



**Análisis del rendimiento de residuos industriales usados para la co-digestión anaerobia y
producción energética en la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de
Straubing en Alemania (SER GmbH)**

Juliana Berrío Uribe

Informe de práctica para optar por el título de Ingeniera Sanitaria

Asesor

Diana Catalina Rodríguez Loaiza, Doctora (PhD) en Ingeniería

Christian Großhauser, SER GmbH

Martin Bergner, SER GmbH

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Sanitaria

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	(Berrío Uribe, 2022)
Referencia	Berrío Uribe, J. (2022). <i>Análisis del rendimiento de residuos industriales usados para la co-digestión anaerobia y producción energética en la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Straubing en Alemania (SER GmbH)</i> . [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi agradecimiento a los todos docentes que, con su experiencia, conocimiento, paciencia y apoyo, motivaron mi crecimiento como profesional en la Universidad de Antioquia. Agradezco a mi asesora de prácticas, la docente Diana Catalina Rodríguez por el respeto a mis sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas. También un agradecimiento especial a la docente y colega Catalina Ossa Carrasquilla por su amabilidad para dedicarme su tiempo, sus ideas, orientación y atención a mis consultas sobre metodología.

Asimismo, por la oportunidad de trabajar en sus instalaciones y por el calor humano brindado, mi agradecimiento a la empresa Straubinger Energie- und Reststoffverwertungs GmbH (SER GmbH) en Alemania, especialmente a Christian Großhauser por diligencia, dedicación y apoyo brindado tanto en lo laboral como personal.

Todo este proceso también es fruto del reconocimiento y del apoyo vital que nos brindan las personas que nos estiman, sin el cual no tendríamos la valentía y energía para seguir escalando en nuestras metas. En ese sentido, gracias a mi familia y a mis amigos por su amor, su apoyo moral, su comprensión y su aliento en todo momento.

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
1 Objetivos	13
1.1 Objetivo general	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
2 Marco teórico	14
3 Metodología	21
3.1 Lugar de estudio	21
3.2 Tipo de la investigación	22
3.3 Fuente de Datos	22
3.4 Métodos de investigación.....	23
3.5 Recopilación y Análisis de Datos.....	23
3.6 Sustratos	24
3.7 Ensayos de fermentación.....	24
4 Resultados	26
4.1 Implicaciones de aceptar cosustratos	26
4.2 Descripción de los sustratos aceptados por SER GmbH para la co-digestión anaerobia 31	
4.2.1 Tipos de co-sustratos.....	31
4.2.2 Balance de cosustratos	33
4.2.3 Rendimiento y calidad del biogás	34
5 Análisis.....	37
6 Conclusiones	42

7 Recomendaciones.....44

Referencias.....45

Lista de tablas

Tabla 1. Características y producción de biogás de distintos sustratos utilizados para la codigestión	16
Tabla 2. Máximo teórico de producción de biogás y su porcentaje de composición.....	17
Tabla 3. Sustratos evaluados en los ensayos de fermentación	25
Tabla 4. Valores teóricos establecidos por la LfL para los diferentes sustratos	35
Tabla 5. Resultados de los ensayos de fermentación para diferentes cosustratos aceptados por SER GmbH.....	35

Lista de figuras

Figura 1 Metodología utilizada para el desarrollo de la tesis.....	21
Figura 2 Mapa de ubicación del lugar de estudio	22
Figura 3 Incremento del lodo para los diferentes años en SER GmbH	27
Figura 4 Histórico de producción de biogás asociado a los sustratos aceptados por SER GmbH y los lodos crudos.....	28
Figura 5 Rendimiento del biogás producido en SER GmbH.....	29
Figura 6 Calidad del biogás producido	30
Figura 7 Contenido de materia orgánica seca (oTS).....	31
Figura 8 Cantidad de sustratos aceptados según su tipo	34
Figura 9 Calidad del biogás analizado en los ensayos de fermentación realizados por laboratorio acreditado	38
Figura 10 Rendimiento del biogás producido en los ensayos de fermentación realizados por laboratorio acreditado.....	39
Figura 11 Producción del biogás de los sustratos analizados en los ensayos de fermentación realizados por laboratorio acreditado	40

Siglas, acrónimos y abreviaturas

PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
SER	Straubinger Entwässerung und Reinigung
pH	Potencial de Hidrógeno
AcoD	Co-Digestión Anaeróbica
kWh	Kilowatt Hora
CH₄	Metano
CO₂	Dióxido de Carbono
PhD	Philosophiae Doctor
mm	Milímetros
Kg	Kilogramo
UdeA	Universidad de Antioquia
oTS	Materia Meca Orgánica
TS	Materia Seca
OS	Materia Fresca
C	Carbono
N	Nitrógeno
FOG	Fats, Oils, and Grease
ton - t	Toneladas
m³	Metros cúbicos
NH₃	Amoniaco
OLR	Organic Loading Rate
VS	Volatile solids
TRH	Tiempo de Retención Hidráulica
DIN	Deutsches Institut für Normung
L - l	Litro
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
LfL	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Resumen

La digestión anaerobia se ha utilizado ampliamente para la valorización de diversos residuos orgánicos con la consiguiente generación de recursos valiosos como el biogás. No obstante, en muchas plantas de tratamiento de agua residual (PTAR), los digestores tienen la capacidad de aceptar mayores cantidades de materia orgánica de la que realmente tratan, lo que representa una oportunidad para digerir más biomasa sin costos adicionales asociados a implementación de nuevas instalaciones. Sin embargo, aceptar sustratos adicionales para la digestión conjunta, supone estudios minuciosos tanto del sustrato como de las implicaciones de su aceptación, ya que esto influirá tanto en la estabilidad del proceso como en la calidad y producción del biogás. De esta manera, el presente trabajo es un análisis teórico-experimental llevado a cabo a partir de procesos analíticos sintéticos y de estudio de caso, buscando analizar los sustratos que participan de la co-digestión anaerobia llevada a cabo en SER GmbH y las implicaciones de su aceptación. De esa manera, se encontró una tendencia creciente en la cantidad de sustratos aceptados y en la producción de biogás. Asimismo, las grasas flotadas (C1) y la leche con inhibidores (C5) fueron los sustratos que presentaron una producción más elevada de biogás por unidad de masa tratada, 90 % más que los residuos de la destilación y 70% más que los lodos crudos.

Palabras clave: co-sustratos, digestión anaerobia, PTAR, rendimiento de biogás.

Abstract

Anaerobic digestion has been widely used for the recovery of various organic waste with the consequent generation of valuable resources such as biogas. However, in many wastewater treatment plants (WWTPs), digesters have the ability to accept larger amounts of organic matter than they actually treat, representing an opportunity to digest more biomass without additional costs associated with implementing new facilities. However, accepting additional substrates for joint digestion involves thorough studies of both the substrate and the implications of its acceptance, as this will influence both the stability of the process and the quality and production of the biogas. In this way, the present work is a theoretical-experimental analysis carried out from synthetic analytical processes and case study, seeking to analyze the substrates that participate in the anaerobic co-digestion carried out at SER GmbH and the implications of its acceptance. In this way, a growing trend was found in the number of substrates accepted and in the production of biogas. Likewise, floated fats (C1) and milk with inhibitors (C5) were the substrates that presented a higher production of biogas per unit of treated mass, 90% more than distillation residues and 70% more than raw sludge.

Keywords: anaerobic digestion, biogas yield, co-substrates, WWTP.

Introducción

Uno de los principales desafíos que enfrentan los países desarrollados y las economías emergentes, se encuentra en la adopción nuevas formas de producción energética debido al agotamiento progresivo de los combustibles fósiles, así como a las preocupaciones relacionadas con el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (Benito et al., 2018). En ese sentido, la digestión anaerobia ha ganado gran aceptación ya que no solo ofrece una ruta atractiva para la utilización de diferentes categorías de biomasa para satisfacer las necesidades energéticas sino que también ayuda en la gestión de residuos y recuperación de nutrientes (Nwokolo et al., 2020).

La digestión anaeróbica es un proceso bioquímico que implica la degradación de materia orgánica a sustancias más simples para producir biogás y digestato a través de la actividad microbiana (Nwokolo et al., 2020). Actualmente, muchas plantas de digestión anaerobia utilizan sistemas de monodigestión (es decir, que utilizan solo una materia prima o sustrato). Sin embargo, autores como Kasinath et al. (2021), plantean la existencia de inconvenientes que afectan directamente el rendimiento del gas, y a pesar de que estos problemas puedan ser resueltos con ajustes en parámetros como el pH y el tiempo de retención y realizando cambios en el montaje inicial, estas modificaciones conllevan complejidad operativa y costos adicionales (Karki et al., 2021).

No obstante, en muchas plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el mundo, los digestores anaerobios tienen la capacidad de aceptar mayores cantidades de materia orgánica de la que realmente tratan, lo que representa una oportunidad para digerir más biomasa sin costos adicionales asociados a la implementación de nuevas unidades. Y es precisamente desde este planteamiento que surge la co-fermentación o co-digestión anaerobia.

La co-fermentación anaeróbica (AcoD) es un tipo de tratamiento que implica la digestión de una mezcla de dos o más sustratos con propiedades complementarias, de manera que, a través de su tratamiento conjunto, haya mayor producción de biogás y, en consecuencia, cuanta más materia orgánica se trata, más biogás se genera en el digestor, más electricidad se produce en kWh y, por tanto, mejores resultados económicos y ambientales relacionados con la operación de la PTAR. De igual manera, brinda la oportunidad de superar los inconvenientes de la monodigestión (Benito et al., 2018), ya que la mezcla de diversos materiales mejora la digestión y la producción

de metano al aumentar la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos y la carga orgánica, a la vez que reduce la toxicidad química inhibidora mediante la dilución de los co-sustratos (Kunatsa & Xia, 2022), lo que facilita la operación de plantas de biogás rentables (Reyes et al., 2015).

Los residuos que se introducen en la co-fermentación como sustrato ajeno a la planta de tratamiento pueden ser líquidos, viscosos y/o sólidos y proceder de diferentes industrias, lo que en gran parte determina la complejidad de su tratamiento.

A pesar de los numerosos beneficios de la co-digestión, esta tecnología requiere una supervisión y un control minuciosos, ya que no hay un único conjunto de parámetros de trabajo habituales que pueda resultar práctico para todos los residuos orgánicos biodegradables. Teniendo en cuenta este escenario, y que la disponibilidad de materias primas es de naturaleza amplia, se debe llevar a cabo una mayor investigación en la co-digestión y la optimización de la generación de biogás a partir de diversos tipos de sustrato (Kunatsa & Xia, 2022). De hecho, la composición del sustrato influye en la actividad de la población microbiana, que a su vez afectará en gran medida a la estabilidad del proceso a largo plazo, a la tasa de degradación de los sólidos y, en consecuencia, al rendimiento de biogás (Reyes et al., 2015).

El presente trabajo que se desarrolla con esta tesis no solo pretende describir, en términos de rendimiento de biogás y tipo de residuo, los diferentes sustratos usados para la co-digestión anaeróbica y producción energética de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Straubing en Alemania (SER GmbH) sino también determinar cuáles han sido las implicaciones a lo largo de los años al aceptar esta biomasa, con el objetivo de establecer una base de identificación y priorización de sustratos, por medio de correlaciones teóricas y reales.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Analizar el rendimiento de residuos industriales usados para la co-digestión anaerobia y producción energética en la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Straubing, Alemania (SER GmbH).

1.2 Objetivos específicos

- Analizar el estado del arte de los sustratos industriales usados para la digestión conjunta de las plantas de tratamiento de agua residual, en términos de aplicabilidad, tipos, características y producción energética.
- Determinar las características de los sustratos industriales aceptados por SER GmbH por medio de datos históricos y experimentales proporcionados por la empresa.
- Establecer las diferencias existentes entre los datos teóricos y experimentales, y sus causas, para seleccionar el sustrato que brinda mayor relación costo-beneficio.

2 Marco teórico

Se consideran como co-sustratos a todos aquellos compuestos que intervienen en la co-digestión (Estévez, 2018), generalmente con alto contenido de materia orgánica y elevado contenido calórico (poder calorífico).

En la codigestión anaeróbica, las propiedades del co-sustrato y su composición son determinantes importantes del proceso y aunque la mayoría de las veces es difícil conocer la composición exacta de estos sustratos puesto que contienen una amplia gama de materias orgánicas simples y complejas, sin duda, dependiendo de su origen pueden predominar compuestos orgánicos específicos (Alves et al., 2009).

En principio, las plantas de co-digestion, sólo deberían aceptar y utilizar sustancias pastosas y líquidas para la co-digestión y que además cumplan con criterios de calidad como alto contenido orgánico, es decir mayor al 50%, buena biodegradabilidad (materia orgánica seca oTS > 50%), rendimiento específico del gas mayor a 250 L CH₄/Kg oTS, bombeabilidad menor al 10 % TS, tamaño de las partículas menor a 6 mm, estar libre de impurezas (fibras formadoras de mechones, piedras, arena, plásticos, etc.), homogeneidad permanente, bajo contenido de nitrógeno y fosfato y bajo contenido de contaminantes (incluyendo metales pesados, contaminantes orgánicos, etc (ATEMIS GmbH, 2014). No obstante, la caracterización particular de los diferentes cosustratos es necesaria para la gestión adecuada del proceso, evitando riesgos de estabilización y cambios operativos y del entorno (Estévez, 2018).

Si bien es cierto que el tratamiento conjunto de sustratos está abriendo vías alternas para el tratamiento de residuos y su valorización, es necesario conocer sus implicaciones tanto positivas como negativas que sirvan como instancia para su implementación, puesto que la aceptación de sustratos adicionales para la co-fermentación representa un incremento en la cantidad de lodos dentro de las torres de digestión, que según Montusiewicz & Lebiocka (2011) varía entre el 30% al 50% y que en términos operativos implica mayor monitoreo. De igual forma, se deben realizar evaluaciones constantes de las características de los cosustratos, ya que según su procedencia y su composición pueden generar alteraciones o beneficios dentro del sistema. Por otro lado, estudios han demostrado, que la adición de sustratos idóneos (determinada por su composición), aumenta

el rendimiento del biogás, así como la biodegradabilidad debido a las características que surgen de la mezcla de estos materiales (Arhoun, 2017).

Asimismo, la co-digestión implica mayor relación C/N, lo que es favorable para la digestión de la mezcla. Ni tan alta que genere deficiencia de nutrientes para el crecimiento y reproducción de los microorganismos, ni tan baja que genere inhibición de la metanogénesis debido a altas concentraciones de nitrógeno amoniacal (total o libre). También involucra el incremento en la carga orgánica que a su vez aumenta la producción de metano, mejora en la remoción de sólidos volátiles y genera mayor efecto sinérgico (Molina et al., 2016).

Cabe resaltar que estas implicaciones van a depender principalmente del origen de los sustratos, los parámetros ambientales y las condiciones operativas (Yang et al., 2019).

A pesar de muchos estudios publicados sobre la co-digestión de diferentes cosustratos, especialmente de lodos de depuradora con diversos desechos orgánicos, hasta el momento se han encontrado pocos estudios prácticos sobre este proceso. Esto se debe principalmente a que la industria generalmente no está interesada en publicar datos de prueba a escala comercial (Arhoun, 2017).

No obstante, una revisión publicada en 2014 sobre el proceso de co-digestión anaeróbica muestra que los principales sustratos utilizados son: abonos de origen animal (54 %), lodos de depuradora (22 %), fracción orgánica de residuos sólidos (11 %) y otros (13%). En ese sentido, los co-sustratos más utilizados son los residuos industriales (41%), residuos agrícolas (23%), residuos municipales (20%) y otros (16%) (Mata-Alvarez et al., 2014).

Otra revisión hecha por Chow et al. (2020) muestra que la co-digestión anaerobia de los lodos de aguas residuales que involucran co-sustratos de fracción orgánica de residuos sólidos, glicerol crudo, desechos agrícolas, grasas y aceites (FOG) no solo potencia la producción de biogás y el rendimiento de metano, sino que también puede reducir los costos de los equipos compartidos, crear un manejo más fácil de la materia prima y crear un proceso más estable en general.

Arhoun (2017) menciona, además, que son posibles diferentes combinaciones de residuos para la co-digestión con lodos de depuradora en función de la disponibilidad de los sustratos en las diferentes estaciones del año. Sin embargo, es deseable que la variación de las características de los residuos sea mínima para evitar perturbaciones en el reactor. De ahí que autores como Bernal et al. (2020) manifiestan la importancia de determinar la viabilidad de las mezclas antes de montar

un sistema de tratamiento por co-digestión, puesto que pueden existir tóxicos o inhibidores que invaliden el nuevo producto (mezcla) como un adecuado co-sustrato para la co-digestión. Asimismo, previo a la operación de este sistema, se debe analizar la proporción de cada residuo con el fin de evitar sobrecargas orgánicas en el digestor (Bernal et al., 2020).

La Tabla 1 muestra una visión general de distintos sustratos utilizados comúnmente en la co-digestión y sus propiedades características con respecto a la recuperación de energía. Es evidente que los sustratos orgánicos industriales y municipales, tienen un alto rendimiento de biogás.

Tabla 1
Características y producción de biogás de distintos sustratos utilizados para la co-digestión

Sustrato	pH	Materia seca (TS)	Materia Seca Organica (oTS)	Producción de biogás
Sustratos orgánicos agrícolas				
Estiércol de ganado	6,37	20 - 25 % OS	68 - 76 % TS	60 - 120 Nm ³ /ton OS
Estiércol de ave	9,2	40 % OS	75 % TS	130 - 270 Nm ³ /ton OS
Ensilaje de maíz	4,4	28 - 35 % OS	85 - 98 % TS	170 - 230 Nm ³ /ton OS
Ensilaje de pasto	4,5	24 - 50 % OS	69 - 95 % TS	169 - 200 Nm ³ /ton OS
Sustratos orgánicos industriales				
Vinaza de cereales	4,2	6 - 8 % OS	83 - 88 % TS	30 - 50 Nm ³ /ton OS
Glicerol crudo	4 - 9	-	90 % TS	240 - 260 Nm ³ /ton OS
Sustratos orgánicos municipales				
Residuos de comida	3,8	10 % OS	90 % TS	-
Trampa de grasas	4,38	-	99,4 % TS	-

Fuente de datos: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). 2010. www.fnr.de

El biogás es un biocombustible producido a partir de la descomposición o fermentación de materiales orgánicos a partir de residuos vegetales y animales en un digestor anaeróbico (Iweka et al., 2021).

La idoneidad de la biomasa como sustrato para la producción de biogás depende en gran medida de su composición nutricional, lo que finalmente afecta el rendimiento de biogás, el contenido de metano, la biodegradabilidad y la cinética de descomposición de la biomasa respectiva (Nwokolo et al., 2020). Estudios previos han establecido que los principales componentes nutricionales de interés para el sustrato son los carbohidratos, las proteínas y las grasas, así como también han mostrado estimaciones teóricas de la producción potencial de metano y la proporción de biogás que se puede obtener de estos nutrientes (Tabla 2).

Tabla 2.*Máximo teórico de producción de biogás y su porcentaje de composición*

Nutriente	Rendimiento de metano (m ³ /Kg oTS)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	Referencia
Carbohidratos	0,42	50	50	(Nwokolo et al., 2020)
Proteínas	0,50	50	50	(Nwokolo et al., 2020)
Lípidos	1,01	70	30	(Nwokolo et al., 2020)

Como se observa en la Tabla 2, la producción potencial de metano de aquellos sustratos ricos en lípidos es hasta dos veces mayor que la de los sustratos con predominancia de carbohidratos y proteínas. Sin embargo, en su proceso de degradación, estos compuestos ricos en lípidos liberan Ácidos Grasos de Cadena Larga (AGCL) que de no ser gestionados para evitar su acumulación, puede desencadenar problemas como el descenso del pH (Nwokolo et al., 2020), y ser tóxicos para los microorganismos (Alves et al., 2009). Del mismo modo, se puede observar que los sustratos ricos en proteínas también presentan un potencial de producción de metano relativamente alto. No obstante, la degradación microbiana de las proteínas da lugar a la liberación de iones de amonio, provocando un aumento en la alcalinidad del proceso y un desequilibrio entre el amoniaco y el amonio, lo que resulta en la inhibición de las bacterias metanogénicas (Hagos et al., 2017; Nwokolo et al., 2020). A pesar de ello, estudios previos han demostrado que los microorganismos pueden aclimatarse y seguir produciendo biogás de forma eficiente siempre que haya enriquecimiento del cultivo, normalmente aumentando la concentración de NH₃.

Aunque el potencial de producción de metano de los materiales ricos en *carbohidratos* sea el menor, son sustratos de especial cuidado ya que al tener altos niveles de azúcares simples, pueden ocasionar problemas similares a los ocasionados por los lípidos, que pueden terminar en la supresión de la metanogénesis (Hagos et al., 2017).

La exploración de varios tipos de sustratos, su composición y con ello su potencial de producción de biogás, representa un punto de partida para definir la viabilidad de su uso dentro de la co-fermentación. No obstante, se han investigado algunos de los factores ambientales y operacionales que afectan la cantidad biogás. En general, se ha identificado que factores como la temperatura del digestor, el tiempo de retención, la disponibilidad de la materia prima, la relación de mezcla de los sustratos, el equilibrio de nutrientes, las tasas de carga orgánica (OLR), el contenido de metano de los sustratos y el rendimiento de gas afectan la producción de biogás

durante la digestión de la materia prima en el proceso anaeróbico (Brew-Hammond, 2010; Chow et al., 2020; Iweka et al., 2021). Por lo tanto, es esencial regular todos los factores de influencia adecuadamente para que el proceso funcione de manera óptima.

- **Relación de mezcla de sustratos y equilibrio de nutrientes**

La relación C/N representa la correlación entre la cantidad de carbono y nitrógeno presente en la materia orgánica. Esta proporción es el equilibrio de alimentos que un microorganismo necesita para crecer con el fin de realizar la digestión de la materia orgánica (Chow et al., 2020). Si esta proporción es demasiado elevada (mucho C, pero no mucho N), el metabolismo inadecuado resultante puede hacer que el carbón presente en el sustrato no se convierta por completo, de manera que no se logrará el máximo rendimiento posible de metano. En el caso inverso, un exceso de nitrógeno puede llevar a la formación de cantidades excesivas de amoníaco (NH_3), el cual incluso en bajas concentraciones inhibirá el crecimiento de las bacterias y, en el peor caso, puede ocasionar el colapso completo de la población de microorganismos (Nachwachsende Rohstoffe eV, n.d.). Por lo tanto, para lograr una proporción ideal de C/N en la co-digestión, se sugiere tener una mezcla de residuos con una relación C/N baja y alta (Chow et al., 2020). En ese sentido, desde la literatura, se propone que las proporciones óptimas de C/N en los digestores anaeróbicos estén entre 20:1 y 30:1.

- **Temperatura de funcionamiento**

El tratamiento de co-digestión en condiciones mesófilas y termófilas es factible dependiendo de los sustratos. Numerosos investigadores han destacado los efectos significativos de la temperatura en la comunidad microbiana, la cinética del proceso y la estabilidad y el rendimiento de metano (Chow et al., 2020). Se sabe que las temperaturas más bajas durante el proceso desaceleran el crecimiento microbiano, las tasas de utilización del sustrato y la producción de biogás, además pueden provocar un agotamiento de la energía celular, una fuga de sustancias intracelulares o una lisis completa (Chow et al., 2020). Aunque las temperaturas más altas en general incrementan la producción de biogás, también aumenta la liberación de más dióxido de carbono de la fase líquida, lo cual a su vez disminuye el valor calorífico de la combinación de gases

(Nachwachsende Rohstoffe eV, n.d.). Por lo tanto, no es tanto la temperatura absoluta la que es crucial para el manejo estable del proceso, sino la estabilidad a un cierto nivel de temperatura (Nachwachsende Rohstoffe eV, n.d.). De ahí que se sugiera diferentes condiciones de temperatura para que coincidan con diferentes sustratos, debido a las características de cada uno de ellos (Chow et al., 2020).

- **Tasa de carga orgánica (OLR) y tiempo de retención hidráulica (TRH)**

OLR, un parámetro crucial, describe cuántos kilogramos de sólidos volátiles (VS) o de materia orgánica seca pueden alimentarse al digestor por m^3 de volumen de trabajo por unidad de tiempo (Nachwachsende Rohstoffe eV, n.d.). Los sólidos volátiles significan la cantidad de sólidos orgánicos que se pueden digerir, mientras que los sólidos restantes no son degradables (Chow et al., 2020). Otro parámetro relevante para decidir sobre el tamaño del recipiente es el tiempo de retención hidráulica (TRH). Esto es el tiempo promedio calculado que un sustrato permanece en el digestor hasta su descarga. El cálculo implica determinar la proporción entre el volumen del reactor (VR) respecto del volumen del sustrato añadido diariamente (Nachwachsende Rohstoffe eV, n.d.).

El OLR y la TRH óptimos a menudo dependen del tipo de sustratos introducidos en el digestor, ya que los sustratos determinan el nivel de actividad de biodegradación que se producirá en el digestor (Chow et al., 2020).

- **Rendimiento de gas y el contenido de metano**

Los rendimientos denotan la eficiencia de la producción de biogás o de la producción de metano a partir de los sustratos cargados y que está determinado esencialmente por la composición del sustrato, en otras palabras, por las proporciones de grasa, proteínas y carbohidratos (Nwokolo et al., 2020). Sin embargo, son de poco valor informativo en tanto parámetros individuales, porque no incluyen la carga efectiva del digestor. Por esta razón, los rendimientos deberían considerarse siempre en relación con la tasa de carga orgánica (Nachwachsende Rohstoffe eV, n.d.). En general, el biogás es una combinación de gases constituida principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), junto con vapor de agua y gases traza. El más importante de estos es el metano, ya

que es el componente combustible del biogás y, de este modo, influye directamente en su valor calorífico (Nachwachsende Rohstoffe eV, n.d.).

La cantidad de biogás producida depende esencialmente de la composición de los sustratos o de la mezcla de sustratos que se determina por medio de pruebas de digestión. Sin embargo, estas pruebas no son posibles en muchos casos. En ese sentido, se puede estimar el rendimiento de gas a partir de la suma de rendimientos de gas de los sustratos que conforman el insumo, asumiendo que se dispone de valores de rendimiento de gas para los sustratos individuales a partir de tablas de referencia existentes (Karki et al., 2021).

3 Metodología

Dentro de este capítulo se muestra la metodología aplicada en para el análisis del rendimiento de residuos industriales usados para la co-digestión anaerobia y producción energética en la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Straubing en Alemania y que se llevó a cabo en los pasos que se ilustran en la **Figura 1** y que se explican en los apartados posteriores.

Figura 1

Metodología utilizada para el desarrollo de la tesis

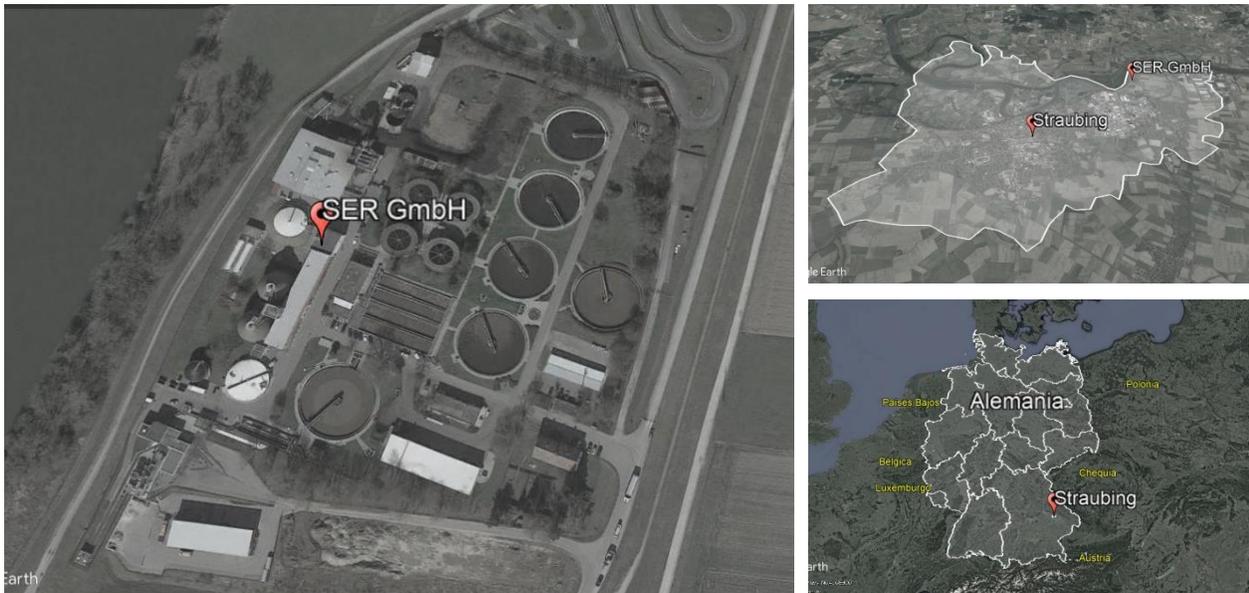


3.1 Lugar de estudio

Straubinger Energie- und Reststoffverwertungs GmbH (SER GmbH), ubicada en la ciudad de Straubing (Alemania), es la empresa encargada de aceptar y tratar los co-sustratos o residuos orgánicos de alto poder calorífico generados en la operación de diferentes industrias de la ciudad, así como de generar y alimentar energía en la red eléctrica local como resultado del aprovechamiento (uso y combustión) del biogás producido en el proceso de fermentación (Straubinger Entwässerung und Reinigung, n.d.)

Figura 2

Mapa de ubicación del lugar de estudio



Fuente de imágenes: Google Earth

3.2 Tipo de la investigación

La metodología que se utilizó en este análisis es el método descriptivo que se utiliza para recoger, organizar, resumir, presentar, analizar y generalizar, los resultados de las observaciones. Este método implica la recopilación y presentación sistemática de datos para dar una idea clara de una determinada situación. En ese sentido, el trabajo desarrollado en esta tesis se circunscribe como descriptivo, ya que la información colectada permite describir los diferentes co-sustratos y su aplicación en la cogestión anaerobia desde la base teórica y aplicada, lo que permite a su vez que los resultados se expongan de manera sistemática y se interpreten objetivamente desde lo particular y a través de correlaciones.

3.3 Fuente de Datos

Se utilizaron fuentes de datos secundarias, inicialmente, se realizó la revisión del estado del arte actual sobre los residuos industriales (co-sustratos) usados para la cogestión anaerobia en

plantas de tratamiento, sus características, parámetros, incidencias, entre otros. De igual forma, se usaron datos primarios y secundarios procedentes de fuentes internas, en este caso, la empresa SER GmbH, que facilitaron las correlaciones y un análisis más detallado de las condiciones de la empresa en términos de lo investigado.

3.4 Métodos de investigación

Se aplicó un proceso analítico sintético, estudiando aspectos particulares de los sustratos industriales usados en la co-digestión anaerobia, estableciendo un sustento teórico general. Asimismo, se aplicó el método de estudio de caso a la empresa SER GmbH, en donde se estudió la información particular de la empresa orientada con el objetivo de estudio. En este método la revisión del estado del arte y la información histórica de la empresa, fueron de fundamental importancia, pues permitieron recabar adecuadamente la información.

3.5 Recopilación y Análisis de Datos

Como base de datos se utilizaron los datos operativos históricos de los últimos 11 años de funcionamiento (2011 - 2021), así como los años de referencia 2004 – 2006, orientado en las generalidades de la planta, cantidades de aceptación co-sustratos, producción de lodos crudos, tipos de sustratos, etc. Asimismo, se recopiló información desde el estado del arte que entregara un espectro general de propiedades y características de diferentes residuos industriales (co-sustratos) con uso potencial en co-digestión, sus beneficios e implicaciones, así como información de su rendimiento de biogás.

Inicialmente, se realizó la revisión del estado del arte actual sobre los residuos industriales (co-sustratos) usados para la co-digestión anaerobia en plantas de tratamiento, sus características, parámetros, incidencias, entre otros, usando diferentes bases de datos científicas como Scopus y ElSevier. Esta información fue clasificada según el tipo de sustrato en diferentes archivos de Word, para facilitar la síntesis de la información. A continuación, se revisó la información histórica de la empresa, se extrajo la información relevante y se organizó en un Excel. Así mismo, la información

obtenida de los ensayos de fermentación encargados a un laboratorio acreditado en Alemania fue organizada en una tabla de Excel. Esta forma de organizar los datos, facilitó el análisis y las correlaciones posteriores.

3.6 Sustratos

La muestra de sustratos se tomó directamente del vehículo que alimenta al digestor en su punto de entrada. En total, fueron 9 muestras correspondientes a los sustratos tratados en la planta para el 2022. Estos sustratos fueron clasificados desde C1 hasta C9 y una mínima fracción denominada 'otros'. Cabe aclarar, que para este caso no se especifica la empresa de procedencia del residuo por confidencialidad de la misma, no obstante, C1, C2 y C3 son las grasas flotadas, aguas formadas en el desplume y lavado de pollos y el exceso de lodos respectivamente, provenientes de la empresa A de la industria cárnica encargada del sacrificio y el procesamiento de las aves de corral. C4 corresponde a los lodos de flotación provenientes de la industria láctea específicamente de la transformación de la misma, C5 es el residuo de flotación proveniente de los lotes de productos vencidos o leche con presencia de inhibidores de la industria láctea. C6 son los residuos lignocelulósicos provenientes de la industria del etanol o la destilación. C7 son las grasas flotantes provenientes de las trampas de grasas de la industria alimenticia y C8 y C9 son grasas flotadas provenientes de otras dos empresas (B y C respectivamente) de la industria cárnica.

3.7 Ensayos de fermentación

En 2022 se encargó a un laboratorio acreditado los ensayos de fermentación para los sustratos que se muestran en la Tabla 3. Las muestras no tuvieron pretratamiento y el ensayo se realizó según la normativa alemana DIN EN 12880, DIN 12879, DIN 51872-4, DIN EN 12176 (S5) y la guía VDI 4630 que proporciona reglas y especificaciones uniformes para la práctica de pruebas de fermentación y la determinación del rendimiento del biogás. A partir de estos ensayos se determinó la materia seca (TS), la materia seca orgánica (oTS) y el residuo de ignición (GR). La temperatura de incubación para este ensayo fue de 37°C durante un periodo de 34 días.

Tabla 3.
Sustratos evaluados en los ensayos de fermentación

Sustrato	Tipo
C1	Grasas flotantes - Empresa A de la industria cárnica encargada del sacrificio y el procesamiento de las aves de corral
C2	Agua de desplume y lavado de pollos - Empresa A de la industria cárnica encargada del sacrificio y el procesamiento de las aves de corral
C3	Exceso de lodos catalogados como grasas flotadas - Empresa A de la industria cárnica encargada del sacrificio y el procesamiento de las aves de corral
C5	Leche con inhibidores catalogada como lodos de flotación - Empresa de la industria láctea
C6	Residuos de destilación – Industria del etanol
C8	Grasas flotantes - Empresa B de la industria cárnica
Lodo crudo	Lodo de clarificador primario
S1	Agua residual empresa de repollo fermentado
S2	Lodos del decantador

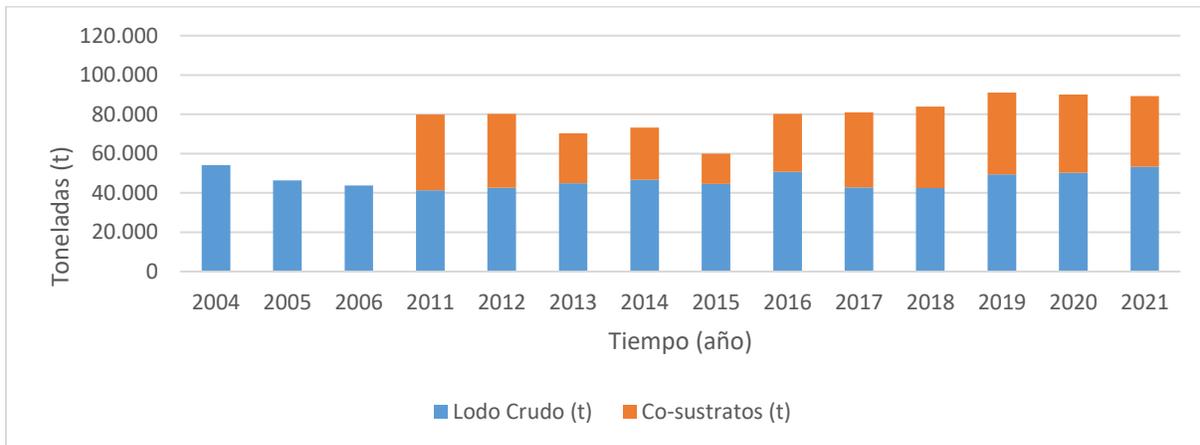
4 Resultados

En el contexto de un mayor aprovechamiento de las capacidades libres en la planta existente y de la tecnología de construcción, es importante examinar si otros flujos de biomasa pueden ser co-tratados en la depuradora y si los recursos disponibles en la planta de tratamiento son suficientes. En ese sentido, Stadtentwässerung Straubing encargó en 2012 a la empresa de ingeniería ATEMIS GmbH un estudio de viabilidad para investigar las posibilidades y los límites de aceptación de la biomasa en la planta de tratamiento de aguas residuales de Straubing, en donde se obtuvieron resultados exitosos. Sin embargo, hasta el 2021 no se contaba con estudios e información actualizada de modo que hasta ese año se trabajó con una base teórica que, aunque da una idea general de cada co-sustrato, sus características y rendimiento en términos de producción de biogás, no representa las condiciones reales de la empresa.

En 2022 se encargó a un laboratorio acreditado los ensayos de fermentación para cada co-sustrato aceptado con el fin de establecer bases reales para el cálculo del rendimiento y a su vez determinar el cosustrato que por sus características aporta mejores resultados en la co-digestión, que facilite a su vez la toma de decisiones por parte de la empresa a la hora de aceptar cosustratos adicionales.

4.1 Implicaciones de aceptar cosustratos

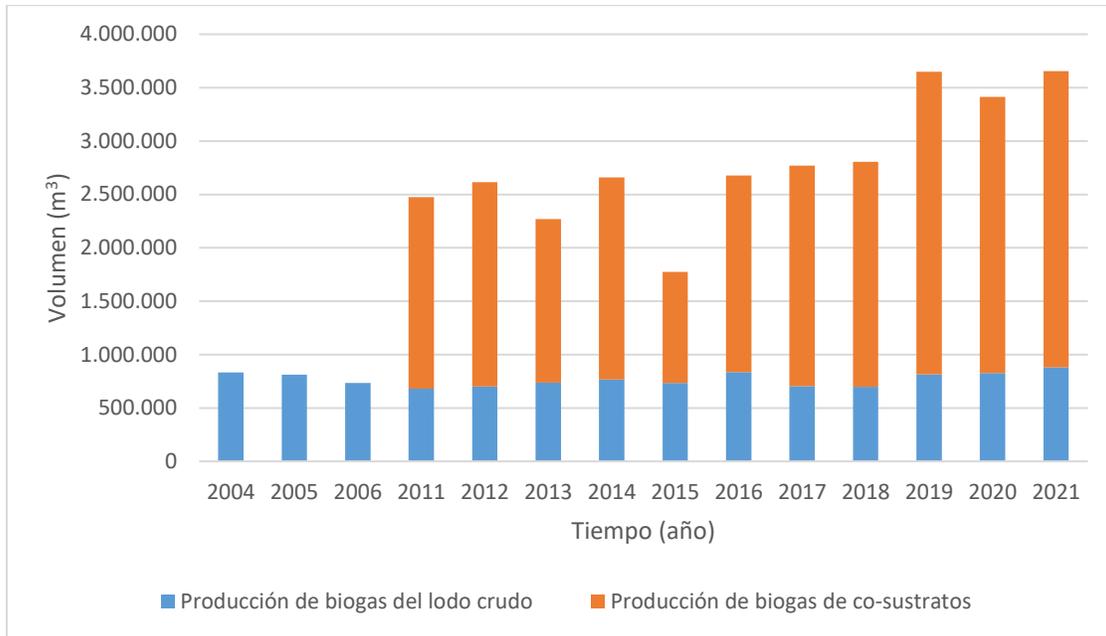
El rendimiento de los lodos crudos de la planta de tratamiento SER GmbH se ha mantenido casi constante desde los años de referencia 2004-2006. Debido a la asunción adicional de co-sustratos, la cantidad de lodos se ha incrementado en un 75% aproximadamente, pasando de un promedio de lodos de 48.000 t/a a 90.000 t/a desde los años de referencia.

Figura 3*Incremento del lodo para los diferentes años en SER GmbH*

El biogás es un producto metabólico que se produce durante la descomposición de las sustancias orgánicas contenidas en los lodos. La producción de gas en la planta de Straubing se triplicó (2.494.000 m³/a) en 2012 con la asunción de los co-sustratos tras los años de referencia 2004 - 2006 con 790.000 m³/a y para el año 2021 luego de más de 10 años de operación, la producción de gas se ha cuadruplicado respecto a los mismos años de referencia con 3.655.410 m³/a aproximadamente (ver **Figura 4**). Esto significa que actualmente, aproximadamente 3/4 de la producción de gas procede de los sustratos aceptados y 1/4 de los lodos de depuradora. Esto también fue posible gracias a las constantes medidas de mejora de infraestructura, tecnología y operación. El volumen anual de gas producido siguió aumentando de acuerdo a la cantidad de cosustratos aceptados cada año, evidenciando el aporte sustancial en la producción de biogás por parte de los co-sustratos.

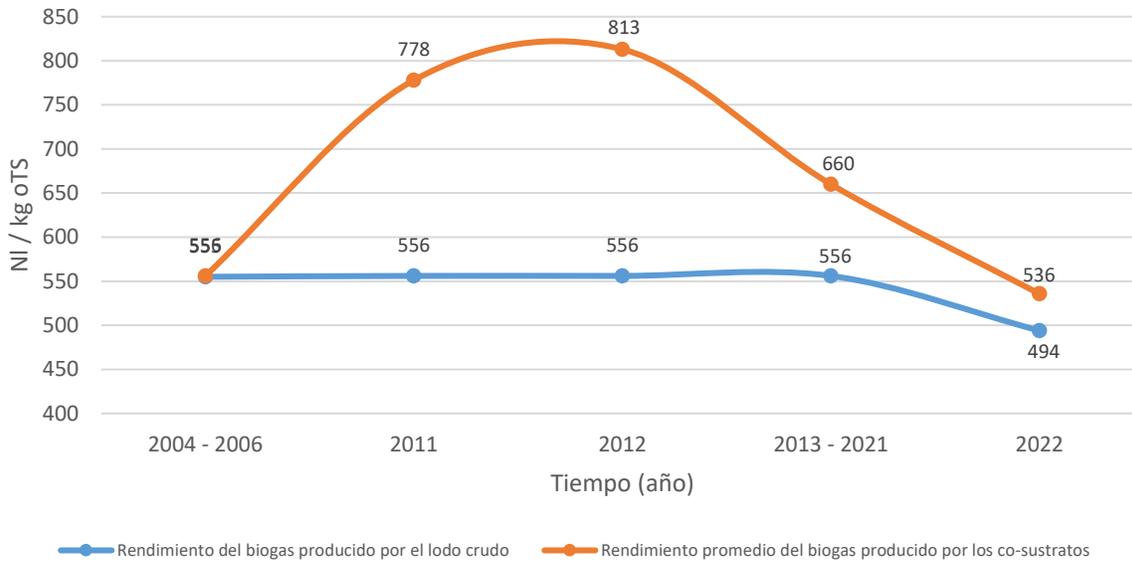
Figura 4

Histórico de producción de biogás asociado a los sustratos aceptados por SER GmbH y los lodos crudos



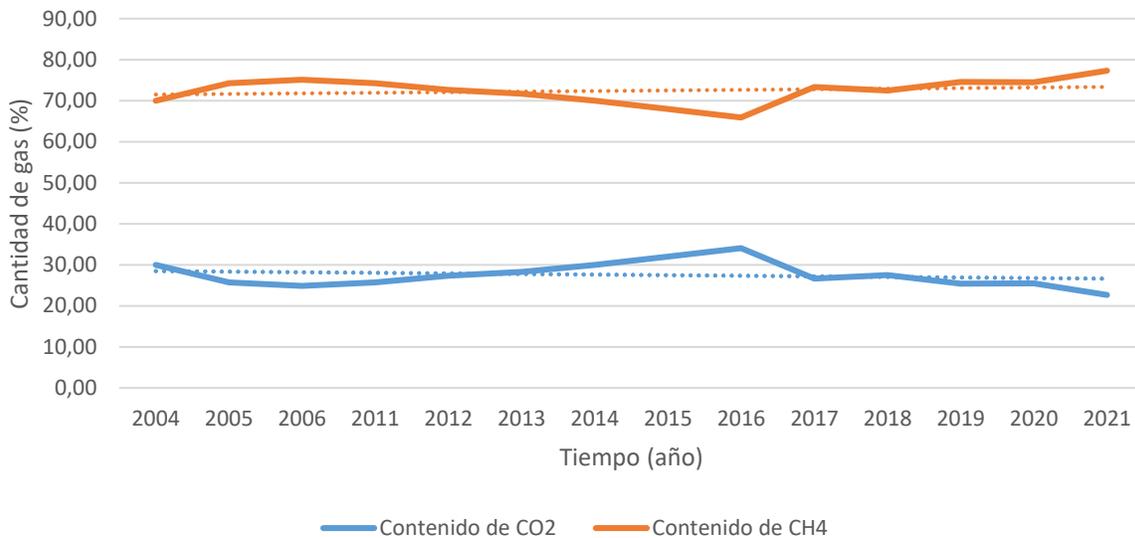
En los años de referencia 2004 - 2006, se determinó el rendimiento específico de gas (556 NI/Kg oTS alimentados) de los lodos crudos y se trasladó sin cambios a los años de funcionamiento siguientes hasta el estudio realizado en los inicios del 2022 (**Figura 5**) ya que este valor permanece aproximadamente invariable y ya no puede calcularse individualmente debido a la asunción de co-sustratos. Suponiendo que el rendimiento específico de gas de los lodos crudos se mantiene igual, se observa una disminución significativa del rendimiento de gas de los co-sustratos en el periodo comprendido entre 2013 – 2021 respecto a los rendimientos de los años 2011 y 2012, esto se puede asociar a que durante este periodo no se realizaron ensayos de fermentación que permitirán un cálculo real para esta variable, por consiguiente se asumieron los valores propuestos en la teoría para los tipos de cosustratos aceptados. De igual forma, los ensayos de fermentación se hicieron de forma individual para cada sustrato y no para la mezcla de este. En ese sentido, los valores obtenidos para 2022 corresponden al promedio de los rendimientos. El estudio para 2022, arrojó que el rendimiento del biogás para el lodo crudo disminuyó hasta 494 NI/Kg oTS alimentados mientras que el rendimiento promedio de los cosustratos disminuyó hasta 536 NI/Kg oTS alimentados.

Figura 5
Rendimiento del biogás producido en SER GmbH



Los análisis previos del gas producido antes de la adición de cosustratos muestran un contenido de metano del 65%, que corresponde a los valores empíricos habituales. El poder calorífico de este gas es, por tanto, de 6,5 kWh/Nm³. Además, debido a la edad de los lodos (tiempo de retención) en la torre de digestión, se puede suponer que la calidad del gas residual es uniforme. No obstante, para los cosustratos aceptados por SER se establece que el poder calorífico del gas generado es de 7,0 kWh/Nm³ teniendo en cuenta la mezcla de estos dentro del digestor, los valores obtenidos a lo largo de los años de operación como se muestra en la **Figura 6** y el aumento del contenido de metano hasta aproximadamente el 70%. Los resultados obtenidos para el ensayo del lodo crudo en 2022 muestran la consistencia de este tipo de sustrato en cuanto a calidad, puesto que se obtuvo un contenido de metano del 65,5%.

Figura 6
Calidad del biogás producido



El contenido de materia orgánica seca oTS de los lodos crudos aumentó 8% desde los años de referencia hasta el 2011, asociado a la conversión de la clarificación primaria y al menor tiempo de retención de los lodos primarios. A partir de allí, los valores de esta variable se han mantenido relativamente constantes a lo largo de los años.

Esto se contrasta con la mayor aceptación de los co-sustratos, en donde debido a la mayor aceptación de las grasas flotadas fácilmente degradables con alto contenido orgánico, el suministro total de materia seca orgánica aumentó aún más en 2012 y en los años siguientes en comparación con los años de referencia (**Figura 7**).

Figura 7
Contenido de materia orgánica seca (oTS)



Cabe resaltar, que los valores de oTS que se tienen desde 2013 para el lodo crudo, son aproximaciones teóricas ya que en el periodo comprendido entre 2013 y 2021 no se realizaron ensayos de fermentación. De igual forma con los valores de los co-sustratos, para los cuales se usó los valores obtenidos en los ensayos realizados entre 2010 y 2012.

Es así como, con la ayuda de los datos de funcionamiento de 2010 – 2012, en donde se realizaron ensayos de fermentación, se asume un contenido de materia seca TS del 6,5% con una pérdida por ignición del 92%. En contraste con la literatura, no se encuentran diferencias significativas en cuanto a la pérdida por ignición, ya que se reporta un promedio de 89%. Para el uso de la energía, se asume una eficiencia eléctrica del 36% y una eficiencia térmica del 40%. Esta información se traslada igual hasta la actualidad, considerando la escasez de información.

4.2 Descripción de los sustratos aceptados por SER GmbH para la co-digestión anaerobia

4.2.1 Tipos de co-sustratos

En principio, la planta de tratamiento de aguas residuales de Straubing, por medio de SER GmbH acepta y trata sustratos que están incluidos en el Apéndice 1 de la Ordenanza de Biomasa (BiomasseV) que también incluye, en particular, los residuos biológicos adicionados en el artículo 2, n°1 de la Ordenanza sobre residuos biológicos (BioAbfV), cumpliendo con los requerimientos normativos. Estos sustratos son:

- Líquidos procedentes del tratamiento anaeróbico de residuos municipales
- Digestato/lodos del tratamiento anaeróbico de residuos municipales
- Líquidos procedentes del tratamiento anaeróbico de residuos animales y vegetales procedentes de adhesivos y sellantes
- Digestato/lodos del tratamiento anaeróbico de residuos animales y vegetales

Estos sustratos provienen de empresas de la industria cárnica, industria del etanol, industria del procesamiento de leche y la industria alimenticia, quienes proporcionan uno o más tipo de sustratos de acuerdo con la diversidad de procesos y el cumplimiento de las características mínimas para su aceptación dentro de la co-fermentación.

En general, la composición fisicoquímica de estos sustratos es variable teniendo en cuenta que proceden de diferentes industrias, que hay variaciones estacionales, lo que ocasiona alteraciones en la cantidad y calidad de materia prima, entre otros muchos factores que le proporcionan niveles de incertidumbre a su composición. No obstante, la literatura provee valores promedio que una fase inicial facilita la toma de decisiones en cuanto a la aceptación de un co-sustrato o no.

Características de los sustratos de la industria cárnica

Los sustratos provenientes de esta industria, tienen altas concentraciones de compuestos orgánicos y nitrógeno. La relación promedio de DQO:DBO₅:N es de 12:4:1 (COMISION NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE, 1998). Proteínas y grasas son el principal componente de la carga orgánica presente en esta biomasa (Ozdemir & Yetilmezsoy, 2020), razón por la cual

tienen un gran potencial para producir altos rendimientos de metano a diferentes concentraciones de sólidos volátiles.

Características de los sustratos de la industria del etanol

Estos sustratos se caracterizan por su elevado porcentaje de materia orgánica e inorgánica disuelta con altos valores de demanda química de oxígeno (DQO) (80,000-100,000 mg / L) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO) (40,000-50,000 mg / L), alta temperatura, coloración intensa (marrón oscuro), bajo pH (<4.0-4.5) y alto contenido de cenizas. (Kharayat, 2012; Mohana et al., 2009).

Características de los sustratos de la industria del procesamiento lácteo

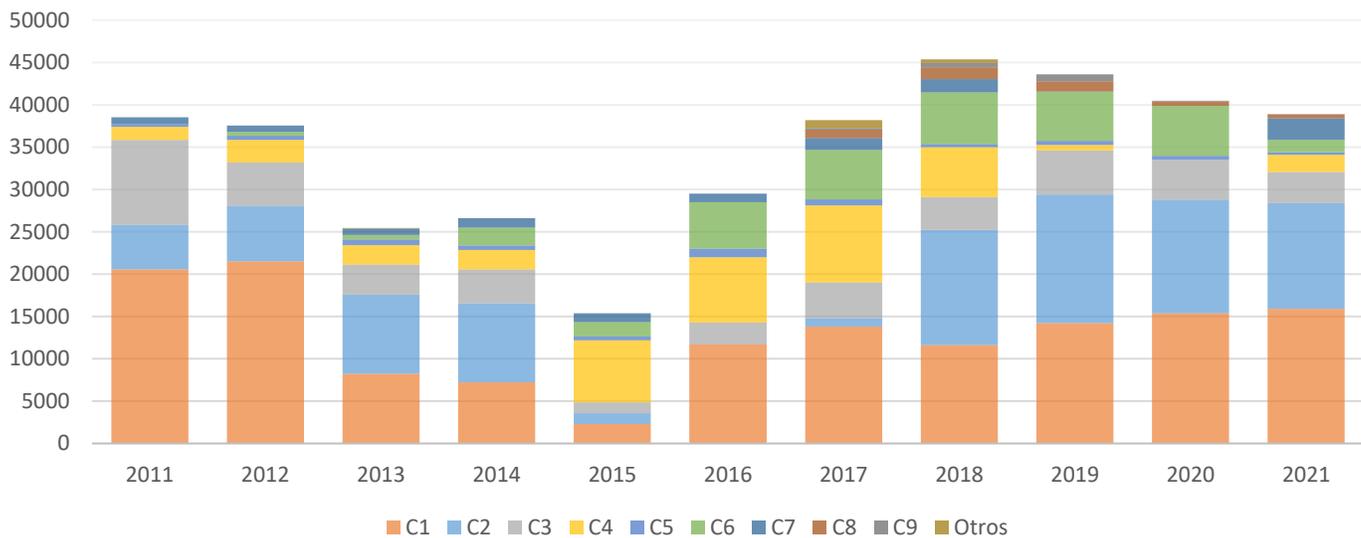
Son sustratos que contienen altas concentraciones de material orgánico como proteínas, carbohidratos y lípidos, altas concentraciones de sólidos en suspensión (entre 100 y 1000 miligramos por litro) y cloruros lo que contribuye a su vez a su elevada demanda biológica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) (Singh, 2020). Además, suelen ser de color blanco y ligeramente alcalinos por naturaleza pero se vuelven ácidos rápidamente debido a la fermentación del azúcar de la leche en ácido láctico, el nitrógeno presente es aproximadamente el 6% del nivel de DBO y el fósforo se puede presentar en un rango entre 10–100 mg/L. (Shete et al., 2013).

4.2.2 Balance de cosustratos

En la **Figura 8**, se muestra la cantidad de sustratos aceptados por año y sus diferentes tipos como se menciona en el apartado anterior (véase 3.6 Sustratos). En ese sentido, es notable que la cantidad de aceptación es variable a lo largo de los años. Sin embargo, es evidente que los sustratos más aceptados en el periodo de análisis son las grasas flotadas y las aguas formadas en el desplume y lavado de pollos, provenientes de la misma industria cárnica encargada del sacrificio y el procesamiento de las aves de corral. Lo anterior, explica el incremento progresivo en la cantidad

de materia orgánica seca además del incremento de la cantidad de gas producida, ya que, los desechos de la industria del sacrificio y procesamiento de aves de corral, generalmente ricos en proteínas y lípidos, tienen un gran potencial para producir altos rendimientos de metano a diferentes concentraciones de sólidos volátiles.

Figura 8
Cantidad de sustratos aceptados según su tipo



4.2.3 Rendimiento y calidad del biogás

Es posible asignar rendimientos de gas y concentraciones de metano específicos a los diversos grupos de sustancias, entendiendo que se derivan de las distintas concentraciones relativas de carbono en cada caso. Para la empresa SER GmbH, a partir del año 2012 y a falta de estudios actuales de cada co-sustrato, se adoptaron los datos de rendimiento de biogás proporcionados en la base de datos de la Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft – LfL donde se enumeran las materias primas con el rendimiento energético respectivo y algunos otros valores de referencia como el contenido de metano del gas en porcentaje por volumen, el contenido de materia seca, entre otros.

En la Tabla 4 se observan los valores establecidos por la LfL para los diferentes sustratos aceptados por la empresa y que son calculados aproximadamente, en la medida de lo posible, sobre

la base del contenido medio de nutrientes (grasas, proteínas e hidratos de carbono) y los cocientes digestivos. Estos resultados calculados representan los máximos rendimientos de gas posibles y el contenido de metano en condiciones óptimas de fermentación.

Tabla 4.

Valores teóricos establecidos por la LfL para los diferentes sustratos

Sustrato	Tipo	TS [%]	oTS [%TS]	Nl/kg oTS	Nm ³ /t OS	CH ₄ [%]
C1	Grasas flotantes	7	90	1.000,00	43 o 63	68
C2	Agua lavado mataderos	15	84	480	33 o 60,5	55
C3	Grasas flotantes	7	90	1.000,00	43 o 63	68
C4	Lodos de flotación	-	-	-	81	-
C5	Lodos de flotación	-	-	-	81	-
C6	Residuos de destilación	8,5	96,5	621,3	51	58,9
C7	Grasas flotantes	7	90	1.000,00	43 o 63	68
C8	Grasas flotantes	7	90	1.000,00	43 o 63	68
C9	Grasas flotantes	7	90	1.000,00	43 o 63	68
Otros	Lodos biológicos bajos en grasa	14,4	81,5	642,6	57 o 75,4	59,8

TS [%] es el contenido de materia seca en porcentaje, oTS [%] es la materia seca orgánica en % de TS, Nl/kg oTS es el rendimiento de gas en litros estándar por kg de materia seca orgánica, Nm³/t OS es el rendimiento de gas en metros cúbicos estándar por tonelada de materia fresca y CH₄ [%] es el Contenido de metano del gas en porcentaje por volumen. Fuente de datos: Biogausbeuten verschiedener Substrate - Programm Berechnung - LfL (bayern.de).

No obstante, con los ensayos realizados en 2022 se encontró el rendimiento real de algunos de los sustratos aceptados por la empresa (Tabla 5) a partir de los cuales es posible especificar cual es el sustrato que proporciona el mayor valor energético a la co-digestión y contrastar con la teoría usada por la empresa durante un periodo de tiempo considerable.

Tabla 5.

Resultados de los ensayos de fermentación para diferentes co-sustratos aceptados por SER GmbH

Sustrato	Tipo	TS [%]	oTS [%TS]	Nl/kg oTS	Nm ³ /t OS	CH ₄ [%]
C1	Grasas flotantes	8,37	84	878	62	64,8
C2	Agua lavado mataderos	7,11	89,30	532,00	34,00	63,40
C3	Grasas flotantes	3,9	76,8	188	6	62

C4	Lodos de flotación	No se realizó ensayo				
C5	Lodos de flotación	12,4	93,9	733	86	64,5
C6	Residuos de destilación	0,87	64	722	4	57,8
C7	Grasas flotantes	No se realizó ensayo				
C8	Grasas flotantes	6,74		732	39	66,9
C9	Grasas flotantes	No se realizó ensayo				

5 Análisis

En el análisis de los criterios de calidad de los diferentes sustratos a los que se les realizó el ensayo de fermentación, que son importantes a la hora de seleccionar un cosustrato para digestión conjunta en una planta de tratamiento, se encontró que todos los sustratos poseen un porcentaje de materia orgánica seca mayor al 50% lo que implica sustratos altamente biodegradables que facilitan la operación en cortos periodos de retención. Asimismo, se encuentra que todos poseen un pH dentro de un rango óptimo neutro. Se espera que, en el tratamiento conjunto de los diferentes sustratos, al menos durante la etapa de la metanogénesis esta variable permanezca en un intervalo de 6 a 7,8 unidades para facilitar la rapidez y cantidad de metano generado. Sin embargo, en procesos como la fermentación anaerobia, los valores de pH son tendientes a trabajar en rangos un poco más ácidos, debido a que en las etapas de acidogénesis y acetogénesis se forman algunos ácidos. Si se presentan variaciones, pueden ser debidas al consumo de los AGV durante el proceso, lo que aumenta la alcalinidad del medio. Por ello, es de gran importancia conocer la acidez/basicidad del sustrato de partida porque dependiendo de ello se puede saber que residuos usar conjuntamente para controlar el sistema.

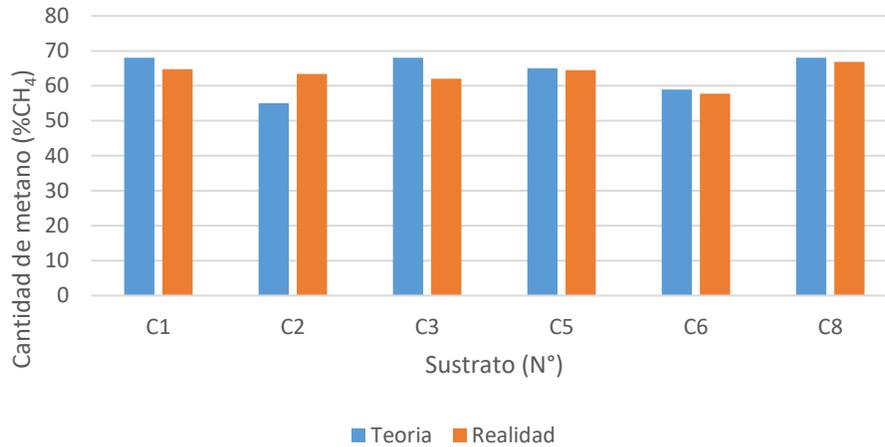
Los ensayos de fermentación se llevaron a cabo a temperatura fija de 37°C, esto se debe a que el proceso se realizó en el laboratorio y bajo condiciones controladas. Además, esta temperatura considerada mesófila, favorece el desarrollo y metabolismo de las bacterias metanogénicas que son las encargadas de digerir la materia orgánica. Otros rangos de temperatura pueden ser implementados en el proceso, sin embargo, los resultados pueden verse afectados al momento de medir la producción de biogás.

Respecto a los porcentajes de metano encontrados en el biogás producido a partir de los ensayos de fermentación para los diferentes sustratos, son aceptables de acuerdo con los valores típicos reportados en la literatura, siendo deseable en todos los casos obtener un porcentaje de metano superior a 60 % (**Figura 9**). El menor porcentaje de metano se obtuvo para el sustrato C6 (57,8 %) y el mayor porcentaje (66,9 %) se obtuvo para el sustrato C8. Esto indica que los sustratos actualmente aceptados por la empresa presentan un potencial de generación de CH₄ aceptable y,

por lo tanto, se ratifica su factibilidad de aprovechamiento para la obtención de biogás y posterior producción de energía.

Figura 9

Calidad del biogás analizado en los ensayos de fermentación realizados por laboratorio acreditado

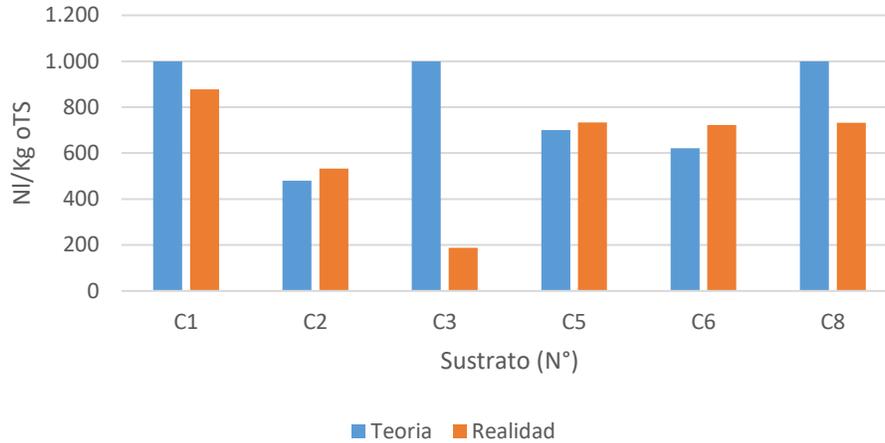


Por el contrario, se ubican algunas diferencias considerables para el rendimiento del biogás (**Figura 10**). La disimilitud más apreciable se le atribuye al sustrato C3 correspondiente al exceso de lodos proveniente de la industria cárnica, en donde la teoría reporta valores de rendimiento de aproximadamente 1000 NI/Kg oTS mientras que los ensayos arrojaron un valor de 188 NL/kg oTS, valor que además no cumple con los criterios de calidad mínimos de un sustrato para ser aceptado para su co-digestión, puesto que en términos generales el rendimiento debe ser mayor a 250 L/kg oTS.

Cabe resaltar que el ensayo de fermentación y por ende sus resultados corresponden a cada sustrato individualmente. En ese sentido, se recalca la importancia de analizar los criterios de calidad en un ambiente donde se encuentren los diferentes sustratos en mezcla con el fin de determinar con mayor precisión las razones de las diferencias significativas encontradas para el rendimiento de cada sustrato en particular.

Figura 10

Rendimiento del biogás producido en los ensayos de fermentación realizados por laboratorio acreditado



Del mismo modo, se encontraron grandes divergencias en la producción de biogás ($\text{Nm}^3/\text{t OS}$) de los sustratos C3 y C6 al contrastarlos con los valores teóricos (**Figura 11**). Esto puede deberse a la baja cantidad de materia orgánica seca presente en estos sustratos, lo que limita el alimento de las bacterias y con ello la producción de biogás. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que a raíz de estar trabajando en un medio biológico solo los promedios estadísticos de una serie prolongada de mediciones serán confiables siempre y cuando figuren las condiciones en las cuales fueron realizadas las pruebas.

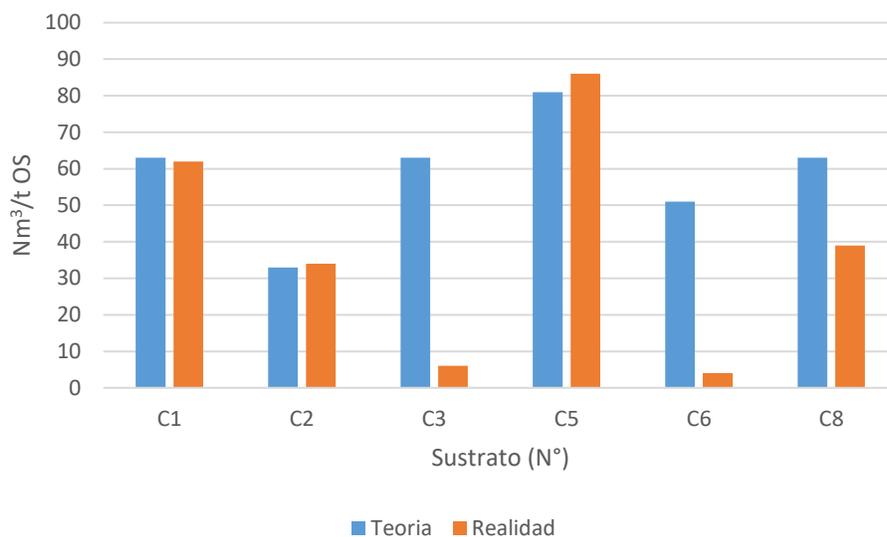
Por otro lado, con relación al tipo de sustrato, generalmente los sustratos con mayor proporción de carbono retenido en moléculas resistentes como la celulosa, como es el caso del sustrato C6, demandará mayores tiempos de retención. En ese sentido, la baja producción de biogás de C6 puede estar ligada a su composición nutricional.

De igual manera, la frecuencia e intensidad de la agitación tanto en los reactores como en las pruebas de fermentación, se deben seleccionar adecuadamente a fin de que haya un equilibrio simbiótico entre las bacterias presentes en el proceso. De lo contrario, existirá una disminución en la actividad biológica y por ende reducción en la producción de biogás. Lo anterior puede asociarse a la divergencia en la producción de biogás del sustrato C3 ya que en el laboratorio de la empresa SER GmbH se realizó un ensayo de fermentación a 35°C , donde el principal inconveniente fue la mezcla del sustrato. De igual forma este ensayo en laboratorio, permitió identificar que, a mayor

tiempo de retención, mayor producción de biogás. Esto puede deberse a un sustrato con mayor cantidad de carbono o bajas temperaturas, ya que la temperatura está estrechamente ligada con los tiempos que debe permanecer la biomasa dentro del digestor para completar su degradación. En ese sentido, a medida que aumenta la temperatura, disminuyen los tiempos de retención.

Figura 11

Producción del biogás de los sustratos analizados en los ensayos de fermentación realizados por laboratorio acreditado



En general, basados en el rendimiento de gas en litros estándar por kilogramo de materia orgánica seca y el contenido de metano, es posible afirmar que los sustratos que otorgan un mayor rendimiento son C1, C5 y C8. Esto hace sentido a la carga orgánica presente en estos sustratos, que en su mayoría son lípidos, los cuales poseen un mayor rendimiento respecto a las proteínas y los carbohidratos.

Los contenidos de TS y oTS de estos co-sustratos varían mucho; esto debe tenerse en cuenta durante la aceptación y el funcionamiento. El objetivo es evitar una sobrecarga orgánica temporal con sustratos muy concentrados, ya que de lo contrario podría producirse la formación de espuma en el digestor.

Adicionalmente, con las pruebas de fermentación se estudiaron dos sustratos adicionales, S1 y S2 que corresponden a las aguas residuales de una empresa de repollo fermentado y a los

lodos del decantador respectivamente, que en un futuro podrían ser aceptados por la empresa. Los resultados muestran que S2 tiene un contenido de materia orgánica seca del 86,5% TS, rendimiento de biogás de 373 NI/Kg oTS y contenido de metano del 56,4%. Mientras que S1 con contenido de materia orgánica seca del 60,9% TS, rendimiento de biogás de 906 NI/Kg oTS y contenido de metano de 58,7%. En términos generales, cumplen los criterios de calidad necesarios para la aceptación de sustratos para la co-digestión. No obstante, el contenido de metano no es el deseado y la composición nutricional podría generar sobrecargas dentro del reactor.

6 Conclusiones

El uso de residuos industriales con alto poder calorífico como los analizados en esta tesis, muestran potencial para aumentar la producción de biogás y el rendimiento de metano. Cabe resaltar que los principales desafíos en la tecnología ACD son la inestabilidad del proceso, que se debe principalmente a las proporciones de sustrato inadecuadas, y las condiciones de operación.

La composición del biogás generado con el proceso de digestión anaeróbica de los distintos sustratos es muy similar, con valores de CH_4 que oscilan entre 58 y 66 %. Por lo tanto, no hay razón para dar preferencia a algún sustrato en particular si el objetivo es generar biogás con una alta concentración de CH_4 .

La producción correspondiente al sustrato C3 proveniente del exceso de lodos de la industria cárnica, diverge aproximadamente en 80% de los valores reportados en la literatura para la producción y rendimiento de biogás. Este resultado pudo verse afectado por la composición nutricional del sustrato, el tiempo de retención y con la temperatura del ensayo.

Los resultados recopilados de los ensayos de fermentación, muestran un rendimiento favorable para la mayoría de sustratos estudiados. Cabe resaltar que los sustratos C1 y C5, al ser residuos con una caracterización rica y diversa, aportan mayor cantidad de nutrientes importantes para el proceso y que en co-digestión con los otros residuos tienen el potencial de incrementar la producción de biogás generada a partir de su mezcla.

De los diferentes sustratos utilizados para los ensayos de fermentación, los correspondientes a grasas flotadas y la leche con inhibidores fueron los que presentaron una producción más elevada de biogás por unidad de masa tratada, 90 % más que los residuos de la destilación y 70% más que los lodos crudos aproximadamente. Lo anterior se presentó debido a la composición de la muestra enriquecida con una mayor cantidad de materia orgánica disponible y potencialmente biodegradable, que se refleja claramente en la cantidad de ST y SV que se obtuvieron de cada una de las muestras; sin embargo, la producción alcanzada por algunos otros de los sustratos analizados se asemeja bastante con las reportadas en la literatura, haciéndolos igualmente adecuados para el tratamiento conjunto que se lleva a cabo en la empresa. En ese sentido, se puede concluir que de los co-sustratos aceptados por SER GmbH, la leche con inhibidores y las grasas flotadas de la industria cárnica son los más factibles para la integración en una EDAR, en términos de mejora del

rendimiento de metano y costos operativos y de gestión. Se requiere investigación futura centrada en el rendimiento de biogás los diferentes cosustratos en mezcla, a fin de determinar posibles interrupciones o inhibiciones en el proceso. De igual forma, estudiar la optimización de los parámetros operativos y la aceptación de nuevos sustratos de otras industrias.

7 Recomendaciones

Se recomienda hacer ensayos de fermentación en donde se evalúe el comportamiento y el rendimiento del biogás para la mezcla de los cosustratos. De esta manera, es factible establecer si el proceso presenta inhibiciones o si pueden aceptarse otros sustratos que representen mejoras significativas al proceso. Asimismo, se recomienda estudiar la optimización de los parámetros operativos, la cinética de descomposición de la biomasa, parámetros fisicoquímicos y nutricionales y la aceptación de nuevos sustratos de otras industrias.

Referencias

- Alves, M. M., Pereira, M. A., Sousa, D. Z., Cavaleiro, A. J., Picavet, M., Smidt, H., & Stams, A. J. M. (2009). Waste lipids to energy: How to optimize methane production from long-chain fatty acids (LCFA). In *Microbial Biotechnology* (Vol. 2, Issue 5, pp. 538–550). <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2009.00100.x>
- Arhoun, B. (2017). Digestión y codigestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora. *Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga Esta*, 193. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=214357>
- ATEMIS GmbH. (2014). *Potential zur Annahme von Biomasse auf der Kläranlage Straubing*.
- Benito, C., Contreras, A., Higuera, M., Morón, M. del C., & Lebrato, J. (2018). *APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS INDUSTRIALES DE ALTA CARGA ORGÁNICA MEDIANTE CODIGESTIÓN ANAEROBIA* (A. Beltrán & M. Félix (eds.); 1st ed.). Editorial Área de Innovación y Desarrollo. <https://doi.org/10.17993/ingytec.2018.34>
- Bernal, A., González, G., & Cuevas, G. (2020). Codigestión anaerobia como alternativa para el tratamiento de aguas residuales lácteas y la generación de biogás y biosólidos. *Mujeres En La Ciencia Ciencias Ambientales, Uso de Recursos*, 115–141. <https://doi.org/10.35429/h.2020.8.115.141>
- Brew-Hammond, A. (2010). INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT Potential biogas production from sewage sludge: A case study of the sewage treatment plant at Kwame Nkrumah university of science and technology, Ghana. In *Journal homepage: www.IJEE.IEEFoundation.org ISSN* (Vol. 1, Issue 6). Online. www.IJEE.IEEFoundation.org
- Chow, W. L., Chong, S., Lim, J. W., Chan, Y. J., Chong, M. F., Tiong, T. J., Chin, J. K., & Pan, G. T. (2020). Anaerobic co-digestion of wastewater sludge: A review of potential co-substrates and operating factors for improved methane yield. In *Processes* (Vol. 8, Issue 1). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/pr8010039>
- COMISION NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE. (1998). *GUIA PARA EL CONTROL Y PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN INDUSTRIAL*.
- Estévez, F. (2018). *COSUSTRATOS PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA EN EDAR URBANAS*:

- PROPUESTA DE FACTORES DE IDONEIDAD PARA ANALIZAR LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE DIGESTIÓN EXPERIMENTACIÓN EN PLANTA PILOTO*. Universidad de Sevilla.
- Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., & Lu, X. (2017). Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 76, pp. 1485–1496). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>
- Iweka, S. C., Owuama, K. C., Chukwunke, J. L., & Falowo, O. A. (2021). Optimization of biogas yield from anaerobic co-digestion of corn-chaff and cow dung digestate: RSM and python approach. *Heliyon*, 7(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08255>
- Karki, R., Chuenchart, W., Surendra, K. C., Shrestha, S., Raskin, L., Sung, S., Hashimoto, A., & Kumar Khanal, S. (2021). Anaerobic co-digestion: Current status and perspectives. In *Bioresource Technology* (Vol. 330). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125001>
- Kasinath, A., Fudala-Ksiazek, S., Szopinska, M., Bylinski, H., Artichowicz, W., Remiszewska-Skwarek, A., & Luczkiewicz, A. (2021). Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 150). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111509>
- Kharayat, Y. (2012). Distillery wastewater: bioremediation approaches. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 9(2), 69–91. <https://doi.org/10.1080/1943815X.2012.688056>
- Kunatsa, T., & Xia, X. (2022). A review on anaerobic digestion with focus on the role of biomass co-digestion, modelling and optimisation on biogas production and enhancement. *Bioresource Technology*, 344(PB), 126311. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126311>
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fonoll, X., Peces, M., & Astals, S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 36, pp. 412–427). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.039>
- Mohana, S., Acharya, B. K., & Madamwar, D. (2009). Distillery spent wash: Treatment technologies and potential applications. In *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 163, Issue 1, pp. 12–25). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.079>
- Molina, F., Guerrero, J., Ileana, C., & Peláez, C. (2016). Evaluación de la co-digestión anaerobia

- de lodos de aguas residuales municipales con residuos de alimentos. *Revista ION*, 29(1), 63–70. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016005>
- Montusiewicz, A., & Lebiocka, M. (2011). Co-digestion of intermediate landfill leachate and sewage sludge as a method of leachate utilization. *Bioresource Technology*, 102(3), 2563–2571. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.105>
- Nachwachsende Rohstoffe eV, F. (n.d.). *Guía sobre el Biogás Desde la producción hasta el uso*. www.fnr.de
- Nwokolo, N., Mukumba, P., Oibileke, K., & Enebe, M. (2020). Waste to energy: A focus on the impact of substrate type in biogas production. In *Processes* (Vol. 8, Issue 10, pp. 1–21). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/pr8101224>
- Ozdemir, S., & Yetilmezsoy, K. (2020). A mini literature review on sustainable management of poultry abattoir wastes. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(1), 11–21. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00934-1>
- Reyes, I., Díaz, J., & Horváth, I. (2015). *Anaerobic Biodegradation of Solid Substrates from Agroindustrial Activities — Slaughterhouse Wastes and Agrowastes* (R. Chamy, F. Rosenkranz, & L. Sole (eds.)). intechopen. <https://doi.org/10.5772/60907>
- Shete, B. S., Shinkar, N. P., & Kamaltai Gawai, S. (2013). *Dairy Industry Wastewater Sources, Characteristics & its Effects on Environment Department of civil engineering*. <http://inpressco.com/category/ijcet>
- Singh, K. (2020). Sustainable Food Waste Management: A Review. In M. Thakur, R. Khedar, & K. Singh (Eds.), *Sustainable Management Food Waste* (pp. 3–21).
- Straubinger Entwässerung und Reinigung. (n.d.). *Energie und Reststoffverwertung*. <https://ser-straubing.de/>
- Yang, Q., Wu, B., Yao, F., He, L., Chen, F., Ma, Y., Shu, X., Hou, K., Wang, D., & Li, X. (2019). Biogas production from anaerobic co-digestion of waste activated sludge: co-substrates and influencing parameters. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 18(4), 771–793. <https://doi.org/10.1007/s11157-019-09515-y>