



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



Estudio del tratamiento de estiércol avícola mediante el proceso en serie de digestión anaeróbica seguido de remoción biológica de nitrógeno en presencia de materia orgánica

Study of the poultry manure treatment process using sequential anaerobic digestion and biological nitrogen removal in the presence of organic matter

POR

**CONSTANZA BEATRIZ ARRIAGADA GAJARDO**

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Química.

**Profesora guía: Marlene Doris Roedel von Bennewitz**

**Concepción – CHILE, diciembre 2023**

## **ABSTRACT**

The objective of the present work was to develop a global treatment system that ensures the removal of organic matter and nitrogen from ammonia-rich wastes, such as poultry manure, and to determine operational ranges of the proposed system that allow high methane production, high nitrogen removal and reduction of waste dilution in the treatment of a real and complex substrate. The process consists of biological treatment by anaerobic digestion (AD) followed by the simultaneous process of partial nitrification, Anaerobic Ammonia Oxidation, and denitrification (SNAD, Simultaneous Nitrification, Anammox, and Denitrification).

This work has focused on the treatment of poultry manure and the identification of operational conditions to obtain high methane yields with a hydraulic retention time (HRT) lower than 15 d in the anaerobic digestion and nitrogen removal close to the theoretical maximum for the SNAD process, treating wastewater with high total ammonia nitrogen (TAN) concentration. This study is innovative because there are partial studies on the treatment of poultry manure, but there are unsolved problems. There is no information available on the AD of poultry manure with high methane yields and TRH shorter than 15 d, and there is limited information available on the treatment of digested poultry manure using the SNAD process. In addition, the presence of ammonia inhibits anaerobic digestion and the SNAD process, resulting in a diluted substrate with significant costs due to increased freshwater consumption, making the process infeasible for industrial application based on the reported data. Therefore, this research aims to address the unexplored research gap in the performance of AD reactor operated with short HRT and SNAD reactors at high TAN concentrations for poultry manure treatment. The study was divided into four chapters.

**Chapter 1** reviews the current literature on poultry manure treatment by anaerobic digestion. It was

concluded that high methane yields of 0.25 to 0.30 LCH<sub>4</sub> /gVS could be obtained when operating at ammonia concentrations between 0 to 500 mgNH<sub>3</sub>-N/L and with HRT less than 23 days. The average methane yield was 0.218 LCH<sub>4</sub> /gVS<sub>added</sub>.

**Chapter 2** evaluates the efficiency of an anaerobic digestion system (ADS) focused on treating high substrate concentrations (10.09 to 35.25 g VS/L) with low HRT, less than 10 d. Methane yields of 0.22 LCH<sub>4</sub> /gVS<sub>added</sub> with HRT from 3.38 to 4.66 d and at ammonia concentrations between 323 to 460 mg NH<sub>3</sub>-N/L were obtained.

**Chapter 3** studies how to improve nitrogen removal in a continuous SNAD reactor. The apparent kinetics of the process was studied in a global and simplified way, using the Haldane inhibition model. Also, the effect of the influent TAN concentration and the effect of the HRT on the reactor performance were analyzed. The analysis of the apparent kinetics showed the high sensitivity of the process to the ammonia concentration in the bulk liquid, with an ammonia inhibition constant,  $K'_{I,NH_3}$ , equal to 19 mg NH<sub>3</sub>-N/L. An optimum average ammonia concentration of 3.2 mg NH<sub>3</sub>-N/L was obtained, with an average nitrogen removal rate of 483 mg N/ L d. From the performance analysis, safe (stable) and risky (unstable) operating ranges were determined for an industrial operation. The safe operating range, with an influent concentration less than or equal to 450 mg TAN/L and an HRT between 0.4 and 1.4, allows for high nitrogen removal (74 to 83%), supports high nitrogen loading rates (1.1 g N/L d), and has shown high stability over time.

**Chapter 4** analyzes the stoichiometric substrate composition and the effect of the influent composition for the carbon and nitrogen abatement, in a semi-continuous SNAD reactor fed with anaerobic digested poultry manure with high TAN concentration (above 700 mg TAN/L). The effect

of inorganic carbon-to-nitrogen ratio (IC/N) and organic carbon-to-nitrogen ratio (TOC/N) on SNAD reactor performance was analyzed. It was observed that the limitation of IC and/or TOC generates a decrease in nitrogen removal and an imbalance in the biomass of the process, in terms of specific activity. Based on the results, it was recommended to operate with IC/N ratios = 1.7 and TOC/N = 1.07 to improve nitrogen removal in a semi-continuous SNAD reactor fed with concentrations above 700 mg TAN/L.

Finally, the obtained results highlight the technical feasibility of the process studied, under conditions of low HRT (3.38 to 4.66 d) for the AD and high substrate concentrations (400 to 794 mg TAN/L) for the SNAD process and defining safe operating ranges for treatment of poultry manure at industrial scale. These findings are crucial for the successful implementation and operation of industrial-scale processes that aim to generate renewable energy, efficiently remove organic matter and nitrogen, and reduce the environmental impact of this type of waste.

## RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar un sistema de tratamiento global que asegure la eliminación de materia orgánica y nitrógeno desde residuos ricos en nitrógeno, como el estiércol avícola, y determinar rangos operacionales del sistema, que permitan elevada producción de metano, alta eliminación de nitrógeno y reducción de la dilución del residuo en el tratamiento de un sustrato real y complejo.

El proceso consiste en el tratamiento biológico mediante digestión anaeróbica (AD) seguido del proceso simultáneo de nitrificación parcial, Anammox y desnitrificación (SNAD, por su sigla en inglés *Simultaneous Nitrification, Anammox, and Denitrification*).

Este trabajo se centró en el tratamiento de estiércol avícola y la determinación de condiciones operacionales, que permitan obtener altos rendimientos de metano con tiempos de residencia hidráulica (HRT) menores a 15 d en un digestor anaeróbico y remociones de nitrógeno en cercanías al máximo teórico para el proceso SNAD, tratando efluentes con alta concentración de nitrógeno amoniacal total (TAN). Este estudio es innovador porque existen estudios parciales sobre el tratamiento del estiércol avícola, pero existen problemas sin resolver. No se dispone de información sobre la DA de estiércol avícola con altos rendimientos de metano y TRH inferior a 15 d, y la información disponible sobre el tratamiento del efluente de la digestión anaeróbica de estiércol avícola mediante el proceso SNAD es limitada. Además, la presencia de amoníaco inhibe la AD y el proceso SNAD, lo que requiere la alta dilución del sustrato. Esto genera altos costos operacionales debido al consumo de agua fresca, lo que hace que el proceso no sea factible para su aplicación industrial en base a los datos reportados. Por lo tanto, esta investigación tiene como objetivo abordar la brecha de investigación inexplorada en el tratamiento de estiércol avícola, con respecto a aumentar el rendimiento del reactor de AD operado con bajo HRT, aumentar la eficiencia del

reactor SNAD alimentado con altas concentraciones de TAN.

El estudio se dividió en cuatro capítulos.

En el **Capítulo 1** se analizó la literatura actual de tratamiento de estiércol avícola mediante digestión anaeróbica. Se concluyó que se podrían obtener altos rendimientos de metano de 0,25 a 0,30 L CH<sub>4</sub>/g VS<sub>alimentado</sub> al operar a concentraciones de amoníaco entre 0 a 500 mg NH<sub>3</sub>-N/L y con HRT menores a 23 días. El rendimiento promedio de metano fue de 0,218 L CH<sub>4</sub>/g VS<sub>alimentado</sub>.

En el **Capítulo 2** se evaluó la eficiencia de un sistema de digestión anaeróbica (ADS) enfocado en tratar altas concentraciones de sustrato (10,09 a 35,25 g VS/L) con bajos HRT, menores a 10 d. Se obtuvieron rendimientos de metano de 0,22 L CH<sub>4</sub>/g VS<sub>alimentado</sub> con HRT de 3,38 a 4,66 d y a concentraciones de amoníaco entre 323 a 460 mg NH<sub>3</sub>-N/L.

En el **Capítulo 3** se estudió cómo mejorar la eliminación de nitrógeno en un reactor SNAD continuo. Se estudió la cinética aparente del proceso de manera global y simplificada, usando el modelo de inhibición de Haldane y se analizó el efecto de la concentración TAN del afluente y el efecto del HRT sobre el desempeño del reactor. El análisis de la cinética aparente demostró la alta sensibilidad del proceso a la concentración de amoníaco en el medio, con una constante de inhibición por amoníaco,  $K'_{I,NH_3}$ , igual a 19 mg NH<sub>3</sub>-N/L. Se obtuvo una concentración promedio óptima de amoníaco igual a 3,2 mg NH<sub>3</sub>-N/L, con la que se obtuvo una velocidad de remoción de nitrógeno promedio de 483 mg N/ L d. Del análisis de desempeño, se determinaron los rangos de operación seguros y riesgosos para una operación industrial. El rango de operación seguro, con una concentración de afluente menor o igual a 450 mg TAN/L y HRT entre 0,4 a 1,4, permite alta eliminación de nitrógeno (74 a 83%), soporta alta velocidad de carga nitrogenada (1,1 g N/L d) y demostró alta estabilidad en el

tiempo.

En el **Capítulo 4** se analizó la relación estequiométrica de sustrato requerida para el proceso SNAD y el efecto de la composición de la alimentación en un reactor SNAD semicontinuo alimentado con el efluente de la digestión anaeróbica del estiércol avícola con alta concentración de TAN (sobre 700 mg TAN/L). Se analizó el efecto de la razón de carbono inorgánico-nitrógeno (IC/N) y la razón de carbono orgánico-nitrógeno (TOC/N) sobre el desempeño del reactor SNAD. Se observó que la limitación de IC y/o TOC genera una disminución en la remoción de nitrógeno y un desequilibrio en la biomasa del proceso, en términos de actividad específica. En base a los resultados, se recomendó operar con razones de IC/N = 1,77 y TOC/N = 1,07 para mejorar la eliminación de nitrógeno en un reactor SNAD semi continuo alimentado con concentraciones sobre 700 mg TAN/L.

Finalmente, los resultados obtenidos permiten destacar viabilidad técnica del proceso estudiado, en condiciones de bajo HRT (3,38 a 4,66 d) y altas concentraciones de TAN alimentado (400 a 794 mg TAN/L) y definir rangos de operación seguros para el tratamiento a escala industrial. Estos hallazgos son fundamentales para la implementación y operación exitosa de procesos a escala industrial que busquen la generación de energía renovable, la eliminación eficiente de materia orgánica y de nitrógeno, sumado a la reducción del impacto ambiental que genera este tipo de residuos.