



Influencia de la relación C/N y del tiempo de retención hidráulica en el rendimiento de biogás durante la co-digestión anaeróbica

Influence of the C/N ratio and hydraulic retention time on biogas yield during anaerobic co-digestion

Aguilar-Herrera, Wanhin Orlando^{1*}

¹Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n –Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú

Recibido: 05 Mar. 2026 | Aceptado: 05 May. 2026 | Publicado: 20 Jul. 2026

Autor de correspondencia*: woaguilarh@unitru.edu.pe

Como citar este artículo: Aguilar-Herrera, W. O. (2025). Influencia de la relación C/N y del tiempo de retención hidráulica en el rendimiento de biogás durante la co-digestión anaeróbica. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas*, 5(2), e1557. <https://doi.org/10.51252/reacae.v5i2.e1557>

RESUMEN

La digestión anaeróbica constituye una alternativa sostenible para el tratamiento de residuos orgánicos y la generación de energía renovable en forma de biogás. El presente estudio evaluó la influencia de la relación carbono/nitrógeno (C/N) y del tiempo de retención hidráulica (TRH) en el rendimiento de biogás obtenido mediante co-digestión anaeróbica de purines porcinos y residuos orgánicos vegetales. El experimento se desarrolló bajo un diseño factorial 3×3 con tres repeticiones por tratamiento, considerando tres niveles de relación C/N (20,5; 21,0 y 22,0) y tres tiempos de retención hidráulica (30, 40 y 50 días). Los resultados evidenciaron que la relación C/N y el TRH influyeron significativamente en la producción de biogás ($p < 0,05$), alcanzándose un máximo de 397,6 mL bajo condiciones de C/N de 22,0 y TRH de 30 días. Se concluye que la optimización conjunta de estos parámetros permite mejorar la eficiencia del proceso y aporta criterios técnicos para el diseño y operación de sistemas de digestión anaeróbica y el aprovechamiento energético de residuos orgánicos en contextos rurales.

Palabras clave: aprovechamiento de energía renovable; gestión de residuos orgánicos; optimización del proceso; producción de metano; sistemas bioenergéticos rurales

ABSTRACT

Anaerobic digestion represents a sustainable alternative for organic waste treatment and renewable energy production in the form of biogas. This study evaluated the influence of the carbon-to-nitrogen (C/N) ratio and hydraulic retention time (HRT) on biogas yield obtained through anaerobic co-digestion of pig slurry and vegetable organic waste. The experiment was conducted using a 3×3 factorial design with three replicates per treatment, considering three C/N ratios (20.5, 21.0, and 22.0) and three hydraulic retention times (30, 40, and 50 days). The results showed that both the C/N ratio and HRT significantly affected biogas production ($p < 0.05$), achieving a maximum yield of 397.6 mL under conditions of C/N ratio of 22.0 and HRT of 30 days. It is concluded that the combined optimization of these parameters improves process efficiency and provides technical criteria for the design and operation of anaerobic digestion systems aimed at energy recovery from organic waste in rural contexts.

Keywords: renewable energy utilization; organic waste management; process optimization; methane production; rural bioenergy systems



1. INTRODUCCIÓN

El incremento sostenido de la demanda energética, asociado al crecimiento poblacional y a la intensificación de las actividades productivas, ha generado la necesidad de diversificar las fuentes de energía y reducir la dependencia de combustibles fósiles. En este contexto, la digestión anaeróbica se ha consolidado como una tecnología sostenible para el tratamiento de residuos orgánicos y la producción de biogás, contribuyendo simultáneamente a la gestión ambiental y a la generación de energía renovable (Alengebawry et al., 2024; Sathyan et al., 2022).

En América Latina, a pesar del avance en el uso de energías renovables, el aprovechamiento energético de residuos orgánicos mediante digestión anaeróbica aún presenta un desarrollo limitado, especialmente en zonas rurales. Países con alta actividad agropecuaria, como el Perú, generan grandes volúmenes de residuos biodegradables que no son adecuadamente valorizados, lo que representa una oportunidad para implementar sistemas descentralizados de producción de biogás con impacto ambiental y social positivo (Osinergmin, 2024).

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo que se desarrolla mediante la acción secuencial de diversos grupos microbianos que transforman la materia orgánica en metano y dióxido de carbono (Holm-Nielsen et al., 2009). La eficiencia del proceso depende de múltiples variables operativas y fisicoquímicas, entre las cuales la relación carbono/nitrógeno (C/N) y el tiempo de retención hidráulica (TRH) son factores determinantes para la estabilidad del sistema y la producción de biogás (DelaVega-Quintero et al., 2025; Ibrahim et al., 2025; Lu et al., 2025; Xi et al., 2026).

Diversos estudios han demostrado que una relación C/N inadecuada puede generar inhibición por acumulación de amoníaco o limitaciones nutricionales, mientras que un TRH insuficiente puede restringir el desarrollo de las poblaciones metanogénicas, reduciendo la eficiencia del proceso (Islam et al., 2023; Sathyan et al., 2022; Yenigün & Demirel, 2013). Sin embargo, aunque existe abundante literatura sobre estos parámetros de manera individual, son aún limitados los estudios que analizan de forma integrada el efecto de la relación C/N y el TRH en sistemas de co-digestión anaeróbica aplicados a contextos rurales y a escala experimental (Lu et al., 2025).

En la región San Martín, caracterizada por una intensa actividad agropecuaria y disponibilidad de residuos orgánicos como purines porcinos y residuos vegetales, la implementación de sistemas de digestión anaeróbica representa una alternativa viable para la generación de energía renovable y la reducción de impactos ambientales asociados al manejo inadecuado de residuos.

No obstante, a pesar de los avances recientes en digestión anaeróbica, la mayoría de estudios han abordado de manera independiente el efecto de la relación C/N y del tiempo de retención hidráulica, existiendo aún limitaciones en el análisis integrado de ambos parámetros en sistemas de co-digestión anaeróbica. Investigaciones recientes destacan la necesidad de evaluar la interacción entre variables operativas para optimizar la producción de biogás en condiciones reales de aplicación (DelaVega-Quintero et al., 2025; Lu et al., 2025). En este sentido, el presente estudio aporta evidencia experimental sobre el efecto combinado de la relación C/N y el TRH en un sistema de co-digestión a escala de laboratorio, orientado a su aplicación en contextos rurales.

En este contexto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la relación carbono/nitrógeno (C/N) y del tiempo de retención hidráulica (TRH) sobre la producción de biogás mediante co-digestión anaeróbica de purines porcinos y residuos orgánicos vegetales en condiciones experimentales controladas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Localización del estudio

El estudio se desarrolló en el fundo “Miraflones”, administrado por la Universidad Nacional de San Martín, ubicado en el sector Ahuashiyacu, distrito de La Banda de Shilcayo, provincia y región San Martín, Perú, a una altitud aproximada de 320 m s.n.m. La zona presenta un clima tropical húmedo, con temperaturas entre 20 y 33 °C y humedad relativa entre 50 % y 100 %.

2.2. Diseño experimental

El estudio fue de tipo aplicado, con enfoque cuantitativo y diseño experimental. Se empleó un diseño factorial 3 × 3 completamente al azar, con tres repeticiones por tratamiento, tal como se observa en la **Tabla 1**, evaluando el efecto de:

Relación carbono/nitrógeno (C/N): 20,5; 21,0; 22,0

Tiempo de retención hidráulica (TRH): 30, 40 y 50 días

En total se evaluaron nueve tratamientos experimentales.

Tabla 1.

Diseño experimental factorial 3 × 3 de los tratamientos evaluados.

Tratamiento	Relación C/N	TRH (días)
T1	20.5	30
T2	20.5	40
T3	20.5	50
T4	21.0	30
T5	21.0	40
T6	21.0	50
T7	22.0	30
T8	22.0	40
T9	22.0	50

2.3. Sustratos y preparación de la mezcla

Se utilizaron purines porcinos provenientes del fundo “Miraflones” y residuos orgánicos vegetales del comedor universitario (zanahoria, papa, tomate, cebolla). Las mezclas se prepararon en proporciones 60/40, 50/50 y 40/60 (purín/ROV), ajustando la relación C/N mediante dilución con agua destilada.

2.4. Caracterización fisicoquímica

Se determinaron carbono total, nitrógeno total, sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) en laboratorio. El pH se midió al inicio y al final del proceso, manteniéndose dentro del rango óptimo para digestión anaeróbica (6,5–7,5).

2.5. Condiciones del biodigestor

Los ensayos se realizaron en biodigestores tipo batch a escala de laboratorio, utilizando matraces de vidrio de 0,5 L de capacidad, operados con un volumen de trabajo inferior al 75 %. Los sistemas se mantuvieron en agitación constante mediante agitadores magnéticos, asegurando la homogeneidad del sustrato.

La temperatura de operación se mantuvo en condiciones mesofílicas (~30 °C). El inóculo utilizado provino de un sistema de digestión anaerobia semicontinuo previamente estabilizado, lo que garantizó la presencia de microorganismos activos.

2.6. Medición del biogás

El volumen de biogás producido se determinó mediante el método de desplazamiento de agua en probetas invertidas. Los valores obtenidos fueron corregidos a condiciones estándar de presión y temperatura (STP) utilizando la ley de los gases ideales. La composición del biogás se analizó mediante un detector portátil con sensores electroquímicos.

2.7. Análisis estadístico

Los datos fueron procesados en el software IBM SPSS Statistics v25. Previamente, se verificaron los supuestos de: normalidad (prueba de Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (prueba de Levene).

Posteriormente, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) bifactorial para evaluar el efecto de la relación C/N, el TRH y su interacción sobre la producción de biogás.

Cuando se identificaron diferencias significativas, se empleó la prueba de comparación múltiple de Tukey, considerando un nivel de significancia de $p < 0,05$.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización de sustratos

La caracterización fisicoquímica evidenció que el purín porcino presentó una baja relación C/N (6–15), mientras que los residuos orgánicos vegetales mostraron valores entre 20 y 30. La co-digestión permitió ajustar la relación C/N de los tratamientos en el rango de 20,5 a 22,0.

Tabla 2.

Caracterización fisicoquímica de los sustratos utilizados en la co-digestión anaeróbica.

Parámetro	Purín de porcino	ROV
ST (%)	18.0	40.0
SV (%ST)	77	77
C total (%)	4.71	13.66
N total (%)	3.55	2.04
Relación C/N	20.5	21.0
pH inicial	5.8	7.1

3.2. Condiciones operativas

La temperatura se mantuvo entre 28,8 °C y 29,3 °C, dentro del rango mesofílico. El pH evolucionó de valores iniciales ligeramente ácidos (5,8–5,9) a valores finales entre 6,5 y 7,5.

3.3. Producción de biogás

En la **Tabla 3** se puede observar que la producción acumulada de biogás varió en función de la relación C/N y del TRH. El mayor valor registrado fue de 397.60 mL, correspondiente al tratamiento con relación C/N de 22,0 y TRH de 30 días.

Tabla 3.

Producción acumulada de biogás según la relación C/N y el TRH.

Tratamiento	C/N	TRH (días)	Biogás(mL)
T1	20.50	30	76.87
T2	20.50	40	110.77

T3	20.50	50	193.43
T4	21.00	30	253.40
T5	21.00	40	297.83
T6	21.00	50	320.53
T7	22.00	30	397.60
T8	22.00	40	377.50
T9	22.00	50	125.07

En la **Figura 1** se corrobora el efecto de la relación C/N y TRH en la producción del biogás.

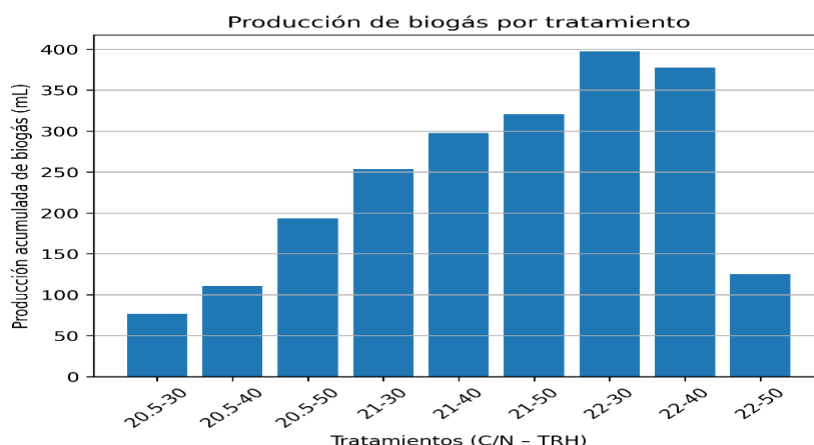


Figura 1. Efecto de la relación C/N y TRH sobre la producción de biogás

Como se observa en la **Figura 1**, la producción de biogás presenta una tendencia creciente con el incremento de la relación C/N hasta un valor cercano a 22, evidenciando la importancia del balance nutricional del sustrato. Asimismo, se aprecia que el mayor rendimiento se alcanza en el menor tiempo (30 días) de retención hidráulica evaluado, lo que sugiere una rápida degradación de la fracción orgánica biodegradable.

3.4. Análisis estadístico

El análisis de varianza mostró que la relación C/N, el TRH y su interacción influyeron significativamente en la producción de biogás ($p < 0,05$), con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,99$, aspecto que se corrobora en la **Figura 2**.

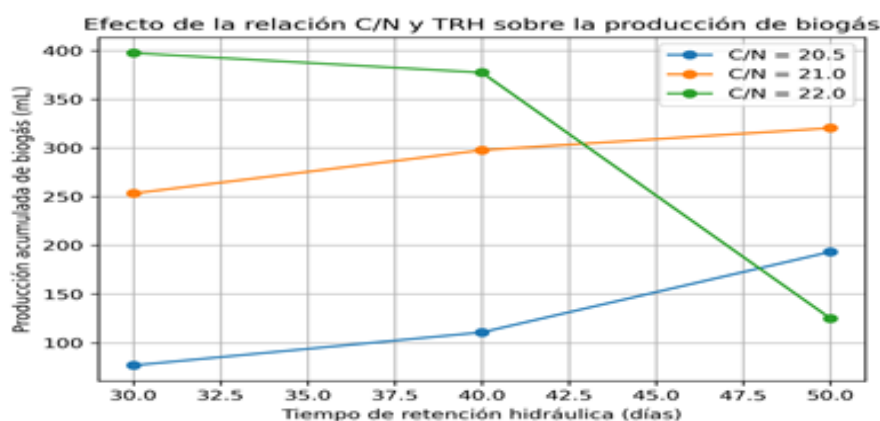


Figura 2. Efecto combinado de la relación carbono/nitrógeno (C/N) y el tiempo de retención hidráulica (TRH) sobre la producción acumulada de biogás

La **Figura 2** evidencia la interacción entre la relación C/N y el TRH, mostrando que la combinación de ambos factores influye de manera significativa en la producción de biogás. Las pendientes diferenciadas entre tratamientos confirman que el efecto de un factor depende del nivel del otro, lo cual respalda los resultados obtenidos en el análisis de varianza.

En tal sentido, el alto coeficiente de determinación obtenido ($R^2 = 0,99$) indica que el modelo experimental explica la mayor parte de la variabilidad en la producción de biogás, evidenciando un fuerte ajuste entre las variables evaluadas y la respuesta del sistema.

3.5. Discusión

Los resultados obtenidos confirman que la producción de biogás está significativamente influenciada por la relación C/N y el tiempo de retención hidráulica, lo que coincide con lo reportado en estudios recientes sobre optimización de procesos de digestión anaeróbica (DelaVega-Quintero et al., 2025; Ibrahim et al., 2025; Lu et al., 2025; Xi et al., 2026). En particular, la relación C/N cercana a 22 se encuentra dentro del rango óptimo (20–30) ampliamente documentado para favorecer la actividad microbiana y la estabilidad del proceso.

El comportamiento observado respecto al TRH indica que la mayor producción de biogás ocurre durante los primeros 30 días, sin incrementos significativos en periodos más prolongados. Este resultado sugiere que la degradación de la fracción fácilmente biodegradable del sustrato se completa en etapas tempranas del proceso, lo cual ha sido descrito previamente en sistemas batch de digestión anaeróbica (Li et al., 2011; Xi et al., 2026).

Asimismo, el mantenimiento de condiciones mesofílicas ($\approx 30^\circ\text{C}$) y un pH cercano a la neutralidad favoreció el desarrollo de las comunidades metanogénicas (Gonde et al., 2023), evitando procesos de inhibición (Labatut et al., 2014). La estabilización del pH en valores entre 6,5 y 7,5 indica un adecuado equilibrio entre la producción y consumo de ácidos grasos volátiles, lo cual es un indicador de estabilidad del sistema (Lizcano-Pulido et al., 2021).

La interacción significativa entre la relación C/N y el TRH evidencia que estos parámetros no actúan de forma independiente, sino que su combinación determina la eficiencia global del proceso. Este hallazgo resulta relevante, dado que existen pocos estudios que evalúen simultáneamente ambos factores en sistemas de co-digestión aplicados a contextos rurales.

Finalmente, los resultados obtenidos demuestran la viabilidad técnica de implementar sistemas de co-digestión anaeróbica a escala piloto en zonas rurales, contribuyendo al aprovechamiento energético de residuos orgánicos y a la reducción de impactos ambientales, lo que refuerza el potencial de esta tecnología como herramienta para el desarrollo sostenible (Meegoda et al., 2018).

Es importante señalar que los resultados obtenidos son consistentes con estudios internacionales que reportan que la optimización simultánea de la relación C/N y el TRH permite maximizar la producción de metano en sistemas de co-digestión anaeróbica (Li et al., 2011; Lu et al., 2025). En comparación con estos estudios, el presente trabajo aporta evidencia experimental en condiciones tropicales y con sustratos disponibles localmente, lo que refuerza su aplicabilidad en contextos rurales de América Latina.

Por lo tanto, el principal aporte del estudio radica en la evaluación integrada de la relación C/N y el TRH en un sistema de co-digestión anaeróbica, aspecto que ha sido limitado en investigaciones previas, especialmente en contextos rurales.

3.6. Limitaciones del estudio

El presente estudio se desarrolló a escala de laboratorio bajo condiciones controladas, lo que puede diferir de sistemas reales a mayor escala. Asimismo, el uso de un modelo batch limita la evaluación de la dinámica continua del proceso. Por ello, se recomienda realizar estudios a escala piloto y en sistemas semicontinuos que permitan validar los resultados obtenidos en condiciones operativas reales.

CONCLUSIONES

La co-digestión anaeróbica de purines porcinos y residuos orgánicos vegetales permitió mejorar el rendimiento de biogás, evidenciando la importancia del balance nutricional del sustrato para la estabilidad del proceso.

La relación carbono/nitrógeno (C/N) y el tiempo de retención hidráulica (TRH) influyeron significativamente en la producción de biogás ($p < 0,05$), así como su interacción, lo que confirma la necesidad de optimizar ambos parámetros de manera conjunta.

La mayor producción de biogás (397.6 mL) se obtuvo con una relación C/N de 22,0 y un TRH de 30 días, condiciones que se identifican como óptimas bajo el sistema experimental evaluado.

Tiempos de retención hidráulica superiores no generaron incrementos significativos en la producción, lo que indica que la degradación de la fracción fácilmente biodegradable del sustrato se completa en periodos relativamente cortos.

Los resultados evidencian la viabilidad técnica de implementar sistemas de co-digestión anaeróbica en contextos rurales, aportando criterios para el diseño y optimización de biodigestores orientados al aprovechamiento energético de residuos orgánicos.

FINANCIAMIENTO

El autor declara no haber recibido ningún patrocinio para llevar a cabo este estudio-artículo.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores del presente trabajo declaran no presentar ningún tipo de conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, curación de datos, análisis formal, adquisición de fondos, investigación, metodología, administración del proyecto, recursos, software, supervisión, validación, visualización, redacción - borrador original y redacción -revisión y edición: Aguilar-Herrera, W. O.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alengebawy, A., Ran, Y., Osman, A. I., Jin, K., Samer, M., & Ai, P. (2024). Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production and sustainable bioenergy recovery: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(6), 2641–2668. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01789-1>
- DelaVega-Quintero, J. C., Nuñez-Pérez, J., Lara-Fiallos, M., Barba, P., Burbano-García, J. L., & Espín-Valladares, R. (2025). Advances and Challenges in Anaerobic Digestion for Biogas Production: Policy, Technological, and Microbial Perspectives. *Processes*, 13(11), 3648. <https://doi.org/10.3390/pr13113648>
- Gonde, L., Wickham, T., Brink, H. G., & Nicol, W. (2023). pH-Based Control of Anaerobic Digestion to

- Maximise Ammonium Production in Liquid Digestate. *Water*, 15(3), 417. <https://doi.org/10.3390/w15030417>
- Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T., & Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100(22), 5478–5484. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.046>
- Ibrahim, N. A., Majeed, H. H., Jwaid, T. A., & Silas, K. (2025). Advancements in anaerobic digestion of organic waste for sustainable biogas production. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(30), 17916–17930. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36783-9>
- Islam, M. R., Wang, Q., Guo, Y., Wang, W., Sharmin, S., & Ebere Enyoh, C. (2023). Physico-Chemical Characterization of Food Wastes for Potential Soil Application. *Processes*, 11(1), 250. <https://doi.org/10.3390/pr11010250>
- Labatut, R. A., Angenent, L. T., & Scott, N. R. (2014). Conventional mesophilic vs. thermophilic anaerobic digestion: A trade-off between performance and stability? *Water Research*, 53, 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.035>
- Li, Y., Park, S. Y., & Zhu, J. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 821–826. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.042>
- Lizcano-Pulido, A. K., Morales-Toscano, A. C., Naranjo-Lourido, W., & Martínez-Baquero, J. E. (2021). Diseño y Simulación de Control de temperatura y pH para el inicio de un biorreactor tipo Batch. *Revista Vínculos*, 18(2). <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/vinculos/article/view/20193>
- Lu, Y., Huang, G., Zhang, J., Han, T., Tian, P., Li, G., & Li, Y. (2025). Optimization of Anaerobic Co-Digestion Parameters for Vinegar Residue and Cattle Manure via Orthogonal Experimental Design. *Fermentation*, 11(9), 493. <https://doi.org/10.3390/fermentation11090493>
- Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., & Wang, L. B. (2018). A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(10), 2224. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>
- Osinermin. (2024). *Informe mensual de energía y minería – Octubre 2024*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/7556960/6419676-informe-mensual-de-energia-y-mineria-octubre-2024.pdf>
- Sathyan, A., Haq, I., Kalamdhad, A. S., & Khwaraihpam, M. (2022). Recent advancements in anaerobic digestion: A Novel approach for waste to energy. In *Advanced Organic Waste Management* (pp. 233–246). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85792-5.00017-4>
- Xi, H., Hu, Q., & Qiu, B. (2026). Optimizing operational parameters in MEC system for enhanced methane production and reduced dissolved methane from dairy wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 326, 101753. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2026.101753>
- Yenigün, O., & Demirel, B. (2013). Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review. *Process Biochemistry*, 48(5–6), 901–911. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.04.012>