químicos inorgánicos	2.875 kg
Lana de roca	413 kg

- **Balance energético.**

En este escenario se consumen 3,47Kwh/Nm³ de biogás en el proceso de depurado del biogás, lo que equivale a un consumo eléctrico de 290 MWh/año. Además del consumo del reformado del biogás, se debe añadir el consumo del proceso previo de DA, que es de 11,62 MWh/año.

En este escenario se tiene en cuenta un motor GE Jenbacher J208 GS – C225, como en los demás escenarios, que se alimenta del biogás reformado producido en la planta de DA que se corresponde, en este escenario, con un volumen de 48.317 Nm³ anuales a partir de los cuales genera 71 MWh de calor, que a su vez se consumen en la planta, y 93,46 MWh de electricidad. Este escenario requiere el aporte de 301 MWh/año de electricidad, por lo tanto se deberán tomar de la red 207 MWh/año.

- **Emisiones y residuos.**

Con esta tecnología no se producen residuos ya que el CO₂ generado en el proceso puede ser separado de los demás gases, embotellado y enviado a la industria alimentaria para su reutilización, en este caso se contempla en este escenario el envío del CO₂ a la industria El Gaitero, en Villaviciosa, a una distancia de 65 km lo que se expresa en unidades tkm.

El digestato sería el otro residuo generado en el sistema que es procesado como en el escenario anterior, las emisiones de gases a la atmósfera y el resto del inventario de ese proceso es exactamente igual al utilizado en este escenario.

- **Resumen del inventario del escenario 3.**

Tabla 12. Resumen del inventario del escenario 3.

ENTRADAS	
Materias primas	2.331 ton/año
Tanque de pasteurización	4 unidades
Tanque de DA	4 unidades
Tanque de almacenamiento de digestato	4 unidades
Tanque de almacenamiento de biogás	1 unidad
Estructura criogénica	1 unidad
Refractance Window Drying	1 unidad
Electricidad	207 MWh
Calor	71 MWh
SALIDAS	

CO₂ embotellado	1.932 Nm ³ /año
Fertilizante	129,5 tn/año
EMISIONES A LA ATMÓSFERA	
CH₄	378,5 kg
NO_x	16,92 kg
NH₄	36,53 kg
CO	314,95 kg
N₂O	10,49 kg
HS	10,75 kg
CO₂	314,95 kg

6.2 Análisis e interpretación del impacto del ciclo de vida.

A continuación se presenta el AICV de los distintos escenarios según la unidad funcional “tonelada de fertilizante producida”. Según se definió en las bases del estudio, se utilizará el método de evaluación de impacto Recipe por ser la versión más actualizada del Ecoindicador 99, uno de los más extendidos a nivel mundial. Además se utiliza el método CExD, que permite contabilizar la demanda energética del sistema, el método “Ecological scarcity” con el que se puede evaluar el peso de las emisiones contaminantes y uso de recursos y el de Berger et al, 2014 para contabilizar la huella hídrica.

6.2.1 Análisis global del impacto de los tres escenarios propuestos.

En este apartado se pretende comparar de forma general el balance global de los tres escenarios propuestos en este estudio atendiendo a diferentes categorías de impacto ambiental que resultan relevantes en este tipo de procesos, quedando excluidas del análisis las categorías con una baja relevancia. Cada escenario ha sido descrito a lo largo de todo el texto, especialmente en el capítulo anterior, y se compara en este punto el impacto generado por cada uno de ellos. Se incluye por tanto en este análisis la producción del biogás, que es igual en todos los escenarios, el reformado del biogás siguiendo cada una de las metodologías descritas y la elaboración del fertilizante, ya sea a base de la biomasa algal o a base del digestato, catalogado todo ello dentro de los escenarios 1, 2 y 3 y referido todo a la unidad funcional descrita previamente como “tonelada de fertilizante”.

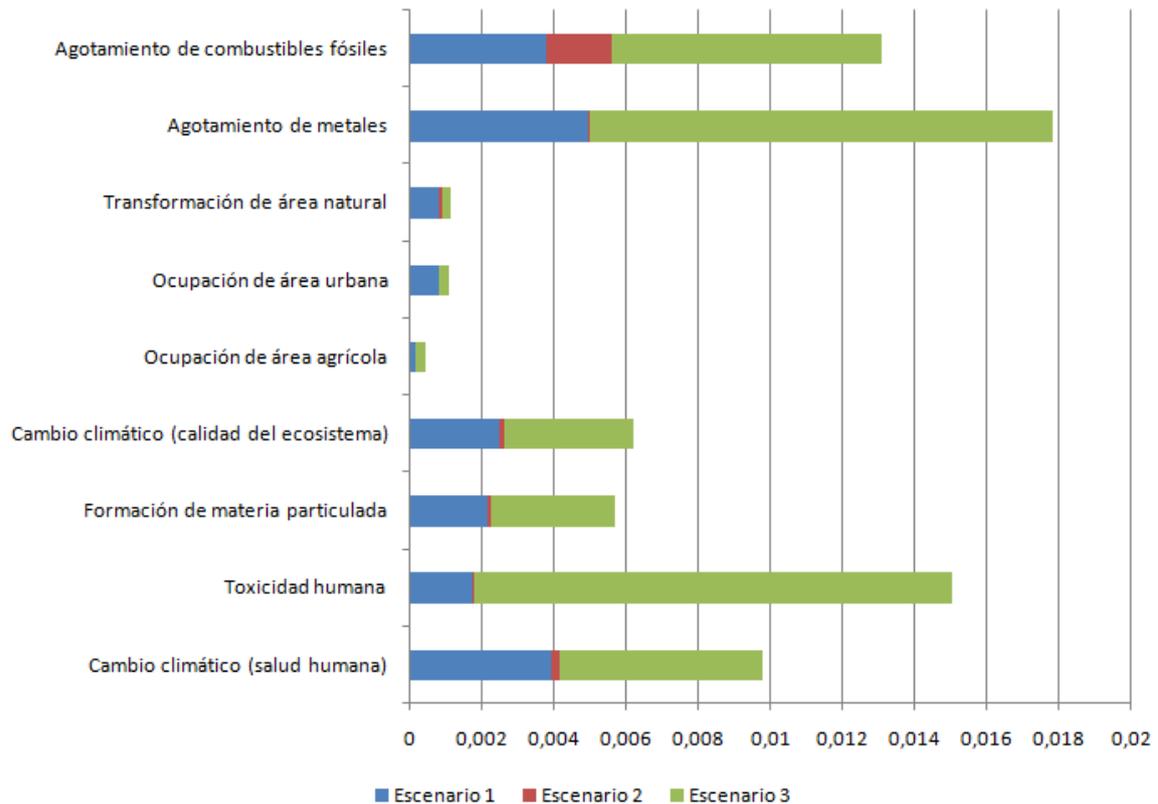


Gráfico 1. Comparación de los tres escenarios planteados en el estudio.

Como se puede ver en el gráfico 1, el escenario 3, que se corresponde con el de reformado del biogás mediante el método criogénico y la gestión del digestato mediante compostaje, es el que más impacto genera en todas las categorías estudiadas. Siendo especialmente relevante su impacto en algunas categorías como la de agotamiento de metales, agotamiento de recursos fósiles, toxicidad humana y cambio climático, especialmente el relacionado con la salud humana. En primer lugar, un mayor impacto en la categoría de agotamiento de metales puede deberse a las instalaciones necesarias para llevar a cabo el reformado por este método, ya que debido a las presiones y temperaturas extremas que se deben alcanzar es necesario contar con instalaciones muy robustas que conllevan la utilización de grandes cantidades de material metálico para su construcción, compuestas mayoritariamente por acero. En cuanto al agotamiento de recursos fósiles, se ve una influencia común en esta categoría de todos los escenarios que se puede relacionar con el transporte de la materia orgánica hasta la planta, ya que como se explicaba en el capítulo anterior, se realiza en camiones y tractores que, en algunos casos, deben recorrer largas distancias. Se observa, sin embargo, que esta categoría de impacto se ve acrecentada en el caso de los escenarios 2 y 3, a diferencia del escenario 1, esto es debido a que otra parte importante del impacto observada en estos dos escenarios y en esta categoría podría estar relacionada con la gestión del digestato, en ambos escenarios se gestiona este residuo mediante compostaje, y en este proceso se utilizan tractores para su volteo y aireación, que demandan una cantidad considerable de recursos fósiles. Aún así, en el escenario 3 se observa un cómputo final mayor en esta categoría que no

podría ser explicada sólo por estos dos factores, el transporte de las materias primas hasta la planta y el volteo del material a compostar, esto podría estar relacionado con una demanda elevada de energía eléctrica de la red.

Por otro lado, se observa también en el gráfico 1 que la categoría de cambio climático, tanto con afectación a la salud humana como a la calidad de los ecosistemas presenta valores considerablemente altos, sobre todo en el escenario 3, lo que está íntimamente relacionado con el agotamiento de recursos fósiles. En cuanto a los impactos similares en todos los escenarios y de baja relevancia dentro del sistema se encuentra el área de ocupación, tanto agrícola como urbana y la transformación del terreno.

- **Análisis de la relevancia de la infraestructura y el balance energético en el impacto del ciclo de vida del escenario 3.**

En vista de los resultados obtenidos en el análisis general de los tres escenarios planteados y tras comprobar que el escenario 3 es el que más impactos presenta dentro de los tres escenarios propuestos se procede en este análisis a evaluar las etapas propias del escenario con un mayor impacto ambiental.

Ya que se pretende discernir qué puntos ocasionan un mayor impacto dentro del escenario 3 sólo serán evaluadas en este punto las partes no comunes al resto de escenarios. Debido a esto, no se tiene en cuenta la fase de producción del biogás, puesto que es igual en todos los escenarios y tampoco se tiene en cuenta en este análisis el proceso de compostaje del digestato ya que coincide con el propuesto para el escenario 2 y no permite explicar las diferencias encontradas. Por tanto, en este análisis se agrupan las etapas del reformado del biogás mediante el método criogénico, ya que es el único proceso diferente a los demás escenarios, en dos categorías, infraestructura y balance energético del proceso.

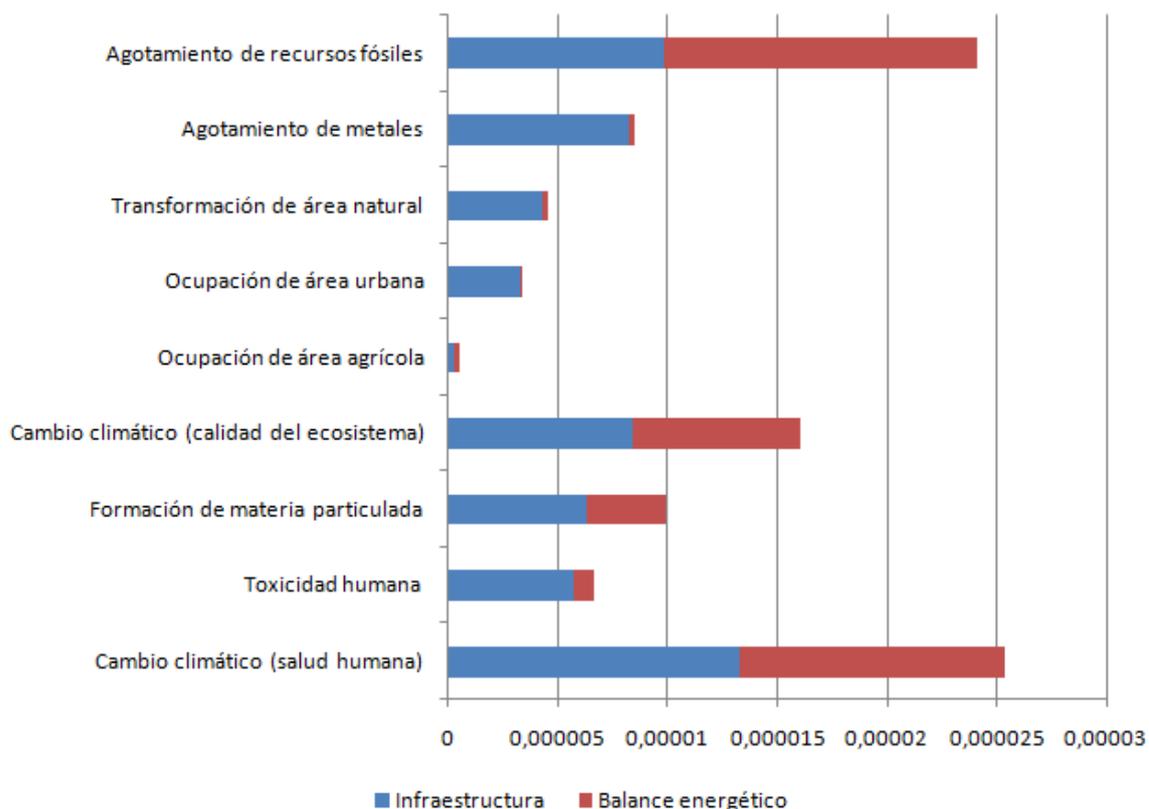


Gráfico 2. Principales categorías de impacto del escenario 3.

Atendiendo prácticamente a todas las categorías de impacto, el factor que más afecta a la viabilidad del método de reformado se ve claramente que es el balance energético, como se planteaba en el análisis global de los 3 escenarios. Esto es debido a la fuerte demanda de energía que se requiere en este método para conseguir variar la presión y la temperatura de los gases. El valor que se muestra en la categoría de agotamiento de recursos fósiles es atribuible en gran medida a la demanda energética externa al sistema y es la categoría que más afectada se ve seguida de la de cambio climático que como se comentaba antes está fuertemente relacionada con la anterior.

- **Análisis de la relevancia del balance energético en el impacto del ciclo de vida del escenario 3.**

Siguiendo con la explicación que se daba en los apartados anteriores, atendiendo esta vez exclusivamente al impacto del balance energético, ya que se ve que es el que más influye en la viabilidad del escenario, se realiza un análisis comparativo con los otros escenarios.

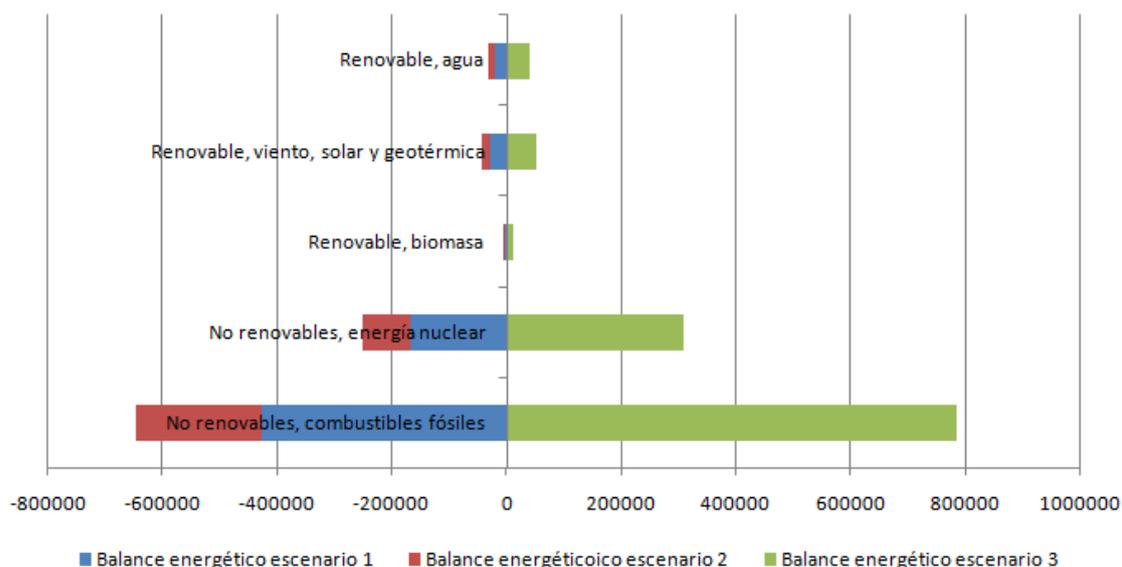


Gráfico 3. Balance energético de los tres escenarios propuestos.

De los tres escenarios, se ve claramente que el escenario 3 tiene una fuerte demanda de energía lo que hace, junto con lo expuesto hasta ahora, que quede excluido como potencial candidato sostenible para el reformado del biogás. Se puede ver, sin embargo, en este gráfico que los escenarios 1 y 2 son los más favorables energéticamente para llevar a cabo este proceso. Como se observa en la gráfica, no solo no tienen un impacto perjudicial en cuanto a demanda energética, si no que con ellos se consigue generar energía que es vertida a la red, esta energía es energía renovable que tiene un efecto de sustitución de las energías no renovables.

6.2.2 Análisis comparativo del impacto del ciclo de vida de los escenarios 1 y 2.

Una vez descartado el escenario 3 se procede en este apartado a comparar de forma global los otros dos escenarios, el 1 y el 2. Estos dos escenarios se consideran los más favorables, sin embargo presentan algunas diferencias significativas. Se compara en este análisis todas las etapas de cada escenario, incluyendo así, la producción de biogás, el reformado del biogás y la obtención de fertilizante, utilizando como unidad funcional "tonelada de fertilizante".

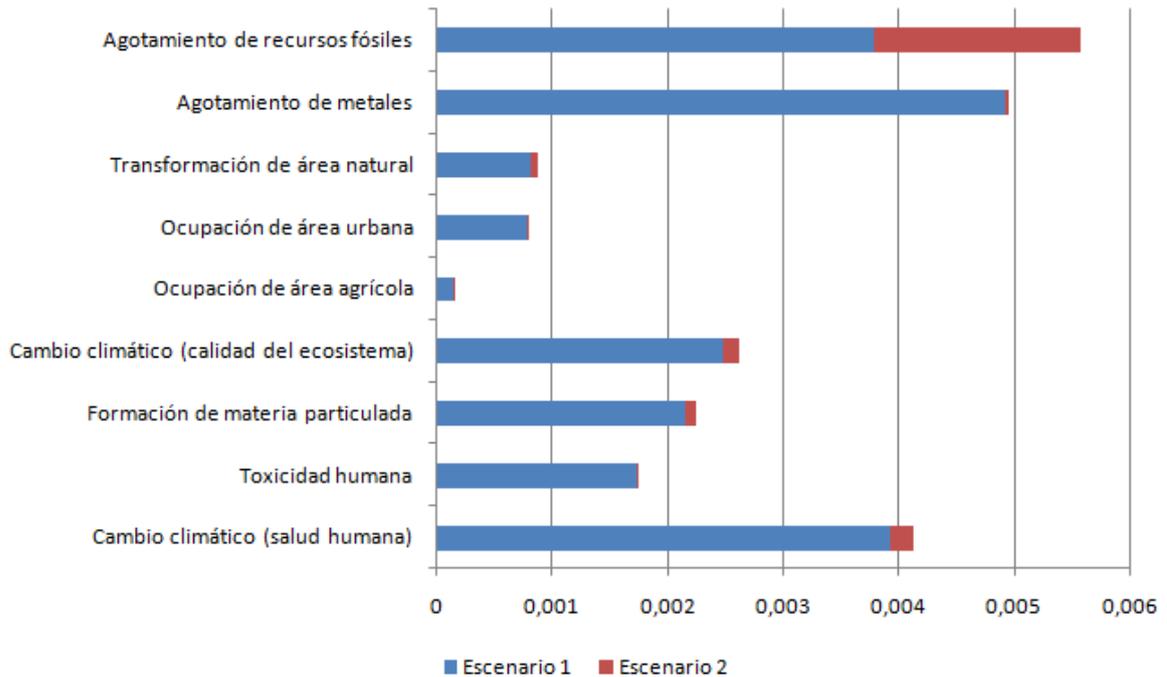


Gráfico 4. Impacto global de los escenarios 1 y 2.

Los valores de impacto ambiental por categorías reflejados en ambos escenarios son similares, sin embargo, se aprecia que el escenario 2 presenta un mayor impacto en la categoría de agotamiento de recursos fósiles lo que es atribuible a la gestión del digestato que se lleva a cabo en este escenario. En el escenario 2, el digestato es secado y posteriormente compostado, el proceso de compostaje del digestato requiere del uso de tractores para favorecer la aireación del material mediante volteo de la mezcla, el uso de este tipo de maquinaria lleva asociado el consumo de una cantidad elevada de combustibles fósiles, lo que afecta de forma directa a esta categoría de impacto.

- **Análisis comparativo de la relevancia de la infraestructura utilizada en los escenarios 1 y 2 en el impacto del ciclo de vida.**

Se procede ahora a compara la infraestructura necesaria para llevar a cabo el reformado del biogás con las tecnologías propuestas en cada escenario, se tiene en cuenta dentro de este análisis la infraestructura necesaria en función de la unidad funcional descrita para el sistema.

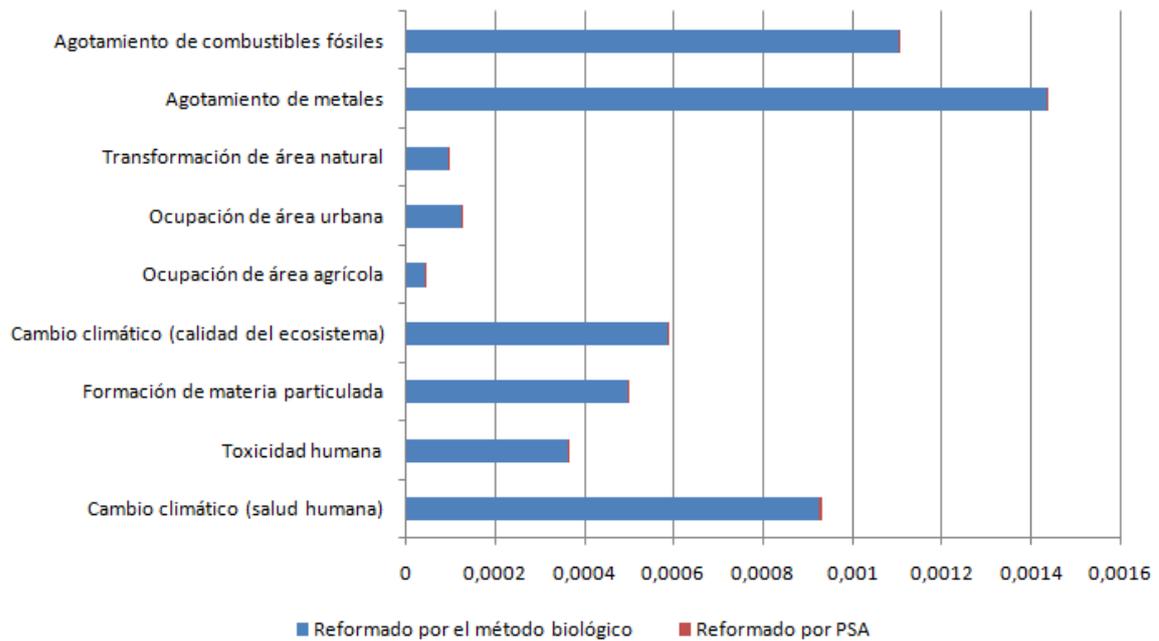


Gráfico 5. Comparación de la tecnología de reformado del biogás.

Como se puede comprobar en el gráfico, ambos tipos de infraestructura son similares, no se aprecian diferencias significativas en la infraestructura que permite llevar a cabo el proceso de reformado del biogás entre los dos escenarios, por lo que este no es el foco de diferencia entre ambas tecnologías. Se podría resaltar que la categoría que más afectada se ve en este análisis es la de agotamiento de metales como era de esperar debido a los materiales que componen la maquinaria y las instalaciones necesarias para llevar a cabo los procesos aquí englobados.

- **Análisis comparativo del balance energético de los escenarios 1 y 2 en el impacto del ciclo de vida.**

En el apartado anterior se concluía que la infraestructura necesaria para llevar a cabo el reformado por cada uno de los métodos no era un punto que marcara la diferencia entre los escenarios por lo que se procede ahora a evaluar el balance energético de ambos escenarios dentro del mix energético de España. Como aclaración, cabe mencionar que la diferente asignación a cada categoría del gráfico está ponderada de acuerdo al porcentaje que ocupa cada grupo en el mix energético total de España.

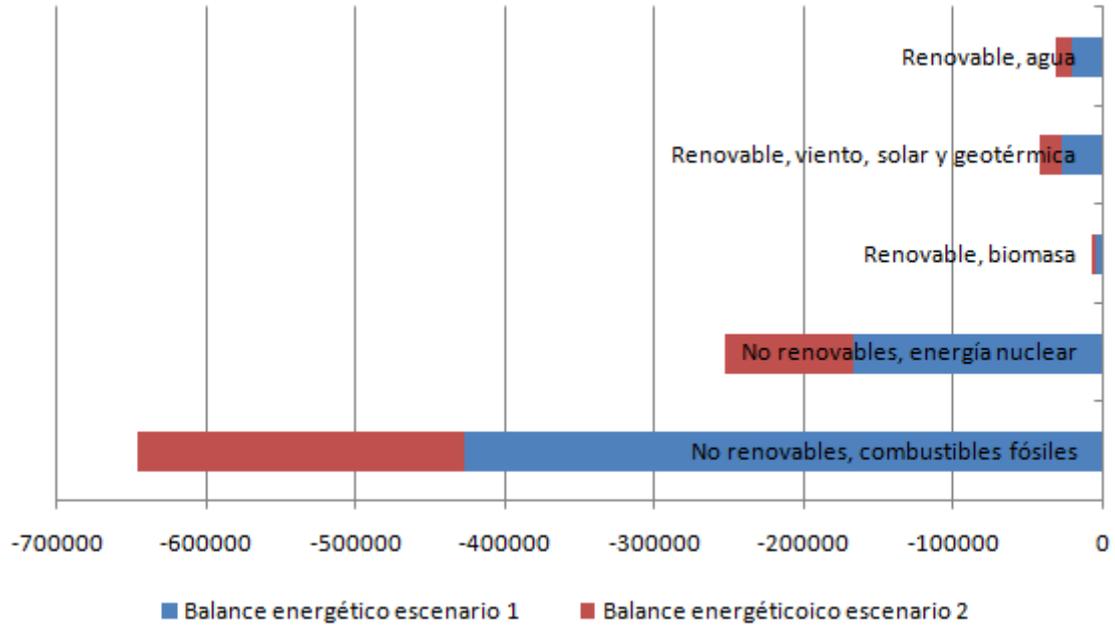


Gráfico 6. Balance energético de los escenarios 1 y 2.

Atendiendo al balance energético de ambos escenarios, se puede considerar al escenario 2 como más favorable, aunque es de destacar que en ambos escenarios se produce un impacto negativo o evitado que se tiene en cuenta dentro del mix energético de España. La mayor contribución del escenario 2 a estas categorías es debida a la eficiencia que presenta este método en la fase de reformado del biogás, ya que utiliza menos energía por cada Nm³ de biogás reformado, lo que hace que se pueda enviar más energía a la red y lo que a su vez contribuye a un aumento en la contribución del impacto evitado por sustitución.

- **Análisis comparativo de los fertilizantes obtenidos en los escenarios 1 y 2 en el impacto del ciclo de vida.**

En este análisis se comparan las emisiones y el agotamiento de recursos que conlleva la producción de fertilizantes en cada escenario. Se tiene en cuenta la producción final del fertilizante tomando como referencia la unidad funcional.

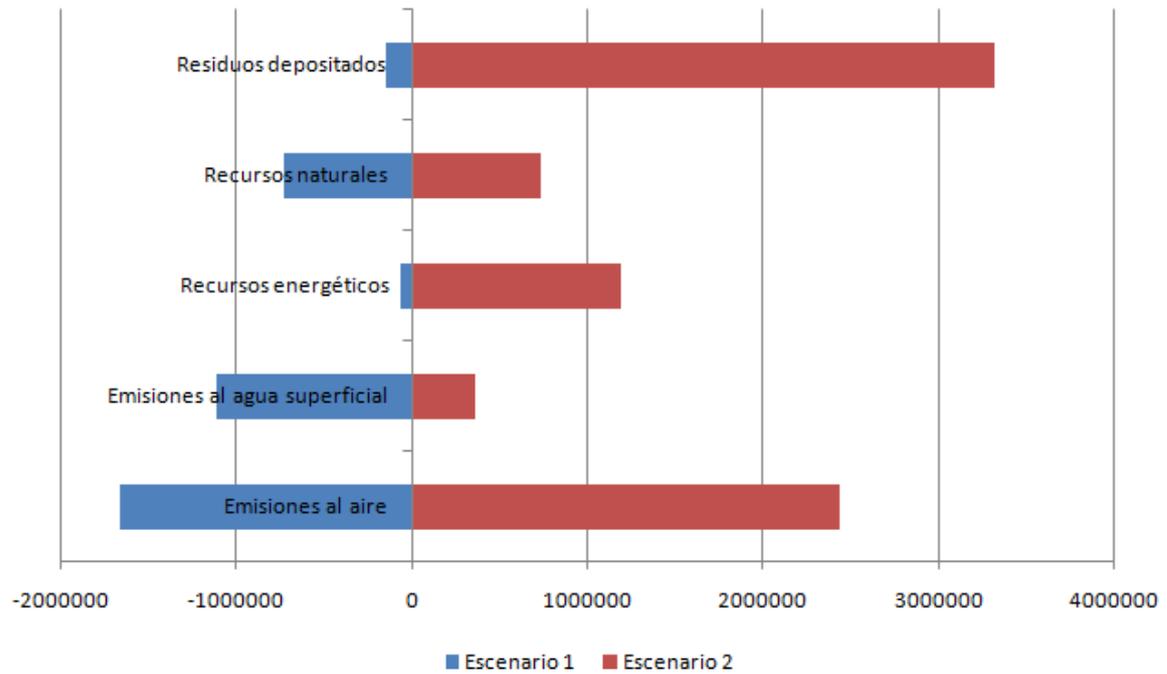


Gráfico 7. Comparación del fertilizante obtenido en el escenario 1 con el obtenido en el escenario 2.

A la vista de los datos reflejados en el gráfico se puede concluir en este punto que el fertilizante a base de biomasa algal generado en el escenario 1 resulta muy ventajoso comparándolo con el generado en el escenario 2. La generación de fertilizantes a base de digestato genera mayor impacto en cuanto a las emisiones al aire ya que en el proceso de compostaje se liberan una gran cantidad de gases a la atmósfera y aunque se han tomado medidas para prevenir este efecto con la colocación de una malla geotextil sobre el compostado las emisiones de gases siguen siendo elevadas.

7 Conclusiones

La reducción de la emisión de los gases de efecto invernadero ocupa el primer puesto en los objetivos de las políticas medioambientales europeas. Siendo dos de los principales focos de emisión de este tipo de contaminantes la generación de energía y las actividades agrícolas y ganaderas. Es por eso que, los esfuerzos en el campo de las energías renovables son cada vez mayores hoy en día.

El biogás se genera a partir de residuos procedentes de la agricultura, la ganadería, la industria alimentaria y del tratamiento de aguas, y es una de las grandes apuestas en materia de energía debido a su enorme potencial, además es una energía renovable que representa una solución medioambiental y de tratamiento de residuos que de otra forma contribuirían al cómputo total de GEI.

Aunque el proceso de generación de biogás es considerado medioambientalmente favorable, existen algunas limitaciones en el proceso de reformado del mismo y en la gestión de los residuos generados en el proceso. Teniendo en cuenta las tecnologías disponibles y la alternativa planteada en este estudio como solución al problema es necesario realizar un análisis que permita seleccionar la solución más óptima y decidir si el proceso planteado es conveniente desde el punto de vista de la sostenibilidad ambiental.

Se propone el Análisis de Ciclo de Vida como la herramienta adecuada para valorar los impactos ambientales. El ACV refleja los impactos de todas las etapas del ciclo de vida, lo que es decisivo para poder comparar distintas soluciones. La primera razón de su adopción es lo completo que resulta al considerar todas las etapas y al reflejar una amplia variedad de impactos en el medio ambiente. La segunda es la existencia de metodologías para su realización bien establecidas que incluyen reglas de ponderación y que facilitan la comparación de alternativas similares.

De la aplicación del ACV a los distintos escenarios propuestos se observa que, el rendimiento de este tipo de procesos es un factor que puede determinar la viabilidad del proceso. Así se ha visto que los escenarios que demandan una fuerte cantidad de energía, como el método de reformado criogénico, son rápidamente descartados.

Entre las tecnologías que podrían ser consideradas más favorables, debido a su menor impacto ambiental, después de ser sometidas a un análisis pormenorizado de los principales focos de impacto se puede ver en un primer momento que la infraestructura no tiene un peso relevante para la determinación del método más adecuado.

Sin embargo, es la gestión de los residuos generados la que juega un papel fundamental. Utilizando sistemas tradicionales, como la tecnología PSA o el método criogénico, donde la única forma viable de gestión de los residuos generados en el proceso de obtención del

biogás es mediante el compostaje, obteniéndose un fertilizante a base de digestato, se observa una elevada emisión de gases a la atmósfera. Aunque se plantea en este estudio la adopción de barreras para mitigar este efecto las elevadas emisiones que conlleva este procedimiento limitan la viabilidad del mismo.

En contra, en el sistema propuesto, donde el digestato es introducido como una parte fundamental del sistema, sirviendo como nutriente para el cultivo microalga-bacteria y generándose posteriormente un fertilizante a base de biomasa algal, se observa que se generan unos impactos evitados de liberación de gases de efecto invernadero.

Se podría concluir mediante este estudio que es medioambientalmente factible realizar la depuración del biogás mediante un proceso de ciclo cerrado, minimizando las salidas y englobando el proceso en el concepto de ecología industrial. Además, se puede obtener como co-producto un biofertilizante a base de biomasa algal de excelentes calidades, similar al N-P-K 15-15-15 que presenta unos impactos en el ciclo de vida menores que las alternativas. A pesar de esto, es necesario un mayor esfuerzo en aras de optimizar el proceso de generación de energía para alcanzar un valor más elevado de eficiencia, esto podría conseguirse sustituyendo el cultivo de microorganismos en piscinas abiertas por un cultivo en fotobiorreactores que es mucho más eficiente ya que se puede conseguir una densidad de microorganismos 10 veces superior a la propuesta en este estudio y por lo tanto depurar más m³ de biogás por minuto. Aunque son más eficientes, estos sistemas demandan una gran cantidad de energía, por lo que sería necesario realizar un análisis de impacto del ciclo de vida de este nuevo planteamiento.

8 Bibliografía

- Abatzoglou, N. y S. Boivin (2009): "Review of biogas purification processes", *Biofuels bioproduction biorefinering*, pp.42-71.
- Abdeshahian, P.; J. Shiun; W. Shin; H. Hashim; C. Tin (2016): "Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 714-723.
- Afazeli, H. ; A. Jafari; S. Rafiee y M. Nosrati (2014): "An investigation of biogas production potential from livestock and slaughterhouse wastes", *Renewable and Sustainable energy*, pp. 380-386.
- Bacenetti, J.; M. Negri; M. Fiala y S. González-García (2013): "Anaerobic digestion of different feedstocks: impact on energetic and environmental balances of biogas process", *Science of the Total Environment*, pp. 541-551.
- Bauer, F.; T. Persson; C. Hulteberg y D. Tamm (2013): "Biogas upgrading-technology overview, comparison and perspectives for the future", *Biofuels bioproduction biorefinering* , pp. 499-511.
- Baumann, H. y A.M. Tillman (2004): "The hitch hikers's guide to LCA. An orientation in life cycle assesment methodology and application", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, pp. 142-146.
- Brentner, L.; M. Eckelman y J. Zimmerman (2011): "Combinatorial life cycle assessment to inform process design of industrial production of algal biodiesel", *Environment Science Technology*, pp. 7060-7067.
- Budzianowski, W. M. (2016): "A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment", *Renewable and sustainable energy reviews*, pp. 1148-1171.
- Cámbara, J. (2012). Análisis de la confiabilidad de las metodologías EICV. Universidad de Oviedo.
- Chiew Y. L.; J. Spangberg; A. Baky; H. Jonsson (2015): "Environmental impact of recycling digested food waste as a fertilizer in agriculture - a case study" *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 1-14.
- Clarens, A.; E. Resurreccion; M. White y L. Colosi (2010): "Environmental life cycle comparison of algae to other bioenergy feedstocks", *Environmental science and technology*, pp. 1813-1819.

Dressler D. y A. Loewen (2012): "Life cycle assessment of the supply and use of bioenergy: impact of regional factors on biogas production", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, pp. 1104-1115.

Han, W.; W. Clarke y S. Pratt (2014): "Composting of waste algae: a review", *Waste management*, pp. 1148-1155.

Handler R.; C. Canter; T. Kalnes; S. Lupton; O. Kholiqov; D. Shonnard y P. Blowers (2012): "Evaluation of environmental impacts from microalgae cultivation in open-air raceway ponds: analysis of the prior literature and investigation of wide variance in predicted impacts", *Algal research*, pp. 83-92.

Hasler, K.; S. Broering; S. W. F. Omta y H. W. Olf (2015): "Life cycle assessment (LCA) of different fertilizer products types" *European Journal of Agronomy*, pp. 41-51.

Insam, H.; M. Gómez-Brandón y J. Ascher (2015): "Manure-based biogas fermentation residues - friend or foe of soil fertility?", *Soil biology and biochemistry*, pp. 1-14.

Lajo, J. P. (2015), "Evaluación ambiental mediante el análisis del ciclo de vida de un sistema de depuración de biogás por microoxigenación y enriquecimiento en metano y su comparativa con un sistema de biogás convencional. *Universidad de Valladolid*.

Lardon, L.; A. Hélias; B. Sialve; J.P. Steyer y O. Bernard (2009): "Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae", *Environment, science and technology*, pp. 6475-6481.

Larkum, A. W.; I.L. Ross; O. Kruse; B. Hankamer (2012): "Selection, breeding and engineering of microalgae for bioenergy and biofuel production", *Trends in biotechnology*, pp. 198-205.

Luiña, R. (2012): "Aplicación de ACV al Estudio Ambiental del Aprovechamiento Energético de Residuos para su utilización en el Sector del Transporte. *Universidad de Oviedo*.

Luiña, R. (2012): "Estudio del impacto ambiental comparativo de la producción conjunta de biogás y biodiesel a partir de residuos ganaderos utilizando la metodología del análisis de ciclo de vida", *Universidad de Oviedo*.

Luiña, R. (2015): "Análisis de Ciclo de Vida comparativo de biofertilizante, obtenido a partir del procesamiento de residuos cárnicos, obtención de biomasa algal y biogás, y fertilizante mineral", *Universidad de Oviedo*.

Makádi, M.; A. Tomócsik y V. Orosz (2012), "Digestate: A new nutrient source-review" *Biogas* (http://www.intechopen.com/download/pdf/pdfs_id/31331).

Merlin, C.; L.R. Gopinath y D. Divya (2014): "A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 167-173.

Milan K. y E. Lorencowicz (2015): "Agricultural use of biogas digestate as a replacement fertilizers", *Agriculture science procedia*, pp. 119-124.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2010): El sector del biogás agroindustrial en España.

Myhre, G. y D. Shindell (2013): "Anthropogenic and Natural Radiative Forcing", *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, (https://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf)

Nasir, I.; T. Mohz y R. Omar (2012): "Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production: a review", *Engineering in Life Sciences*, pp. 258-269.

Nindo, C.I. y J. Tang (2007): "Refractance window dehydration technology: a novel contact drying method", *Dying technology*, pp. 37-48.

Odlare, M.; M. Pell y K. Svensson (2008): "Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues", *Waste management*, pp. 1246-1253.

Patterson, T.; S. Esteves; R. Dinsdale y A. Guwy (2011): "An evaluation of the policy and techno-economic factors affecting the potential for biogas upgrading for transport fuel use in the UK", *Energy policy*, pp. 1806-1816.

Perilhon, C.; D. Alkadee; G. Descombes y S. Lacour (2012): "Life cycle assessment to electricity generation from renewable biomass", *Energy procedia*, pp. 165-176.

Qiao, W.; Y. Xiuyi; Y. Junhui; Y. Sun; W. Wang y Z. Zhang (2011): "Evaluation of biogas production from different biomass wastes with/without hydrothermal pretreatment", *Renewable energy*, pp. 3313-3318.

Salim, S.; R. Bosma; M. Vermue y R. Wijffels (2011): "Harvesting of microalgae by bio-flocculation", *Journal of Applied Phycology*, pp. 849-855.

Starr, K.; X. Gabarrell; G. Villalba; L. Talens y L. Lombardi (2012): "Life cycle assessment of biogas upgrading technologies", *Waste management*, pp. 991-999.

Sun, Q.; H. Li; J. Yan; L. Liu; Z. Yu; X. Yu (2015): "Selection of a appropriate biogas upgrading technology- a review of biogas cleaning, upgrading and utilization", *Renewable and sustainable energy reviews*, pp. 521-532.

Svensson, M. y D. Baxter (2016): "IEA Bioenergy task 37: Country reports summary 2015, *IEA* (www.iea-biogas.net).

Tambone, F.; B. Scaglia; G. D'Imporzano; A. Schievano; V. Orzi; S. Salati y F. Adani (2010): "Assessing amendment and fertilizing properties of digestates from anaerobic digestion through a comparative study with digested sludge and compost", *Chemosphere*, pp. 577-583.

Trivedi, J.; A. Mounika y K. Savita (2015): "Algae based biorefinery-How to make sense?", *Renewable and sustainable energy reviews*, pp. 295-307.

Turconi, R.; A. Boldrin y T. Astrup (2013): "Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: overview, comparability and limitations", *Renewable and sustainable energy reviews*, pp. 555-565.

Udom, I.; B. Zaribaf; T. Halfhide; B. Gillie; O. Dalrymple; Q. Zhang y S. Ergas (2013): "Harvesting microalgae grown on wastewater", *Bioresource technology*, pp. 101-106.

Uusitalo, V.; J. Havukainen; K. Manninen; J. Hohn; E. Lehtonen; S. Rasi, R. Soukk y M. Horttanainen (2014): "Carbon footprint of selected biomass to biogas production chains and GHG reduction potential in transportation use", *Renewable Energy*, pp. 90-98.

Vandamme, D.; I. Foubert y K. Muylaert (2013): "Flocculation as a low-cost method for harvesting microalgae for bulk biomass production", *Trends in Biotechnology*, pp. 233-239.

Vázquez-Rowe, Ian; K. Golkowska; V. Lebuf; E. Micels, E. Meers; E. Benetto y D. Koster (2015): "Environmental assessment of digestate treatment technologies using LCA methodology", *Waste management*, pp. 442-459.

Whiting, A. y A. Azapagic (2014): "Life cycle environmental impacts of generating electricity and heat from biogas produced by anaerobic digestion", *Energy*, pp. 181-193.

Wuang, S.; M. Khin; P. Chua y Y. Luo (2016): "Use of *spirulina* biomass produced from treatment of aquaculture wastewater as agricultural fertilizers", *Algal research*, pp. 59-64.

Xia, A. y J.D. Murphy (2016): "Microalgal cultivation in treating liquid digestate from biogas systems", *Trends in biotechnology*, pp. 264-275.

Zhao Q.; E. Leonhardt, C. MacConnell, C. Frear and S. Chen (2010): "Purification technologies for biogas generated by anaerobic digestion", *Climate Friendly Farming*, pp. 1-24.