

Estudio preliminar del ciclo de vida de una instalación de purificación de biogás basada en adsorción. Análisis de posibles escenarios

Alejandra Vega*, María Victoria Gil, Covadonga Pevida

Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (INCAR), CSIC. Francisco Pintado Fe, 26, 33011, Oviedo.

* Corresponding author: alejandra.vega@incar.csic.es

Resumen

Actualmente nos enfrentamos a un nuevo escenario energético, en el que se hace necesario implementar nuevas tecnologías de emisiones negativas que permitan eliminar el CO₂ de la atmósfera. Entre ellas se encuentran los procesos BECCUS (acrónimo del inglés, *bioenergy with carbon capture, utilization, and storage*). Por su relevancia en el contexto de la bioenergía, tanto el biogás como el biometano se postulan como fuentes importantes de energía renovable. El aprovechamiento del biometano contenido en el biogás, como sustituto del metano de origen fósil (gas natural), requiere necesariamente un proceso de purificación o *upgrading* que separe el CO₂. Para poder evaluar el beneficio ambiental de esta tecnología se plantea un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del proceso de purificación de biogás. Este proceso integra una unidad de PSA (adsorción por cambio de presión), que es una parte fundamental en el proceso de separación CO₂/CH₄. Tanto considerando el CO₂ recuperado como un residuo o como un producto, los resultados obtenidos mostraron que, independientemente de la fuente de energía que se utilice (renovable o fósil), la purificación de biogás con captura de CO₂ resulta en un valor negativo del impacto ambiental, ya que, en primer lugar, se reducen las emisiones de dióxido de carbono (que no se emite a la atmósfera), y además el CO₂ capturado podría tener una segunda vida útil. Se trata, por lo tanto, de un ejemplo claro de economía circular.

Abstract

We are currently facing a new energy scenario, in which it is necessary to implement new negative emission technologies to eliminate CO₂ from the atmosphere. These technologies include the BECCUS processes (bioenergy with carbon capture, utilization, and storage). Due to their relevance in the context of bioenergy, both biogas and biomethane are postulated as important renewable energy sources. The use of biomethane contained in biogas, as a substitute for methane of fossil origin (natural gas), necessarily requires a purification, or upgrading, which is a process that separates the CO₂. In order to evaluate the environmental benefit of this technology, a Life Cycle Assessment (LCA) of the biogas purification process is proposed. This process integrates a PSA (pressure swing adsorption) unit, which is a fundamental part of the CO₂/CH₄ separation process. Whether considering

the recovered CO₂ as a waste or as a product, the results obtained showed that, regardless of the energy source used (renewable or fossil), biogas purification with CO₂ capture results in a negative environmental impact value, since, firstly, carbon dioxide emissions are reduced (which is not emitted into the atmosphere), and also the captured CO₂ could have a second useful life. It is, therefore, a clear example of a circular economy.

1. Introducción

Las consecuencias del cambio climático son ya perceptibles a pesar de que en los últimos años, gracias a la implementación de medidas correctoras y a los acuerdos ambientales para alcanzar la neutralidad de emisiones en carbono entre 2050-2100, las emisiones de gases de efecto invernadero se han reducido. A pesar de ello, el ritmo de mitigación sigue siendo insuficiente y cada vez resulta más inalcanzable el objetivo de limitar el calentamiento global por debajo de 2 °C [1]. Las emisiones de CO₂, como el principal gas de efecto invernadero, se han incrementado a un ritmo anual de 1,9% en los últimos 30 años, siendo ésta una de las mayores preocupaciones hoy en día desde un punto de vista ambiental [2]. Por lo tanto, no será suficiente con reducir las emisiones a la atmósfera, sino que es necesario implementar tecnologías de emisiones negativas que permitan la eliminación neta de CO₂. Entre estas tecnologías se encuentran los procesos BECCUS (acrónimo del inglés, *bioenergy with carbon capture, utilization, and storage*).

La bioenergía combinada con la captura, uso y/o almacenamiento de carbono (BECCUS) es una tecnología de mitigación que puede resultar en una reducción neta de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, lo que se conoce como "emisiones negativas". El concepto BECCUS incluye una gran variedad de tecnologías energéticas e industriales con diferentes grados de emisiones de CO₂. El CO₂ liberado durante la transformación de la biomasa es igual al utilizado durante su crecimiento, dando lugar a emisiones neutras en el proceso global. Sin embargo, la captura y almacenamiento del CO₂ producido durante su aprovechamiento conduce a emisiones negativas. También es posible el uso de este CO₂ capturado obtenido a partir de biomasa, dando lugar en ese caso a emisiones neutras de CO₂. La tecnología BECCUS presenta grandes posibilidades de desarrollo ya que puede aplicarse a gran variedad de procesos de conversión de

diferentes biocombustibles, como el biogás, bio-líquidos, o biomasa sólida. A día de hoy, la experiencia acumulada en tecnologías BECCUS a la escala necesaria para la lucha contra el cambio climático es limitada. Solamente se capturan en torno a 2 Mt de CO₂ biogénico al año (de los cuales solamente 1 Mt son almacenadas), principalmente en instalaciones de producción de bioetanol [3]. Desde enero de 2022 se han anunciado planes para poner en marcha unas 20 instalaciones que capturarán en conjunto alrededor de 15 Mt de CO₂/año de emisiones biogénicas [3]. Teniendo en cuenta los proyectos que se encuentran actualmente en fase de desarrollo inicial y avanzado, la eliminación de carbono mediante BECCUS podría alcanzar alrededor de 50 Mt de CO₂/año en 2030, cifra muy inferior a las aproximadamente 190 Mt de CO₂/año previstas en 2030 en el Escenario de Emisiones Netas Cero para 2050 (NZE) [3]. Será necesario un apoyo específico dirigido a tecnologías de eliminación de dióxido de carbono (CDR, acrónimo del inglés *carbon dioxide removal*), y en particular de BECCUS, para traducir el reciente impulso en capacidad operativa real [3].

Algunas rutas BECCUS son comerciales, pero las más críticas están aún en fase de demostración o piloto. La captura de CO₂ a partir de la producción de bioetanol de primera generación es la ruta BECCUS más madura, con operaciones que se remontan a finales de la década de 2000. La captura de CO₂ en plantas de combustión de biomasa se encuentra en fase de demostración comercial desde octubre de 2020 con la puesta en marcha de una unidad de captura en la central eléctrica de Mikawa (Japón). Sin embargo, la gasificación a gran escala de biomasa para aplicaciones del gas de síntesis aún se encuentra en la fase de prototipo a gran escala [3].

En la industria, la co-combustión de biomasa es comercial en fábricas de pasta y papel, cementeras y altos hornos siderúrgicos. Sin embargo, la captura de CO₂ de los hornos y de los gases de escape de los altos hornos está aún en fase de prototipo o demostración, aunque se está construyendo la primera unidad comercial de captura de CO₂ del mundo en un horno de cemento, en la fábrica de Holcim en Carboneras (Almería), que entrará en servicio en 2024 [4].

El mayor proyecto BECCUS en funcionamiento hasta la fecha es el *Illinois Industrial CCS Project*, que captura CO₂ procedente de la fermentación de maíz a etanol, para su almacenamiento permanente en una formación geológica profunda desde 2018 [5]. El proyecto de captura en la producción de bioetanol de *Red Trail Energy*, el segundo en Estados Unidos destinado al almacenamiento, entró en funcionamiento en 2022. Otras instalaciones de producción de bioetanol a pequeña escala capturan CO₂ en Europa y Estados Unidos, pero venden el CO₂ a invernaderos para aumentar su rendimiento o lo utilizan para recuperación mejorada de petróleo.

Uno de los ejemplos más relevantes de BECCUS en Europa es la central térmica de Drax, un ambicioso proyecto de reconversión de una central térmica de

carbón a 100% biomasa que integra dos plantas piloto de captura de CO₂. La primera instalación piloto de captura de CO₂ comenzó a funcionar en 2019, utilizando la tecnología de *C-Capture*, y tiene capacidad para capturar hasta una tonelada de CO₂ al día [6]. El segundo piloto se puso en marcha en 2020 con tecnología de *Mitsubishi Heavy Industries*, capturando alrededor de 300 kg de CO₂ al día [6]. El proyecto está venteando las pequeñas cantidades de CO₂ capturadas, pero planea su uso por parte de varias empresas asociadas. El plan a largo plazo es una planta a escala comercial con almacenamiento geológico permanente (prevista para 2027) [7].

Por su relevancia en el contexto de la bioenergía, tanto el biogás como el biometano están llamados a ocupar un papel destacado dentro del mercado de las energías renovables. Como referencia, cabe mencionar lo indicado por Harmen Dekker, CEO de la *European Biogas Association*, durante las primeras jornadas del “*Task force 1 – National biomethane targets, strategies and policies*” del *Biomethane Industrial Partnership* (BIP), celebradas en Madrid en abril de 2023 y de las que ha sido anfitrión el Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico de España: “El biometano es actualmente el más escalable y económico de los gases renovables. Es muy gratificante poder trabajar conjuntamente con otras partes interesadas con el objetivo europeo de disponer de una energía local, segura, y alineada con la economía circular”.

El gas renovable contribuye a cumplir varios objetivos: reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuye a la economía circular y aporta energía de fuentes renovables para diversos usos. Su generación se puede gestionar para utilizarse de manera continua, pues no depende de las condiciones de viento o insolación como otras energías renovables. Cuando se inyecta a la red de distribución o transporte de gas natural, el biometano puede consumirse en cualquier otro punto de la red, sin importar la distancia.

Europa produce hoy 18,4 bcm (del inglés *billion cubic metres*) de biogás y biometano combinados. Los cálculos muestran que para 2030 la producción puede duplicarse hasta alcanzar los 35-45 bcm. Para 2050, la producción puede quintuplicarse como mínimo con respecto a los niveles actuales, llegando a 167 bcm [8]. De este modo, su potencial para 2050 representa hasta el 40% del consumo de gas de la UE en 2021. Suponiendo una reducción de la demanda de gas, el biometano podría cubrir hasta el 61% de la demanda de gas en 2050. Este crecimiento representaría 460.000 puestos de trabajo en 2030 y más de un millón en 2050 [8]. El potencial del biogás en España se estima en unos 26,4 TWh y las oportunidades para explotarlo son muy grandes pues apenas se ha iniciado el camino.

En la actualidad, el precio del biometano puede ser un 30% inferior al del gas natural. El biometano puede producirse a partir de 55 €/MWh, mientras que el gas natural cuesta unos 80 €/MWh, sin tener en cuenta los precios del CO₂ [8]. Es probable que este

gas renovable siga siendo más barato que el gas natural a corto y también a largo plazo. Mientras que otros gases renovables, como el hidrógeno verde, necesitan tiempo para escalarse y siguen siendo entre 2 y 4 veces más caros, el biometano ya está disponible y podrá escalarse durante los próximos años.

Para poder inyectar el biogás en la red de gas natural o utilizarlo como combustible para vehículos, hay que purificarlo o “mejorarlo” (proceso denominado *upgrading* en inglés), lo que significa eliminar el dióxido de carbono y aumentar la proporción de metano hasta valores normalmente superiores al 96% para que cumpla las normas de calidad del gas natural. Durante el desarrollo inicial del proceso de mejora del biogás, las tecnologías dominantes eran el lavado con agua (WS, acrónimo del inglés *water scrubbing*) y la adsorción por cambio de presión (PSA, acrónimo del inglés *pressure swing adsorption*). A pesar de ser la tecnología más utilizada, fiable y establecida comercialmente en múltiples escalas, la tecnología PSA sigue presentando algunos inconvenientes, ya que, por ejemplo, necesita un proceso de dos etapas para eliminar el CO₂ y el H₂S, puede llevar asociadas emisiones de metano bastante elevadas y requiere alta presión, por lo que, en consecuencia, tiene un elevado potencial de calentamiento global (PCG) de 83,6-85,3 kg CO₂ eq/100 Nm³ biometano. Por otro lado, la tecnología PSA es competitiva en precio

(0,064-0,13 €/Nm³ de biogás) y nivel de purificación, y puede eliminar tanto el oxígeno como el amonio junto con el CO₂. Así pues, la tecnología PSA es adecuada como base de comparación con nuevas tecnologías de *upgrading* del biogás [9].

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una valiosa herramienta que se utiliza para analizar las tecnologías en desarrollo y sus cuellos de botella, creando vías más sostenibles. Estudia los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto o de una actividad. El ciclo de vida de un producto considera toda su “historia”, desde su origen (*cradle*) como materia prima hasta su final como residuo (*gate*). A partir de la década de 1980, el ACV se ha utilizado ampliamente en la industria para tratar de reducir la carga medioambiental derivada de la producción, uso y eliminación de muchos productos. En la última década, el ACV se ha aplicado cada vez más a la gestión de residuos, proporcionando información sobre el aspecto medioambiental de su gestión. La complejidad del ciclo de vida requiere un protocolo al que deberá ajustarse todo estudio de ACV, el cual se ha establecido en la normativa elaborada por la “*International Standards Organisation*” ISO. Las categorías generales de impactos medioambientales que precisan consideración incluyen: el uso de recursos, la salud humana y las consecuencias ecológicas [10].

Tabla 1. Características del biogás de partida.

Table 1. Input biogas properties.

Origen	Flujo biogás (m ³ /día)	Composición					
		CH ₄ %	CO ₂ %	O ₂ %	H ₂ O %	H ₂ ppm	H ₂ S ppm
Planta de procesos de degradación anaerobia de residuos orgánicos (Brandis, Saxony, Alemania)	32.000	51,4	47	0,05	1	72	55

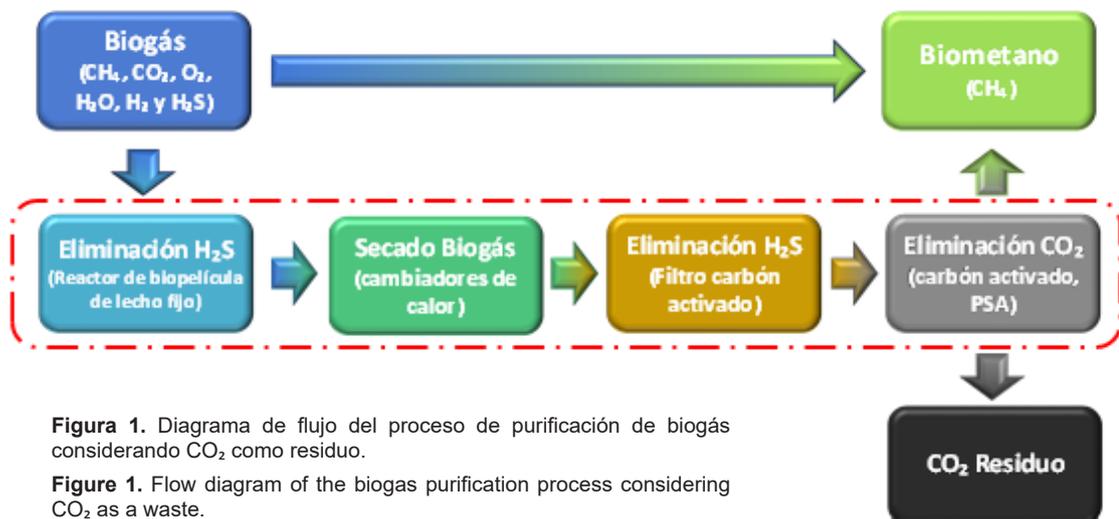


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de purificación de biogás considerando CO₂ como residuo.

Figure 1. Flow diagram of the biogas purification process considering CO₂ as a waste.

Los estudios previos que evalúan la sostenibilidad de las tecnologías de mejora del biogás no sólo son limitados en número, sino que también difieren en cuanto a la tecnología evaluada, el alcance, la base de datos aplicada, la unidad funcional (UF) y el modelo de caracterización, lo que dificulta su comparación y el análisis posterior. El análisis de ciclo de vida aplicado a un proceso de mejora de biogás puede ser, por tanto, sumamente complejo. Partiendo del trabajo desarrollado por Kohlheb et al. [9], se ha planteado un ACV simplificado de una planta de mejora de biogás, considerando dos escenarios: (i) uno en el que el producto final es únicamente biometano; y (ii) otro en el que se producen tanto biometano como CO₂ para su posterior utilización. Las características del biogás de partida se muestran en la Tabla 1. La planta estudiada integra las siguientes unidades (ver diagrama de la Figura 1): eliminación de H₂S, deshumidificación y PSA para la separación de CO₂.

2. Materiales y métodos

El impacto ambiental del proceso de purificación de biogás en el contexto de procesos BECCUS se ha evaluado mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) utilizando el software libre OpenLCA, siguiendo la norma ISO14040 [11]. De acuerdo a esta norma, el ACV requiere tres etapas: (1) determinar el objetivo y alcance del estudio; (2) realizar un inventario cuantificando las entradas y salidas del sistema a la naturaleza y a la tecnosfera (conjunto de medios artificiales, como sustancias, materiales, productos y servicios, creados por la humanidad, que soportan su desarrollo y evolucionan hacia una analogía de la biosfera con la que interactúan); y (3) representar y analizar los datos en las categorías de impacto seleccionadas.

El ACV modela el ciclo de vida como un sistema de producto, fraccionándolo en diferentes procesos unitarios vinculados entre sí por medio de flujos intermedios, a su vez vinculados con otros sistemas de producto a través de flujos de producto y vinculados con el medio ambiente mediante flujos elementales. Estos flujos elementales comprenden los recursos, las emisiones al aire, y los vertidos al suelo y al agua asociados al sistema. De esta forma, es necesario recopilar los flujos de entrada (*inputs* en inglés, como materias primas, energía y productos intermedios), y también los flujos de salida (*outputs* en inglés, como emisiones atmosféricas, vertidos al agua, vertidos al suelo y productos) desde y hacia la naturaleza, para obtener unos resultados que representen los impactos ambientales potenciales asociados a dichos flujos. El análisis se fundamenta en un enfoque relativo organizado en torno a una unidad funcional, que define aquello que se está estudiando, de manera que los análisis posteriores son relativos a dicha unidad funcional, fijando una referencia para relacionar las entradas y las salidas del sistema considerado. La unidad funcional seleccionada para este caso de estudio se indica en la Figura 1 con línea discontinua roja.

Para obtener el inventario de entradas y salidas se ha recurrido a datos de producción de biogás disponibles de una planta de referencia (Tabla 1) y a las bases de datos Ecolnvent y ELCD (*European reference Life Cycle Database*) accesibles a través del software OpenLCA versión 1.10. Existen tres etapas principales: los productos donde se almacena el sistema completo, la etapa de procesos donde están los elementos que componen el sistema que se quiere analizar y, finalmente, los flujos donde se almacenan las relaciones internas que tiene el sistema.

El método de análisis utilizado es *CML Baseline 2000, World 2000*, que analiza las siguientes categorías de impacto: Calentamiento global, Degradación de la capa de ozono, Toxicidad humana, Ecotoxicidad acuática en agua dulce, Ecotoxicidad acuática marina, Ecotoxicidad terrestre, Acidificación, y Eutrofización.

Como se mencionó anteriormente, las características de los flujos de entrada al sistema están en su mayoría disponibles en la propia base de datos del programa. Sin embargo, las bases de datos que dispone el programa no incluyen biogás, por lo que para poder introducirlo en el sistema de análisis se utilizaron las composiciones de la corriente de biogás a la entrada. Estas composiciones se asumen iguales para los dos casos de estudio analizados, es decir considerando el CO₂ como producto o como emisión (residual). Se ha tomado como unidad temporal un periodo de 20 años ya que se tienen datos tanto de consumo de energía de la planta y de necesidades auxiliares, como son agua, aceite lubricante o carbón activado, tal y como se indica en el estudio de referencia [12].

Se cuantificó el potencial de calentamiento global (PCG) por medio de la metodología de impacto IPCC2007, y la demanda de energía no renovable por medio del método de demanda acumulada de energía (DAE). Una vez realizado el sistema completo, se ejecutó la simulación bajo la metodología ReCiPe 2016 Mindpoint (H) y se obtuvieron los resultados para una alimentación a la planta de mejora de biogás de 32.000 Nm³ biogás/ día.

3. Resultados

Se ha analizado el impacto del proceso de purificación de biogás, es decir, de la captura de CO₂, empleando como materia prima biogás procedente de la degradación anaerobia de residuos orgánicos y una unidad PSA como sistema de separación de CO₂. Se ha tomado como referencia el estudio de Kohlheb et al. [9] pero en este estudio se ha dado una doble consideración al CO₂ recuperado: residuo y producto.

Por lo tanto, el estudio se ha centrado en comparar los impactos ambientales que genera el proceso de purificación de biogás bajo dos supuestos: (i) considerando como único producto el biometano, tal y como se muestra en el esquema de la Figura 1, and (ii) considerando además el CO₂ recuperado como un producto con posteriores aplicaciones (por

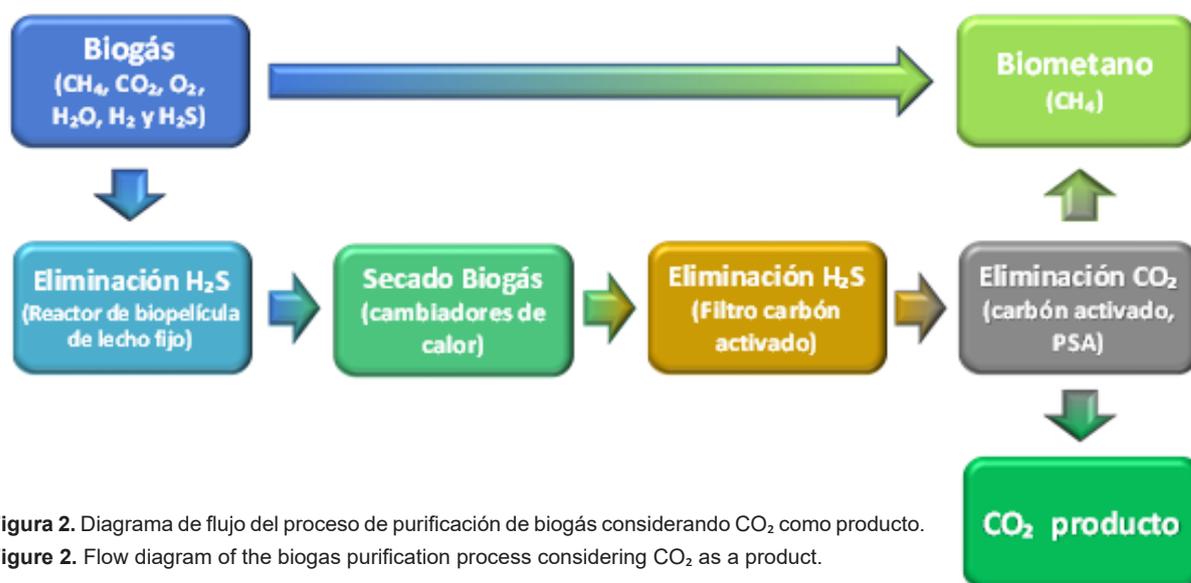


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de purificación de biogás considerando CO₂ como producto.
Figure 2. Flow diagram of the biogas purification process considering CO₂ as a product.

lo tanto, no se considera como emisión), tal y como se muestra en el esquema de la Figura 2 [13]. Desde un punto de vista técnico la obtención de dióxido de carbono como producto precisaría una mayor complejidad técnica en cuanto al diseño del proceso PSA para conseguir separar CO₂ y CH₄ y recuperar ambos productos en condiciones de pureza lo suficientemente elevada para su posterior aplicación. Por otro lado, el estudio ha considerado tanto fuentes de energía renovable como fósil para cubrir la demanda energética del proceso de purificación de biogás con el objetivo de comparar la influencia que tiene el origen de la energía en las emisiones del proceso.

De todas las categorías de impacto ambiental estudiadas, a priori, ambos casos diferirán únicamente en las emisiones de dióxido de carbono, aparte de las posibles fugas de metano que se pudieran producir. Por tanto, se ha centrado el análisis en la categoría de calentamiento global que se evalúa en función de los kilogramos de CO₂ que se emiten a la atmósfera. En la Tabla 2 se muestran los resultados del análisis del resto de categorías de impacto ambiental estudiadas. Como puede observarse, los resultados son similares independientemente de la consideración del CO₂ como producto o residuo. Sin embargo, cuando se utilizan combustibles fósiles como fuentes de energía se observa un incremento notable en los valores de todas las categorías.

Tabla 2. Resultados de los impactos ambientales para el caso de purificación de biogás con CO₂ como producto vs. residuo.
Table 2. Environmental impact results for the biogas upgrading case considering CO₂ product vs. waste.

	Combustibles Fósiles		Energía Renovable	
	CO ₂ Residuo	CO ₂ Producto	CO ₂ Residuo	CO ₂ Producto
Acidificación (kg SO ₂)	1,40E+06	1,40E+06	0	0
Eutrofización (kg PO ₄)	1,48E+05	1,48E+05	0	0
Ecotoxicidad acuática en agua dulce (kg 1,4-diclorobenceno)	3,36E+05	3,36E+05	0	0
Toxicidad humana (kg 1,4-diclorobenceno)	4,29E+07	4,29E+07	3,90E+03	3,90E+03
Ecotoxicidad acuática marina (kg 1,4-diclorobenceno)	3,67E+09	3,67E+09	0	0
Degradación de la capa de ozono (kg CFC-11)	14,3	14,3	0	0
Ecotoxicidad terrestre (kg 1,4- diclorobenceno)	6,53E+05	6,53E+05	0	0

A continuación, se analiza la categoría de calentamiento global para los cuatro escenarios objeto de estudio, es decir, utilizando combustibles fósiles o energía renovable como fuentes de energía, por un lado, y considerando que se obtiene como producto únicamente biometano o bien biometano y CO₂ por otro lado.

• *Combustibles fósiles como fuente de energía*

En la Figura 3 se muestran las emisiones de CO₂ en toneladas de CO₂ equivalentes (t CO₂ eq). Como cabría esperar, estas emisiones son inferiores en el caso del proceso de purificación de biogás con captura de CO₂ en el que se realiza un aprovechamiento de este gas como producto. La diferencia de valores es muy significativa, existiendo un orden de magnitud de diferencia en el parámetro de calentamiento global entre ambos casos de aproximadamente 200 kt CO₂ eq. Para la planta de mejora de biogás que se está considerando, esto supondría que en el caso de utilizar el CO₂ se dejarían de emitir 0,11 t CO₂ eq/t CH₄ si se asume que la capacidad de producción de biometano es independiente de la de CO₂ e igual para ambos casos.

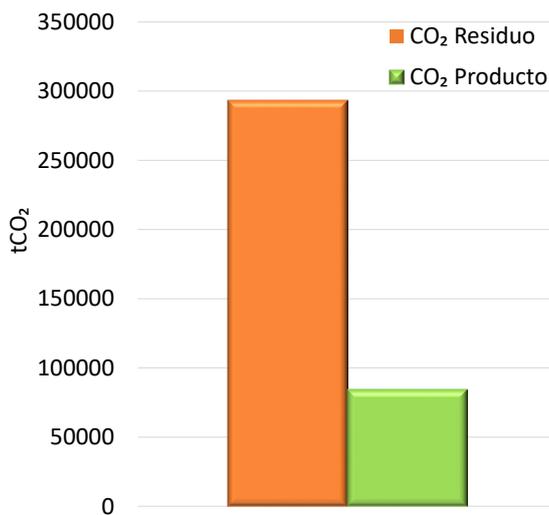


Figura 3. Comparación de las toneladas de CO₂ emitidas a la atmósfera para el caso de utilización de fuentes de energía fósil [13].

Figure 3. Comparison between the CO₂ emitted to atmosphere (in tonnes) for the case of using fossil fuels [13].

Por tanto, desde un punto de vista ambiental resultaría mucho más atractiva la opción de purificación de biogás con recuperación de CO₂ para su posterior aplicación ya que se reduciría significativamente el impacto ambiental asociado a la categoría de calentamiento global.

• *Fuente de energía renovable*

Para el caso del uso de energía renovable se ha considerado la utilización de energía solar. Como se observa en la Figura 4 se obtienen valores negativos en la categoría de calentamiento global para el caso de recuperación de CO₂ como producto. Un factor de impacto ambiental con valor negativo indica que se reduce su efecto, resultando, por tanto, positivo

desde el punto de vista ambiental. En este caso, la diferencia en el valor del parámetro de calentamiento global entre ambas opciones de estudio se sitúa también en torno a 200 kt CO₂ eq. Estos resultados indican que se dejarían de emitir 94,5 t CO₂ eq/t CH₄ para el caso de captura de CO₂ sin uso posterior, mientras que se lograrían reducir de forma neta las emisiones en torno a 25,8 t CO₂ eq/t CH₄ para el caso de captura y uso de CO₂.

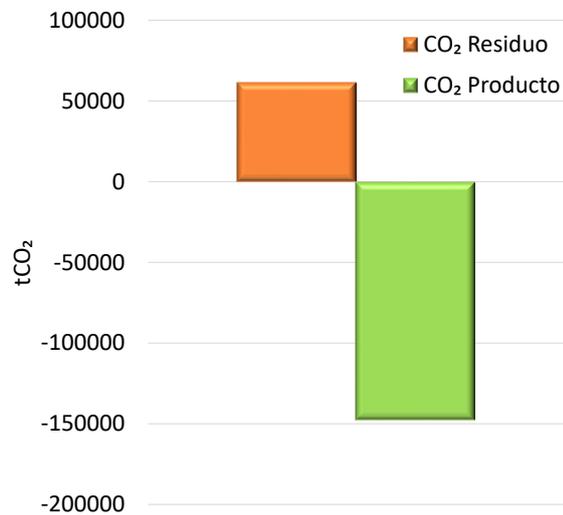


Figura 4. Comparación de las toneladas de CO₂ emitidas a la atmósfera para el caso de utilización de fuentes de energía renovable [13].

Figure 4. Comparison between the CO₂ emitted to atmosphere (in tonnes) for the case of using renewable energy sources[13].

Por lo tanto, el proceso de captura considerando el CO₂ como producto se plantea como una opción interesante ya que, independientemente de la fuente de energía utilizada, dicho proceso consigue disminuir los niveles de emisión asociados al parámetro de calentamiento global, reduciendo así el impacto ambiental. Los resultados muestran que el uso combinado de fuentes de energía renovables, captura de dióxido de carbono y su posterior utilización supone una reducción significativa del impacto ambiental. Se trata, por tanto, de una alternativa prometedora desde el punto de vista de la economía circular y la sostenibilidad.

4. Conclusiones

Los resultados del ACV permiten concluir que, para el caso objeto de este estudio, un proceso de purificación de biogás con captura integrada de CO₂ de una corriente de biogás procedente de digestión anaerobia no supondría un aumento de las emisiones de CO₂ a la atmósfera. La fuente de energía que se utilice para cubrir las necesidades energéticas del proceso, es decir, renovable o no renovable, tiene un efecto relevante en si se reduce significativamente o no la contaminación ambiental. En el caso de utilizar fuentes de energía renovables el impacto ambiental generado es mucho menor en todas las categorías analizadas, concluyendo así que uno de los principales factores que influyen sobre la

contaminación asociada al proceso de purificación de biogás es la fuente de energía que se utilice.

Por otro lado, el proceso de captura considerando el CO₂ recuperado como producto se plantea como una opción interesante ya que, independientemente de la fuente de energía utilizada, dicho proceso consigue disminuir los niveles de emisión asociados al parámetro de calentamiento global, reduciendo así el impacto ambiental. Por ello, se trata de una alternativa interesante tanto desde el punto de vista ambiental, como potencialmente económico, ya que implica la reutilización y aprovechamiento de un subproducto.

5. Referencias bibliográficas

[1] «La Unión Europea en la lucha contra el cambio climático». Acceso: 5 de septiembre de 2023. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/la-union-europea.html>.

[2] J. R. Puthalpet, «Mitigation of Climate Change», en *The Daunting Climate Change*, CRC Press, 2022, pp. 219-276.

[3] «Bioenergy with Carbon Capture and Storage - Energy System - IEA». Acceso: 25 de septiembre de 2023. Disponible en: <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/bioenergy-with-carbon-capture-and-storage>.

[4] «LafargeHolcim y Carbon Clean desarrollarán una planta de captura y uso de carbono a gran escala». Acceso: 25 de septiembre de 2023. Disponible en: <https://www.holcim.es/planta-captura-y-uso-carbono-a-gran-escala-carboneras-net-zero>.

[5] S. McDonald y B. Development Director, «Illinois Industrial Carbon Capture & Storage Project Eliminating CO₂ Emissions from the Production of Bio Fuels-A “Green” Carbon Process», 2017.

[6] «Drax BECCS – CCUS around the world – Analysis - IEA». Acceso: 25 de septiembre de 2023. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/ccus-around-the-world/drax-beccs>.

[7] «CCUS around the world – Analysis - IEA». Acceso: 5 de septiembre de 2023. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/ccus-around-the-world>.

[8] «European Biogas Association». Acceso: 25 de septiembre de 2023. Disponible en: <https://www.europeanbiogas.eu/benefits/#growth-potential>.

[9] N. Kohlheb, M. Wluka, A. Bezama, D. Thrän, A. Aurich, y R. A. Müller, «Environmental-Economic Assessment of the Pressure Swing Adsorption Biogas Upgrading Technology», *Bioenergy Res*, vol. 14, n.º 3, pp. 901-909, sep. 2021, doi: 10.1007/S12155-020-10205-9.

[10] «ISO 14040:1997 - Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework». Acceso: 6 de septiembre de 2023. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/23151.html>.

[11] R. K. Singh, H. R. Murty, S. K. Gupta, y A. K. Dikshit, «An overview of sustainability assessment methodologies», *Ecol Indic*, vol. 9, n.º 2, pp. 189-212, mar. 2009, doi: 10.1016/J.ECOLIND.2008.05.011.

[12] N. Kohlheb, M. Wluka, A. Bezama, D. Thrän, A. Aurich, y R. A. Müller, «Environmental-Economic Assessment

of the Pressure Swing Adsorption Biogas Upgrading Technology», *Bioenergy Res*, vol. 14, n.º 3, pp. 901-909, 2021, doi: 10.1007/s12155-020-10205-9.

[13] A. Vega Rodríguez, Trabajo fin de Máster «Purificación de biogás en el contexto de procesos BECCUS (Bioenergy with CO₂ Capture, Utilization and Storage)», Máster en Ingeniería Química, Universidad de Oviedo, Junio 2022.