

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Politécnico**

**Bioaumentación en Digestión Anaerobia: Revisión Literaria  
Sistemática con Meta-Análisis.**

**Documento Acompañante**

**Denisse Sofia Ochoa Torres**

**Ingeniería Química**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniería Química

Quito, 15 de diciembre de 2021

# **UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Politécnico**

## **HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Bioaumentación en Digestión Anaerobia: Revisión Literaria Sistemática  
con Meta-Análisis.**

**Documento Acompañante**

**Denisse Sofia Ochoa Torres**

**Daniela Almeida Streitwieser, Ph.D.**

**Juan Diego Fonseca Ashton, Ph.D.**

Quito, 15 de diciembre de 2021

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Denisse Sofia Ochoa Torres

Código: 00201687

Cédula de identidad: 1717276438

Lugar y fecha: Quito, 15 de diciembre de 2021

## ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

## UNPUBLISHED DOCUMENT

**Note:** The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

## RESUMEN

La bioaumentación es una técnica biológica que promete optimizar los procesos de digestión haciéndolos más robustos y capaces de aumentar su eficiencia. Su reciente relevancia dentro de los procesos anaerobios amerita realizar un estudio sistemático de literatura con meta-análisis para obtener un panorama claro sobre el estado actual de esta técnica. Este documento se centra en la explicación de la metodología utilizada para realizar la revisión literaria y la manera en que es aplicada al tema de interés estudiado. Debido a que las técnicas de bioaumentación tienen resultados variables de acuerdo con su ejecución, la metodología de la revisión escogida permite tener un documento transparente que reporte todos los estudios encontrados incluyendo aquellos con resultados tanto positivos como negativos. De esta manera, se obtiene una revisión reproducible con una reducción significativa en el sesgo. El objetivo principal de este documento es obtener una perspectiva clara del proceso realizado para la creación del SLR que sirva como soporte para el artículo principal. En conclusión, se demostró que la metodología usada es la más adecuada para analizar el tema de interés.

**Palabras Clave:** Meta-análisis, procesos anaerobios, técnicas de mejora.

## ABSTRACT

Bioaugmentation is a biological technique used to optimize digestion processes by making them more robust and able to improve their efficiency. Its recent relevance within anaerobic processes merits a systematic literature review with meta-analysis to obtain a clear picture of its current state of the art. This study focuses on the explanation of the methodology used to prepare the literary review and how it is applied to the subject of interest. Given that bioaugmentation techniques have variable results according to their execution, the chosen reviewing methodology forces the inclusion of all studies found, including those with positive as well as those with negative results. In this way, a reproducible review is obtained with a significant reduction in bias. The main objective of this document is to obtain a clear perspective of the process carried out for the creation of the SLR that will support the main article. To conclude, it was demonstrated that the methodology used is the most appropriate to analyze the subject of interest.

**Key words:** Literary review, meta-analysis, anaerobic processes, improvement techniques.

**TABLA DE CONTENIDO**

El mundo de las revisiones literarias .....	10
Bioaumentación .....	12
Definición .....	12
Desarrollo histórico en digestión anaerobia.....	12
Justificación .....	14
Revisión sistemática literaria.....	16
Definición de términos.....	16
Limitación de búsqueda .....	18
Validación.....	19
Correcto análisis de tema .....	21
Conclusiones.....	22
Referencias bibliográficas .....	23
Anexo A: diario científico .....	25

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Número de artículos excluidos y justificación .....	20
Tabla 2. Diario científico de artículos analizados .....	25

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Artículos publicados sobre bioaumentación en digestión anaerobia en los últimos 11 años (2010-2021).....	13
Figura 2. Número de artículos publicados según tema de interés por año .....	14
Figura 3. Procesos incluidos dentro de la revisión sistemática. ....	16
Figura 4. Enfoque PRISMA en definición de términos.....	18
Figura 5. Enfoque PRISMA en delimitación de búsqueda.....	19

## EL MUNDO DE LAS REVISIONES LITERARIAS

En la actualidad, las revisiones literarias se realizan con múltiples propósitos; tales como proveer fundamento teórico para continuar una determinada investigación, encontrar el alcance de un tema específico o responder una pregunta de interés basado en estudios existentes. Por lo general, las revisiones literarias son parte de la introducción o marco teórico en estudios o tesis que sirve como base justificativa. Sin embargo, existen otro tipo de revisiones que constituyen un trabajo por si solas, estas buscan ser una base científica para todos los investigadores interesados en el tema en lugar de serlo para solo su autor y su trabajo [1].

El último tipo de revisiones mencionadas deben ser rigurosas, sistemáticas, explícitas, comprensivas y reproducibles [1]. Las revisiones de literatura que normalmente (NLR, por sus siglas en inglés) se hacen en el área de ingeniería carecen de una metodología clara y estructurada. Las revisiones sistemáticas (SLR, por sus siglas en inglés) tienen un proceso robusto que inicialmente fue usado para investigaciones dentro del área de la medicina [2]. Sin embargo, con el pasar del tiempo y los grandes avances realizados en las áreas de ingeniería, adoptar este sistema de revisión es muy beneficioso para la academia [3]. Debido a que esto resulta en documentos fiables que sirvan como soporte para toda el área de investigación.

La principal diferencia entre NLR y SLR radica en la elección de los estudios que se van a reportar. En las NLR, el autor escoge aleatoriamente los estudios sin seguir una metodología que se pueda reproducir. Dado que con este procedimiento no se conoce bajo que parámetros se realizó esta elección, el resultado de esta revisión puede tener un sesgo y, por lo tanto, llevar a una conclusión errada sobre el tema de investigación. Por otro lado, las SLR buscan reportar todos los archivos encontrados bajo un conjunto de

términos de búsqueda definido. En el caso de tener que excluir cierta cantidad de artículos, las razones y los números de artículos excluidos también deben ser reportados y justificados [4].

Dentro de las SLR, se pueden utilizar varios enfoques. En este caso se utiliza el enfoque PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) que consta de una guía para reportar la metodología y realizar un análisis crítico del tema [5]. Este sistema estandarizado es útil para reportar correctamente los resultados y que estos puedan ser interpretados correctamente. Este enfoque fue creado por una red de colaboradores internacionales para fortalecer la metodología, por lo que su uso aumenta la calidad de la revisión [6].

El objetivo principal de este documento es obtener una perspectiva clara del proceso realizado para la creación del SLR que sirva como soporte para el artículo principal. Como objetivos específicos se determinará la justificación de la metodología utilizada y se aplicará la metodología al tema de interés.

## BIOAUMENTACIÓN

### **Definición**

La bioaumentación es una técnica biológica que consiste en la adición de microorganismos para mejorar una actividad metabólica específica [7]. Esto se realiza con el fin de disminuir la inestabilidad del proceso, reducir los efectos inhibidores, aumentar la eficiencia del proceso y/o degradar un material en específico [8]. Existen varias técnicas usadas que tienen el mismo propósito, algunas añaden diferentes materiales como carbón activado [9], o compuestos como hidrógeno [10], sin embargo, estas técnicas, a pesar de ser usadas para la mejora del proceso, no pueden ser catalogadas como bioaumentación ya que no incluyen la adición de microorganismos.

Muchos estudios utilizan el término bioaumentación, cuando no se está realizando la técnica especificada anteriormente. En algunos casos la adición de un compuesto provoca un cambio en el consorcio de bacterias que se tenía inicialmente [11], que es un efecto común al aplicar la bioaumentación, pero que tengan la misma consecuencia no implica que se aplicó la técnica. Es decir, la bioaumentación no se define ni existe como un efecto a una acción sino como una técnica específica de adicionar microorganismos[12]. Por esta razón, se concluye que los únicos estudios que deben ser considerados en esta revisión son aquellos que realizaron la adición de microorganismos, ya sea de una sepa o de un consorcio[13], a parte del inóculo inicial para la digestión.

### **Desarrollo histórico en digestión anaerobia**

La digestión anaerobia es un proceso que busca obtener biogás, una fuente de energía renovable, a partir de varios sustratos. Su importancia radica en la posibilidad de usar desperdicios o residuos como alimento para la creación de energía [8]. Por esta razón, este proceso ha ganado popularidad a lo largo del tiempo, ya que promete ser una tecnología sustentable con gran potencial para ser usada en el futuro. Sin embargo, este

proceso suele ser muy sensible a los cambios y necesita un control exhaustivo de los parámetros de control [14] . La bioaumentación ha sido estudiada recientemente como técnica útil para la optimización de este proceso. La figura 1 indica como la técnica se encuentra en pleno auge dentro de este proceso pues se publicaron 12.5 veces más artículos en el 2021 que en el 2010.

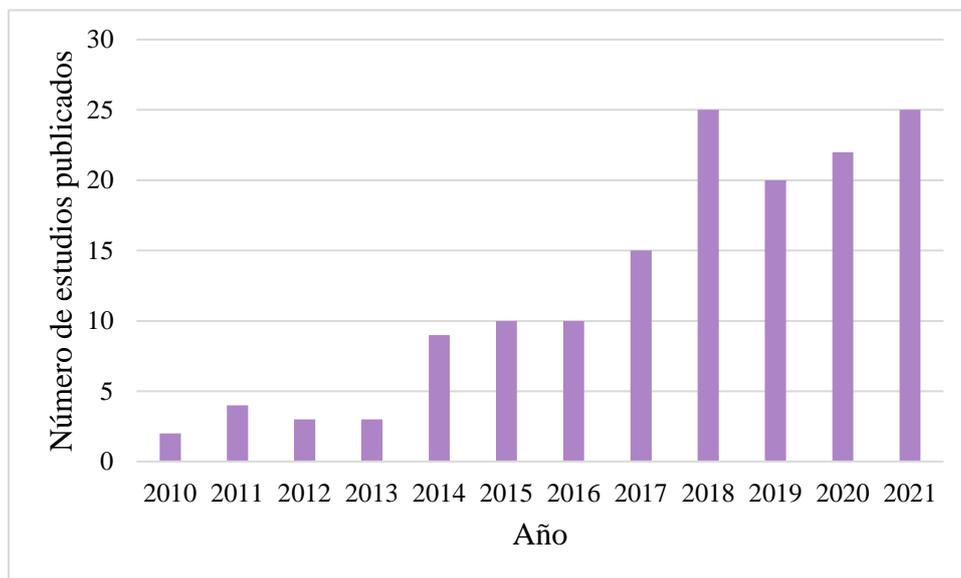


Figura 1. Artículos publicados sobre bioaumentación en digestión anaerobia en los últimos 11 años (2010-2021)

En los últimos 5 años, el 50% de los artículos obtenidos tienen como tema de interés la degradación de la materia lignocelulósica o la reducción de un efecto inhibitorio en la digestión. La figura 2 muestra la tendencia de ambos temas en los últimos 5 años. En 2017 y 2018 el tema de interés más popular fue la degradación de lignocelulosa con 4 y 6 artículos publicados, respectivamente. A partir del 2019 la popularidad de este tema se redujo y la reducción de la inhibición tóxica empezó a ganar más importancia. En el año 2021 se han publicado 6 artículos con este tema del cual 33% se enfocan específicamente en reducir el efecto inhibitorio causado por la presencia de amoníaco.

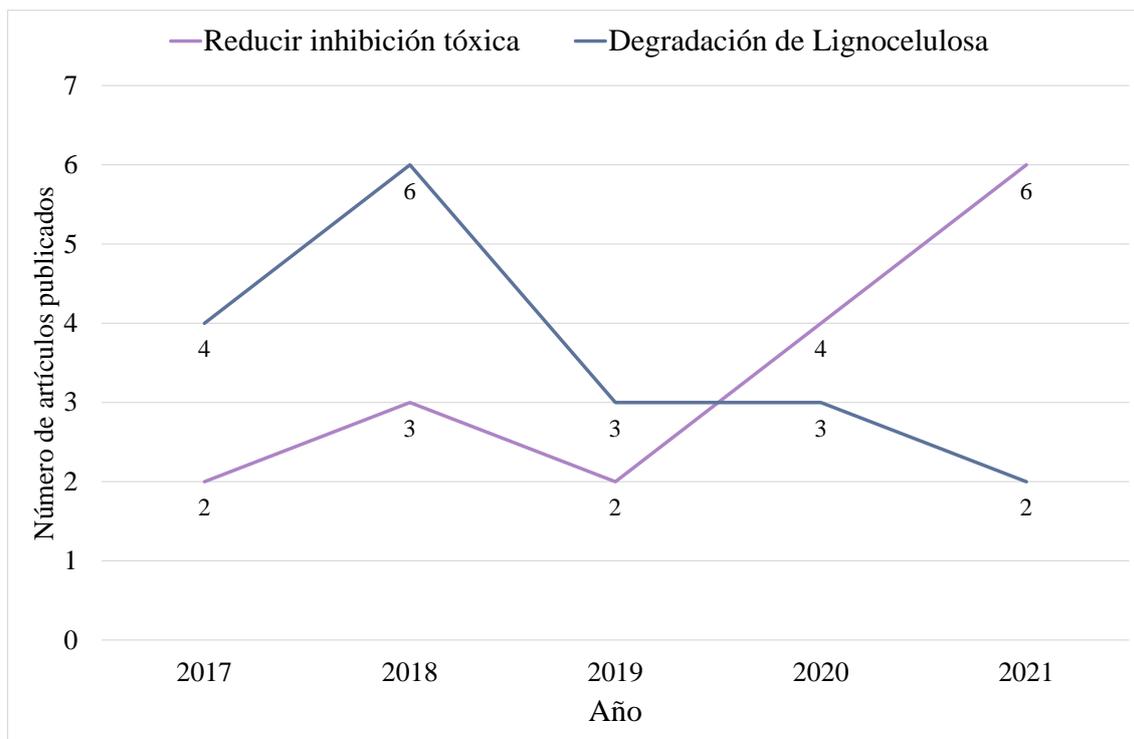


Figura 2. Número de artículos publicados según tema de interés por año

En la actualidad, los temas recientes que no han sido abordados en años anteriores son la degradación de Hidrocarburos Policíclicos Aromático, el escalamiento de la técnica de bioaumentación y la combinación de esta técnica con otras no biológicas. Estos dos últimos temas son muy importantes pues indican que los resultados obtenidos anteriormente han dado lugar a la investigación a mayor escala, y aun existe un amplio espacio para continuar con este tema de investigación. Por otro lado, la combinación de técnicas indica que la bioaumentación se considera una estrategia viable que puede ser mejorada con otras. Por esto, una gran oportunidad es investigar que técnicas tienen una relación sinérgica y logran optimizar el proceso.

### Justificación

La última revisión literaria específica sobre la bioaumentación enfocada en la digestión anaerobia se realizó en el 2017. Como se indicó en la figura 1 los últimos 5 años son los que han tenido la mayor cantidad de artículos, teniendo como picos los años 2018 y 2020

con 25 artículos publicados al año. Debido a que la última revisión en 2017 no toma en cuenta los últimos avances que probablemente sean los más significativos, es necesario realizar una revisión a partir de este año.

Adicionalmente, es necesario recalcar que no existe una gran cantidad de revisiones que aborden el tema de la bioaumentación específicamente. La mayoría de las revisiones encontradas hablan sobre una variedad de técnicas encontradas para la mejora de los tratamientos, sin profundizar en la bioaumentación. Por esta razón, una revisión que busque reportar y analizar este tema en específico es de gran interés, ya que esta técnica es una de las más usadas pues sobrelleva los problemas encontrados en las técnicas físicas o químicas de optimización[15].

Por último, la ambigüedad existente por el uso incorrecto de la palabra bioaumentación en estudios que no están aplicando la técnica, amerita una estandarización en su definición. Para esto una revisión sistemática de literatura, es la más adecuada pues de esta manera se podrán reportar todos los artículos existentes que usen este término erróneamente. Además, debido a que esta técnica puede tener resultados variables según su ejecución, la SLR servirá para tener un documento fiable en el que se reporten los resultados tanto positivos como negativos. De esta manera se logrará tener un documento que sea útil para seguir desarrollando este tema de investigación.

## REVISIÓN SISTEMÁTICA LITERARIA

### Definición de términos

Los términos importantes para definir el mundo de esta investigación fueron considerados y analizados en base al enfoque PRISMA. Los primeros términos utilizados corresponden al proceso general de la digestión anaerobia. Por esto se utilizaron los términos "digestión anaerobia" o "fermentación negra", adicionalmente se usó el término "fermentación ácida" pues en varios estudios se utiliza este término para hablar de la fermentación negra. El conector disyuntivo permite que la búsqueda arroje cualquier estudio que tope uno de los 3 términos o los 3 a la vez, dando como resultado el mundo de la figura 3.

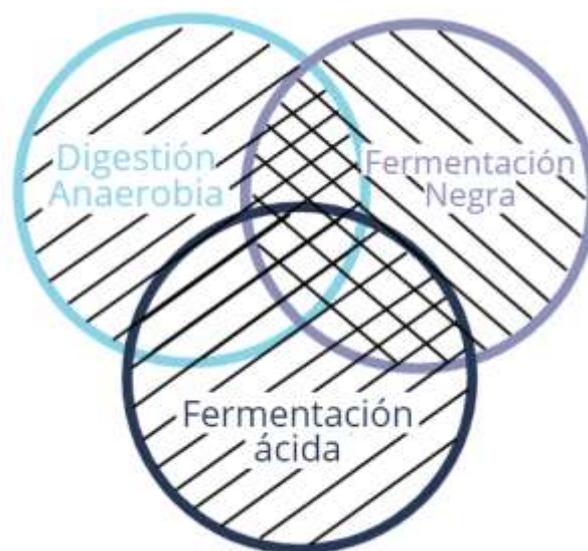


Figura 3. Procesos incluidos dentro de la revisión sistemática.

El siguiente término es el más importante y el que limita la investigación al tema de interés. En este caso se agrega el término "bioaumentación" con el conector copulativo AND que excluye todos los estudios en digestión anaerobia que no mencionen el uso de bioaumentación. Con este término los estudios se reducen significativamente (fig.4), a aproximadamente 0.6%, lo que evidencia el gran potencial que tiene para seguir

desarrollándose debido a que es una técnica que ha empezado a ganar relevancia en los últimos años.

Así como existen usos incorrectos del término bioaumentación (cap 2.1), también existen estudios que utilizan esta técnica sin ser definida como tal. Se analizó la forma de considerar estos estudios en la revisión mediante el incremento de los términos "microorganismos hidrolíticos" o "microorganismos celulolíticos" y lo mismo con "bacterias". Esto produjo un aumento de 40 estudios. Sin embargo, 85% de estos estudios consistían únicamente en el análisis de la población microbiológica y no la aplicación de la técnica buscada. El resto incluían la adición de microorganismos en forma de consorcios, en lugar de ser especializadas o aisladas que cumplan con la definición técnica de bioaumentación. Por esta razón, se decidió no incluir estos términos pues no aportaban significativamente al mundo de la revisión.

Por último, para lograr obtener estudios que sean únicamente experimentales se agregaron los excluyentes AND NOT "simulación", "matemático". Debido a que se encontraron algunos resultados que incluían un proceso de digestión bioelectroquímico, se decidió también excluir este término para evitar procesos con otras variables que no son totalmente compatibles para ser comparados con el mundo de interés. Con esto el término final oficial es:

```
TITLE-ABS-KEY ( ( "anaerobic digestion" OR "dark fermentation" OR "acid fermentation" ) AND ( "bioaugmentation" ) AND NOT simulation AND NOT mathematical AND NOT bioelectrochemical )
```

Siguiendo el enfoque PRISMA, la figura 4 indica el número de artículos obtenidos por cada término de búsqueda añadido.

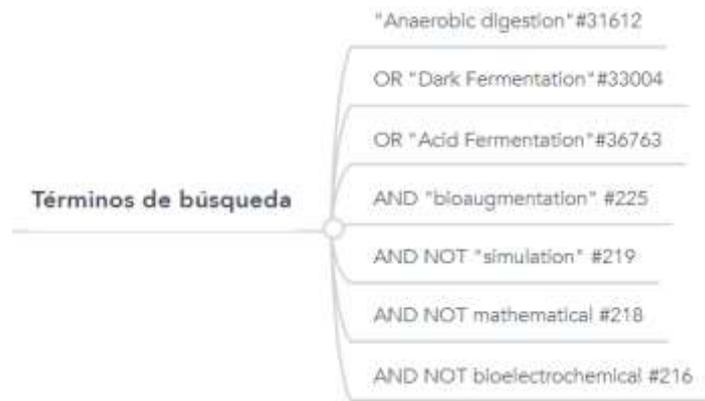


Figura 4. Enfoque PRISMA en definición de términos

### Limitación de búsqueda

Para la última limitación de la búsqueda se utilizaron los parámetros de tipo de documento, lenguaje y años. Debido a que es importante obtener un documento que indique la metodología y los resultados obtenidos de forma clara, se decidió aceptar únicamente artículos publicados. De esta manera, se excluyeron los documentos de conferencia, capítulos de libros y entrevistas del análisis.

El lenguaje no cambió el número de artículos, sin embargo, como estandarización se especifica que los artículos analizados están redactados en inglés. En último lugar se definieron los años a ser analizados. Partiendo de la última revisión existente en el tema dada en 2017, esta se especificó como la fecha de inicio. Para lograr obtener los estudios más actuales, se especificó como fecha de finalización al 2021.

Con esto el término oficial delimitado es:

TITLE-ABS-KEY ( ( "anaerobic digestion" OR "dark fermentation" OR "acid fermentation" ) AND ( "bioaugmentation" ) AND NOT simulation AND NOT mathematical AND NOT bioelectrochemical ) AND PUBYEAR > 2016 AND

PUBYEAR < 2022 AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ar" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE , "English" ) )

Siguiendo el enfoque PRISMA, la figura 5 indica el número de artículos obtenidos dada la delimitación explicada anteriormente.

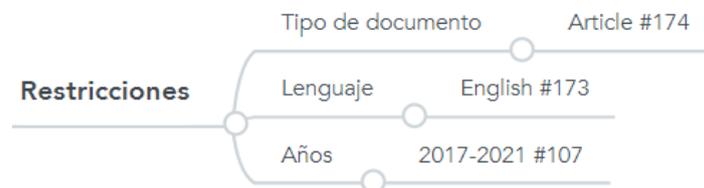


Figura 5. Enfoque PRISMA en delimitación de búsqueda

## Validación

Parte del proceso de filtración del enfoque PRISMA es la revisión individual de los estudios obtenidos para proceder a determinar su exclusión en base a argumentos válidos [5]. Para este estudio en particular se analizó si los artículos realmente estaban utilizando la técnica de bioaumentación. Las razones para la eliminación de los artículos fueron si existía la adición de microorganismos o no, si la técnica se estaba aplicando o simplemente era mencionada y si el proceso correspondía a digestión anaerobia. Este último parámetro de exclusión eliminó un total de 31 artículos (Tabla 1).

Tabla 1. Número de artículos excluidos y justificación

# Artículos excluidos	Justificación de exclusión
8	No corresponden a digestión anaerobia
10	No hay adición de microorganismos
13	Mencionan a la técnica como posible aplicación

Es importante destacar la importancia de tomar en cuenta la confusión en la definición de bioaumentación evidenciada en el capítulo 2.1. Los artículos que mencionaban utilizar esta técnica, pero no realizaban la adición de microorganismos no podían ser considerados para la comparación con los otros estudios. Después de analizar todos los artículos obtenidos en los términos de búsqueda, los artículos que no cumplían con la definición oficial de bioaumentación se retiraron de la revisión como parte del proceso de filtración dentro del enfoque PRISMA.

Por otro lado aproximadamente 12% de los estudios realizaban un proceso para el cual se justificaba a la bioaumentación como posible aplicación. Estos estudios en su mayoría eran sobre análisis microbiológico y el aislamiento de cepas. Algunos de estos incluían la parte experimental en la que si se aplicaba la técnica. sin embargo, aquellos estudios que no realizaban ensayos prácticos fueron excluidos.

Por último, los estudios que entraron en la búsqueda, pero realmente no realizaban digestión anaerobia, en su mayoría eran estudios que realizaban un proceso en ausencia de oxígeno que solo mencionaban a la digestión anaerobia, sin realizar el proceso en

realidad. Debido a que su eficiencia y sus parámetros no son comparables al resto de artículos estos no pudieron ser considerados. Al finalizar este último discernimiento, el número final de artículos fue de 72.

### **Correcto análisis de tema**

Debido a que esta revisión busca tener una vista clara del panorama general sobre la bioaumentación; los artículos tienen diferentes aplicaciones y temas de interés. El parámetro principal para evaluar el éxito de la técnica es la eficiencia del proceso. En vista que algunos estudios buscan probar la respuesta de la técnica ante algún factor inhibidor, la eficiencia de estos va a ser menor a aquellos que busquen comparar sepas o aumentar la producción de un producto en especial. Por esta razón las eficiencias son comparadas según la aplicación.

Adicionalmente, se analizaron las condiciones de operación más comunes y sus efectos en la eficiencia del proceso. Para esto se obtienen los valores de: temperatura, pH, tiempo de residencia, configuración, operación del reactor y escala. De esta manera se conocerán los parámetros óptimos y también aquellos que han sido poco investigados. Esto ayuda a que los investigadores interesados en el tema puedan tener una guía y conocer el estado del arte.

## CONCLUSIONES

Este documento presentó la metodología utilizada en la revisión sistemática de literatura enfocada en la técnica de bioaumentación dentro de la digestión anaerobia. La metodología usada permite obtener un documento fiable con un procedimiento reproducible que reporte todos los artículos encontrados, con resultados tanto positivos como negativos. El uso de SLR en el área de la ingeniería es reciente pero su implementación es útil para tener documentos más fiables que sintetizen trabajos previos y tengan un sistema de reporte estandarizado que permita su correcta interpretación, e incluya la identificación de las futuras tendencias en el área de investigación. La publicación, que utilizará la técnica mencionada en este documento, tiene como impacto esperado el obtener un documento fiable al que los futuros profesionales puedan recurrir y tengan un punto de partida claro para seguir avanzando dentro de este campo de investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Okoli and K. Schabram, “Working Papers on Information Systems A Guide to Conducting a Systematic Literature Review of Information Systems Research,” *Work. Pap. Inf. Syst.*, vol. 10, no. 2010, 2010, doi: 10.2139/ssrn.1954824.
- [2] S. K. Boell and D. Cecez-Kecmanovic, “On being ‘systematic’ in literature reviews in IS,” *J. Inf. Technol.*, vol. 30, no. 2, pp. 161–173, 2015, doi: 10.1057/jit.2014.26.
- [3] M. Borrego, M. J. Foster, and J. E. Froyd, “Systematic literature reviews in engineering education and other developing interdisciplinary fields,” *J. Eng. Educ.*, vol. 103, no. 1, pp. 45–76, 2014, doi: 10.1002/jee.20038.
- [4] M. J. Page *et al.*, “The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews,” *BMJ*, vol. 372, 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.
- [5] D. Moher, A. Liberati, J. Tetzlaff, and D. G. Altman, “Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement,” *J. Clin. Epidemiol.*, vol. 62, no. 10, pp. 1006–1012, 2009, doi: 10.1016/j.jclinepi.2009.06.005.
- [6] D. Pati and L. N. Lorusso, “How to Write a Systematic Review of the Literature,” *Heal. Environ. Res. Des. J.*, vol. 11, no. 1, pp. 15–30, 2018, doi: 10.1177/1937586717747384.
- [7] R. D. A. Cayetano, J. Park, G. B. Kim, J. H. Jung, and S. H. Kim, “Enhanced anaerobic digestion of waste-activated sludge via bioaugmentation strategy—Phylogenetic investigation of communities by reconstruction of unobserved states (PICRUSt2) analysis through hydrolytic enzymes and possible linkage to system performance,” *Bioresour. Technol.*, vol. 332, no. February, 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125014.
- [8] A. Nzila, “Mini review: Update on bioaugmentation in anaerobic processes for biogas production,” *Anaerobe*, vol. 46, pp. 3–12, 2017, doi: 10.1016/j.anaerobe.2016.11.007.
- [9] J. Quintana-Najera, A. J. Blacker, L. A. Fletcher, and A. B. Ross, “The effect of augmentation of biochar and hydrochar in anaerobic digestion of a model substrate,” *Bioresour. Technol.*, vol. 321, no. December 2020, p. 124494, 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2020.124494.
- [10] B. Wu, C. He, S. Yuan, Z. Hu, and W. Wang, “Hydrogen enrichment as a bioaugmentation tool to alleviate ammonia inhibition on anaerobic digestion of phenol-containing wastewater,” *Bioresour. Technol.*, vol. 276, no. December 2018, pp. 97–102, 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2018.12.099.
- [11] H. Xu *et al.*, “Inhibitory effect of released phosphate on the ability of nano zero valent iron to boost anaerobic digestion of waste-activated sludge and the remediation method,” *Chem. Eng. J.*, vol. 405, no. July 2020, p. 126506, 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.126506.
- [12] Y. Li, J. Zhao, and Z. Zhang, “Implementing metatranscriptomics to unveil the mechanism of bioaugmentation adopted in a continuous anaerobic process treating cow manure,” *Bioresour. Technol.*, vol. 330, no. February, 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.124962.

- [13] A. Montusiewicz, “Bioaugmentation As A Method Limiting The Toxic Effect Of Mature Landfill Leachate Co-Digested With Sewage Sludge,” *Int. J. Conserv. Sci.*, vol. 12, no. SpecialIssue 1, pp. 793–804, 2021.
- [14] M. L. Christou, S. Vasileiadis, D. G. Karpouzas, I. Angelidaki, and T. A. Kotsopoulos, “Effects of organic loading rate and hydraulic retention time on bioaugmentation performance to tackle ammonia inhibition in anaerobic digestion,” *Bioresour. Technol.*, vol. 334, no. April, p. 125246, 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125246.
- [15] R. D. A. Cayetano, J. Park, G. B. Kim, J. H. Jung, and S. H. Kim, “Enhanced anaerobic digestion of waste-activated sludge via bioaugmentation strategy—Phylogenetic investigation of communities by reconstruction of unobserved states (PICRUSt2) analysis through hydrolytic enzymes and possible linkage to system performance,” *Bioresour. Technol.*, vol. 332, no. March, 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125014.

## ANEXO A: DIARIO CIENTÍFICO

*Tabla 2. Diario científico de artículos analizados*

Nº	Autores	Título	Año de publicación	Título de fuente	DOI
1	Guo, Q., Ji, J., Ling, Z., Zhang, K., Xu, R., Leng, X., Mao, C., Zhou, T., Wang, H., Liu, P., Li, X.	Bioaugmentation improves the anaerobic co-digestion of cadmium-containing plant residues and cow manure	2021	Environmental Pollution	10.1016/j.envpol.2021.117885
2	Arelli, V., Mamindlapelli, N.K., Juntupally, S., Begum, S., Anupoju, G.R.	Solid-state anaerobic digestion of sugarcane bagasse at different solid concentrations: Impact of bio augmented cellulolytic bacteria on methane yield and insights on microbial diversity	2021	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2021.125675
3	Policastro, G., Carraturo, F., Compagnone, M., Giugliano, M., Guida, M., Luongo, V., Napolitano, R., Fabbicino, M.	A preliminary study on a novel bioaugmentation technique enhancing lactic acid production by mixed cultures fermentation	2021	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2021.125595
4	Rhee, C., Park, S.-G., Kim, D.W., Yu, S.I., Shin, J., Hwang, S., Shin, S.G.	Tracking microbial community shifts during recovery process in overloaded anaerobic digesters under biological and non-biological supplementation strategies	2021	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2021.125614
5	Xie, Z., Meng, X., Ding, H., Cao, Q., Chen, Y., Liu, X., Li, D.	The synergistic effect of rumen cellulolytic bacteria and activated carbon on thermophilic digestion of cornstalk	2021	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2021.125566
6	Jo, Y., Rhee, C., Choi, H., Shin, J., Shin, S.G., Lee, C.	Long-term effectiveness of bioaugmentation with rumen culture in continuous anaerobic digestion of food and vegetable wastes under feed composition fluctuations	2021	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2021.125500

7	Yan, M., Zhu, X., Treu, L., Ravenni, G., Campanaro, S., Goonesekera, E.M., Ferrigno, R., Jacobsen, C.S., Zervas, A., Angelidaki, I., Fotidis, I.A.	Comprehensive evaluation of different strategies to recover methanogenic performance in ammonia-stressed reactors	2021	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2021.12 5329
8	Montusiewicz, A.	Bioaugmentation As A Method Limiting The Toxic Effect Of Mature Landfill Leachate Co- Digested With Sewage Sludge	2021	International Journal of Conservation Science	<a href="https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85113858053&amp;partnerID=40&amp;md5=3c2cc8b21899fae4ba5d7f40b16bf0da">https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85113858053&amp;partnerID=40&amp;md5=3c2cc8b21899fae4ba5d7f40b16bf0da</a>
9	Christou, M.L., Vasileiadis, S., Karpouzas, D.G., Angelidaki, I., Kotsopoulos, T.A.	Effects of organic loading rate and hydraulic retention time on bioaugmentation performance to tackle ammonia inhibition in anaerobic digestion	2021	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2021.12 5246
10	Villanueva-Galindo, E., Moreno- Andrade, I.	Bioaugmentation on hydrogen production from food waste	2021	International Journal of Hydrogen Energy	10.1016/j.ijhydene.2020.1 1.092
11	Cayetano, R.D.A., Park, J., Kim, G.-B., Jung, J.-H., Kim, S.- H.	Enhanced anaerobic digestion of waste-activated sludge via bioaugmentation strategy— Phylogenetic investigation of communities by reconstruction of unobserved states (PICRUSt2) analysis through hydrolytic enzymes and possible linkage to system performance	2021	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2021.12 5014
12	Ferraro, A., Massini, G., Miritana, V.M., Panico, A., Pontoni, L., Race, M., Rosa, S., Signorini, A., Fabbricino, M., Pirozzi, F.	Bioaugmentation strategy to enhance polycyclic aromatic hydrocarbons anaerobic biodegradation in contaminated soils	2021	Chemosphere	10.1016/j.chemosphere.20 21.130091

13	Tukanghan, W., Hupfauf, S., Gómez-Brandón, M., Insam, H., Salvenmoser, W., Prasertsan, P., Cheirsilp, B., O-Thong, S.	Symbiotic Bacteroides and Clostridium-rich methanogenic consortium enhanced biogas production of high-solid anaerobic digestion systems	2021	Bioresource Technology Reports	10.1016/j.biteb.2021.100685
14	Li, Y., Zhao, J., Zhang, Z.	Implementing metatranscriptomics to unveil the mechanism of bioaugmentation adopted in a continuous anaerobic process treating cow manure	2021	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2021.124962
15	Prasertsan, P., Leamdum, C., Chantong, S., Mamimin, C., Kongjan, P., O-Thong, S.	Enhanced biogas production by co-digestion of crude glycerol and ethanol with palm oil mill effluent and microbial community analysis	2021	Biomass and Bioenergy	10.1016/j.biombioe.2021.106037
16	Basak, B., Patil, S.M., Saha, S., Kurade, M.B., Ha, G.-S., Govindwar, S.P., Lee, S.S., Chang, S.W., Chung, W.J., Jeon, B.-H.	Rapid recovery of methane yield in organic overloaded-failed anaerobic digesters through bioaugmentation with acclimatized microbial consortium	2021	Science of the Total Environment	10.1016/j.scitotenv.2020.144219
17	Yadav, M., Vivekanand, V.	Combined fungal and bacterial pretreatment of wheat and pearl millet straw for biogas production – A study from batch to continuous stirred tank reactors	2021	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2020.124523
18	Cai, G., Zhao, L., Wang, T., Lv, N., Li, J., Ning, J., Pan, X., Zhu, G.	Variation of volatile fatty acid oxidation and methane production during the bioaugmentation of anaerobic digestion system: Microbial community analysis revealing the influence of microbial interactions on metabolic pathways	2021	Science of the Total Environment	10.1016/j.scitotenv.2020.142425
19	Wongfaed, N., Kongjan, P., Suksong, W., Prasertsan, P., O-Thong, S.	Strategies for recovery of imbalanced full-scale biogas reactor feeding with palm oil mill effluent	2021	PeerJ	10.7717/peerj.10592

20	Yan, M., Treu, L., Campanaro, S., Tian, H., Zhu, X., Khoshnevisan, B., Tsapekos, P., Angelidaki, I., Fotidis, I.A.	Effect of ammonia on anaerobic digestion of municipal solid waste: Inhibitory performance, bioaugmentation and microbiome functional reconstruction	2020	Chemical Engineering Journal	10.1016/j.cej.2020.126159
21	Li, Y., Zhao, J., Achinas, S., Zhang, Z., Krooneman, J., Euverink, G.J.W.	The biomethanation of cow manure in a continuous anaerobic digester can be boosted via a bioaugmentation culture containing Bathyarchaeota	2020	Science of the Total Environment	10.1016/j.scitotenv.2020.141042
22	Zhao, W., Jeanne Huang, J., Hua, B., Huang, Z., Droste, R.L., Chen, L., Wang, B., Yang, C., Yang, S.	A new strategy to recover from volatile fatty acid inhibition in anaerobic digestion by photosynthetic bacteria	2020	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2020.123501
23	Okonkwo, O., Papirio, S., Trably, E., Escudie, R., Lakaniemi, A.-M., Esposito, G.	Enhancing thermophilic dark fermentative hydrogen production at high glucose concentrations via bioaugmentation with <i>Thermotoga neapolitana</i>	2020	International Journal of Hydrogen Energy	10.1016/j.ijhydene.2020.04.231
24	Montusiewicz, A., Szaja, A., Musielewicz, I., Cydzik-Kwiatkowska, A., Lebiocka, M.	Effect of bioaugmentation on digestate metal concentrations in anaerobic digestion of sewage sludge	2020	PLoS ONE	10.1371/journal.pone.0235508
25	Shetty, D., Joshi, A., Dagar, S.S., Kshirsagar, P., Dhakephalkar, P.K.	Bioaugmentation of anaerobic fungus <i>Orpinomyces jyonii</i> boosts sustainable biomethanation of rice straw without pretreatment	2020	Biomass and Bioenergy	10.1016/j.biombioe.2020.105546
26	Jiang, J., Li, L., Li, Y., He, Y., Wang, C., Sun, Y.	Bioaugmentation to enhance anaerobic digestion of food waste: Dosage, frequency and economic analysis	2020	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2020.123256
27	Kalamaras, S.D., Vasileiadis, S., Karas, P., Angelidaki, I., Kotsopoulos, T.A.	Microbial adaptation to high ammonia concentrations during anaerobic digestion of manure-based feedstock: biomethanation and 16S rRNA gene sequencing	2020	Journal of Chemical Technology and Biotechnology	10.1002/jctb.6385
28	Lee, J.T.E., Wang, Q., Lim, E.Y., Liu, Z., He, J., Tong, Y.W.	Optimization of bioaugmentation of the anaerobic digestion of <i>Axonopus compressus</i> cowgrass for the production of biomethane	2020	Journal of Cleaner Production	10.1016/j.jclepro.2020.120932

29	Zagrodnik, R., Duber, A., Łężyk, M., Oleskiewicz- Popiel, P.	Enrichment Versus Bioaugmentation - Microbiological Production of Caproate from Mixed Carbon Sources by Mixed Bacterial Culture and <i>Clostridium kluyveri</i>	2020	Environmenta l Science and Technology	10.1021/acs.est.9b07651
30	Eder, A.S., Magrini, F.E., Spengler, A., da Silva, J.T., Beal, L.L., Paesi, S.	Comparison of hydrogen and volatile fatty acid production by <i>Bacillus cereus</i> , <i>Enterococcus</i> <i>faecalis</i> and <i>Enterobacter</i> <i>aerogenes</i> singly, in co-cultures or in the bioaugmentation of microbial consortium from sugarcane vinasse	2020	Environmenta l Technology and Innovation	10.1016/j.eti.2020.100638
31	Martin-Ryals, A.D., Schideman, L.C., Ong, M.	Utilizing bioaugmentation to improve performance of a two- phase AnMBR treating sewage sludge	2020	Environmenta l Technology (United Kingdom)	10.1080/09593330.2018.1 533041
32	Huang, C., Wang, W., Sun, X., Shen, J., Wang, L.	A novel acetogenic bacteria isolated from waste activated sludge and its potential application for enhancing anaerobic digestion performance	2020	Journal of Environmenta l Management	10.1016/j.jenvman.2019.1 09842
33	Poirier, S., Steyer, J.-P., Bernet, N., Trably, E.	Mitigating the variability of hydrogen production in mixed culture through bioaugmentation with exogenous pure strains	2020	International Journal of Hydrogen Energy	10.1016/j.ijhydene.2019.1 1116
34	Tian, H., Yan, M., Treu, L., Angelidaki, I., Fotidis, I.A.	Hydrogenotrophic methanogens are the key for a successful bioaugmentation to alleviate ammonia inhibition in thermophilic anaerobic digesters	2019	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2019.12 2070
35	Hamman, M.S., Abdalla, K.Z.	Reinforcement of methanogenesis in anaerobic digesters through the application of a purple non-sulfur bacteria bio-augmentation scheme	2019	International Journal of Environmenta l Science and Technology	10.1007/s13762-019- 02372-w
36	Suksong, W., Kongjan, P., Prasertsan, P., O- Thong, S.	Thermotolerant cellulolytic <i>Clostridiaceae</i> and <i>Lachnospiraceae</i> rich consortium enhanced biogas production from oil palm empty fruit bunches by solid-state anaerobic digestion	2019	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2019.12 1851
37	Maqbool, F., Kamal, R., Bhatti, Z.A., Pervez, S., Sajid, M., Haleem, K., Faridullah	Effects of hydrocarbon degrading inoculum for carwash effluent treatment in a uasb reactor	2019	Desalination and Water Treatment	10.5004/dwt.2019.24396
38	Doloman, A., Pererva, Y., Cortez, M.H., Sims, R.C., Miller, C.D.	Augmentation of granular anaerobic sludge with algalytic bacteria enhances methane production from microalgal biomass	2019	Fermentation	10.3390/fermentation5040 088

39	Tian, H., Mancini, E., Treu, L., Angelidaki, I., Fotidis, I.A.	Bioaugmentation strategy for overcoming ammonia inhibition during biomethanation of a protein-rich substrate	2019	Chemosphere	10.1016/j.chemosphere.2019.05.140
40	Poszytek, K., Karczewska-Golec, J., Dziurzynski, M., Stepkowska-Kowalska, O., Gorecki, A., Decewicz, P., Dzewit, L., Drewniak, L.	Genome-wide and functional view of proteolytic and lipolytic bacteria for efficient biogas production through enhanced sewage sludge hydrolysis	2019	Molecules	10.3390/molecules24142624
41	Ziyi Yang, Wen Wang, Chao Liu, Ruihong Zhang, Guangqing Liu	Mitigation of ammonia inhibition through bioaugmentation with different microorganisms during anaerobic digestion: Selection of strains and reactor performance evaluation	2019	Water Research	10.1016/j.watres.2019.02.048
42	Jo, Y., Hwang, K., Lee, C.	Enhancing anaerobic digestion of vegetable waste and cellulose by bioaugmentation with rumen culture	2019	Membrane Water Treatment	10.12989/mwt.2019.10.3.213
43	Ortigueira, J., Martins, L., Pacheco, M., Silva, C., Moura, P.	Improving the non-sterile food waste bioconversion to hydrogen by microwave pretreatment and bioaugmentation with <i>Clostridium butyricum</i>	2019	Waste Management	10.1016/j.wasman.2019.03.021
44	Akyol, Ç., Ince, O., Bozan, M., Ozbayram, E.G., Ince, B.	Fungal bioaugmentation of anaerobic digesters fed with lignocellulosic biomass: What to expect from anaerobic fungus <i>Orpinomyces</i> sp.	2019	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2019.01.024
45	Yadav, M., Paritosh, K., Pareek, N., Vivekanand, V.	Coupled treatment of lignocellulosic agricultural residues for augmented biomethanation	2019	Journal of Cleaner Production	10.1016/j.jclepro.2018.12.142
46	Zhang, K., Cao, G.-L., Ren, N.-Q.	Bioaugmentation with <i>Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum</i> W16 to enhance thermophilic hydrogen production using corn stover hydrolysate	2019	International Journal of Hydrogen Energy	10.1016/j.ijhydene.2019.01.045
47	Zhang, S., Chang, J., Liu, W., Pan, Y., Cui, K., Chen, X., Liang, P., Zhang, X., Wu, Q., Qiu, Y., Huang, X.	A novel bioaugmentation strategy to accelerate methanogenesis via adding <i>Geobacter sulfurreducens</i> PCA in anaerobic digestion system	2018	Science of the Total Environment	10.1016/j.scitotenv.2018.06.043

48	Zheng, Y., Zhang, C., Yang, F.	Enhancement of methane production by addition of <i>Clostridium thermocellum</i> in the anaerobic digestion of switchgrass	2018	Journal of Renewable and Sustainable Energy	10.1063/1.5038077
49	Dams, R.I., Viana, M.B., Guilherme, A.A., Silva, C.M., dos Santos, A.B., Angenent, L.T., Santaella, S.T., Leitão, R.C.	Production of medium-chain carboxylic acids by anaerobic fermentation of glycerol using a bioaugmented open culture	2018	Biomass and Bioenergy	10.1016/j.biombioe.2018.07.023
50	Qu, H., Cao, J., Chen, Y., Li, R., Wang, P., Chen, M., Li, Q., Du, J., He, J.	Enhancement of Biogas Production from Bundled Rice Straw Solid-State Fermentation by Adding Microbial Agents	2018	BioResources	10.15376/biores.13.4.8723-8737
51	Li, Y., Yang, G., Li, L., Sun, Y.	Bioaugmentation for overloaded anaerobic digestion recovery with acid-tolerant methanogenic enrichment	2018	Waste Management	10.1016/j.wasman.2018.08.043
52	Lebiocka, M., Montusiewicz, A., Cydzik-Kwiatkowska, A.	Effect of bioaugmentation on biogas yields and kinetics in anaerobic digestion of sewage sludge	2018	International Journal of Environmental Research and Public Health	10.3390/ijerph15081717
53	Lianhua, L., Ying, L., Yongming, S., Zhenhong, Y., Xihui, K., Yi, Z., Gaixiu, Y.	Effect of bioaugmentation on the microbial community and mono-digestion performance of <i>Pennisetum</i> hybrid	2018	Waste Management	10.1016/j.wasman.2018.06.031
54	Li, Y., Li, L., Sun, Y., Yuan, Z.	Bioaugmentation strategy for enhancing anaerobic digestion of high C/N ratio feedstock with methanogenic enrichment culture	2018	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2018.02.069
55	Poszytek, K., Karczewska-Golec, J., Ciok, A., Decewicz, P., Dziurzynski, M., Gorecki, A., Jakusz, G., Krucon, T., Lomza, P., Romaniuk, K., Styczynski, M., Yang, Z., Drewniak, L., Dziewit, L.	Genome-guided characterization of <i>Ochrobactrum</i> sp. POC9 enhancing sewage sludge utilization—biotechnological potential and biosafety considerations	2018	International Journal of Environmental Research and Public Health	10.3390/ijerph15071501

56	Ozbayram, E.G., Kleinstеuber, S., Nikolausz, M., Ince, B., Ince, O.	Bioaugmentation of anaerobic digesters treating lignocellulosic feedstock by enriched microbial consortia	2018	Engineering in Life Sciences	10.1002/elsc.201700199
57	Ferraro, A., Dottorini, G., Massini, G., Mazzurco Miritana, V., Signorini, A., Lembo, G., Fabbicino, M.	Combined bioaugmentation with anaerobic ruminal fungi and fermentative bacteria to enhance biogas production from wheat straw and mushroom spent straw	2018	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2018.03.128
58	Sharma, P., Melkania, U.	Effect of bioaugmentation on hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste	2018	International Journal of Hydrogen Energy	10.1016/j.ijhydene.2018.03.031
59	Figdore, B.A., Winkler, M.-K.H., Stensel, H.D.	Bioaugmentation with nitrifying granules in low-SRT flocculent activated sludge at low temperature	2018	Water Environment Research	10.2175/106143017X15054988926488
60	Ozbayram, E.G., Akyol, Ç., Ince, B., Karakoç, C., Ince, O.	Rumen bacteria at work: bioaugmentation strategies to enhance biogas production from cow manure	2018	Journal of Applied Microbiology	10.1111/jam.13668
61	Ecem Öner, B., Akyol, Ç., Bozan, M., Ince, O., Aydin, S., Ince, B.	Bioaugmentation with <i>Clostridium thermocellum</i> to enhance the anaerobic biodegradation of lignocellulosic agricultural residues	2018	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2017.10.040
62	Mulat, D.G., Huerta, S.G., Kalyani, D., Horn, S.J.	Enhancing methane production from lignocellulosic biomass by combined steam-explosion pretreatment and bioaugmentation with cellulolytic bacterium <i>Caldicellulosiruptor bescii</i>	2018	Biotechnology for Biofuels	10.1186/s13068-018-1025-z
63	Zhu, X., Treu, L., Kougiас, P.G., Campanaro, S., Angelidaki, I.	Converting mesophilic upflow sludge blanket (UASB) reactors to thermophilic by applying axenic methanogenic culture bioaugmentation	2018	Chemical Engineering Journal	10.1016/j.cej.2017.09.113
64	Fotidis, I.A., Treu, L., Angelidaki, I.	Enriched ammonia-tolerant methanogenic cultures as bioaugmentation inocula in continuous biomethanation processes	2017	Journal of Cleaner Production	10.1016/j.jclepro.2017.08.151
65	Ozbayram, E.G., Kleinstеuber, S., Nikolausz, M., Ince, B., Ince, O.	Effect of bioaugmentation by cellulolytic bacteria enriched from sheep rumen on methane production from wheat straw	2017	Anaerobe	10.1016/j.anaerobe.2017.03.013

66	Lavrič, L., Cerar, A., Fanel, L., Lazar, B., Žitnik, M., Logar, R.M.	Thermal pretreatment and bioaugmentation improve methane yield of microalgal mix produced in thermophilic anaerobic digestate	2017	Anaerobe	10.1016/j.anaerobe.2017.02.001
67	Poszytek, K., Pyzik, A., Sobczak, A., Lipinski, L., Sklodowska, A., Drewniak, L.	The effect of the source of microorganisms on adaptation of hydrolytic consortia dedicated to anaerobic digestion of maize silage	2017	Anaerobe	10.1016/j.anaerobe.2017.02.011
68	Aydin, S., Yildirim, E., Ince, O., Ince, B.	Rumen anaerobic fungi create new opportunities for enhanced methane production from microalgae biomass	2017	Algal Research	10.1016/j.algal.2016.12.016
69	Prapinagsorn, W., Sittijunda, S., Reungsang, A.	Co-digestion of napier grass and its silage with cow dung for methane production	2017	Energies	10.3390/en10101654
70	Yildirim, E., Ince, O., Aydin, S., Ince, B.	Improvement of biogas potential of anaerobic digesters using rumen fungi	2017	Renewable Energy	10.1016/j.renene.2017.03.021
71	Tsapekos, P., Kougias, P.G., Vasileiou, S.A., Treu, L., Campanaro, S., Lyberatos, G., Angelidaki, I.	Bioaugmentation with hydrolytic microbes to improve the anaerobic biodegradability of lignocellulosic agricultural residues	2017	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2017.03.043
72	Li, Y., Zhang, Y., Sun, Y., Wu, S., Kong, X., Yuan, Z., Dong, R.	The performance efficiency of bioaugmentation to prevent anaerobic digestion failure from ammonia and propionate inhibition	2017	Bioresource Technology	10.1016/j.biortech.2017.01.068