

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS POR DIGESTIÓN ANAEROBIA Y NITRIFICACIÓN – DENITRIFICACIÓN

* Mario José Lucero¹
Lorna Guerrero²

BIOLOGICAL TREATMENT OF AGRICULTURE SOLID WASTE BY ANAEROBIC DIGESTION AND NITRIFICATION - DENITRIFICATION

Recibido el 13 de marzo de 2020. Aceptado el 13 de enero de 2021

Abstract

The production of biogas from agricultural solid waste as a source of unconventional alternative energy, is an important topic, so that in this research the principal goal was analyzed the rate generation of biogas, using an initial substrate with a mixture of chicken manure in a 90% and Opuntia Ficus Indica in a 10%, and a temperature of 30 ° C. The process was developed according to test of anaerobic biodegradability. Subsequently, the residue from anaerobic digestion was subjected to nitrification - denitrification for biological nitrogen removal. The removal percentage of organic matter in anaerobic digestion was 43% and the rate of generation of methane gas was 15.8 L CH₄ / kg ST and a HRT of 90 days. In the process of nitrification - denitrification the removal rate of ammonia nitrogen was 54.7% with HRT of 46 days, although at this stage nitrification got 81% of ammonia nitrogen conversion to other forms of nitrogen was obtained ; removal efficiency is reduced because of the nitrate suffered amonificación and return to ammonia nitrogen mainly due to the high 52 C/N. This caused that some of the carbon would be submitted to the methanation process in turn enhancing the process amonification.

Keywords: agriculture solid wastes, anaerobic digestion, biogas, denitrification, nitrification.

¹ Universidad Católica de El Salvador, El Salvador.

² Universidad Técnica Federico Santa María, El Salvador.

* Autor correspondiente: Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Católica de El Salvador. Dirección Bypass a Metapán y calle antigua a San Salvador, Santa Ana, El Salvador. C.A. Email: luceroeli@gmail.com

Resumen

La producción de biogás a partir de residuos sólidos agrícola como fuente de energía alternativa no convencional es un tema importante, por lo que en la presente investigación se analizó la tasa de generación de biogás utilizando como sustrato inicial una mezcla de estiércol de gallina en una 90% y Opuntia Ficus Indica en una 10% y a una temperatura de 30 °C. El proceso se desarrolló acorde al ensayo de biodegradabilidad anaerobia. Posteriormente el residuo resultante de la digestión anaerobia se sometió al proceso de Nitrificación – Desnitrificación para la eliminación biológica del nitrógeno. El porcentaje de eliminación de materia orgánica en la digestión anaerobia fue del 43% y la tasa de generación de gas metano fue de 15.8 L CH₄/Kg ST con TD de 90 días. En el proceso de nitrificación – desnitrificación la tasa de eliminación de nitrógeno amoniacal fue de 54.7% con TD de 46 días, esto a pesar que en la etapa de nitrificación se obtuvo un 81% de conversión de nitrógeno amoniacal a otras formas de nitrógeno; la eficiencia de eliminación se redujo debido a que parte del nitrato sufrió amonificación y retorno a nitrógeno amoniacal debido principalmente a la alta relación C/N de 52. Esto provocó que parte del carbono presente se sometiese al proceso de metanización potenciando a su vez el proceso de amonificación.

Palabras clave: digestión anaerobia, residuos sólidos agrícolas, nitrificación, desnitrificación, biogás.

Introducción

El tratamiento de residuos sólidos agrícolas es muy importante para desarrollar una producción de alimentos más limpia, es por eso, que los referidos residuos pueden ser benéficos al medio ambiente en la generación de energías limpias y renovables como es el caso del biogás conocido como gas estufa. En ese sentido, el aprovechamiento energético del estiércol de gallina, ganado e otros animales adquiere mayor relevancia en el desenvolvimiento de tecnologías que permitan una aplicación más simple, que de tratamiento a los residuos y a su vez potencia la generación de biogás. Esto como parte de una gestión integral de los residuos sólidos producidos. (Tchobanoglous, 1994)

Jensen *et al.*, (2010), plantea que el aprovechamiento energético de residuos sólidos como lo son los residuos agrícolas puede desarrollarse en diversas formas como lo es la digestión anaerobia, combustión, bioetanol entre otros; cada uno de ellos posee ventajas y desventajas tanto el proceso mismo como en el tipo de tecnología para su realización disponible. Entre otras ventajas se encuentra la simplicidad con que el mismo se desarrolla, lo que hace sea atractivo; Así como su versatilidad de producir una fuente de energía alternativa limpia.

La digestión anaerobia es el proceso bajo el cual se genera el biogás y a su vez se digiere la materia orgánica presente. Esta consiste en la digestión anaerobia de la materia orgánica por microorganismos bajo condiciones anaerobias. Este proceso se desarrolla en cuatro etapas: hidrólisis, fermentación, acetogénesis y metanogénesis. (Chernicharo, 1997). El proceso se inicia por la reducción de orgánicos complejos (carbohidratos, proteínas y lípidos) a orgánicos

monoméricos (azúcares, aminoácidos y péptidos), posteriormente los monómeros se convierten en ácidos grasos, parte de lo cual se transforma en hidrógeno y acetato, para finalmente convertir el acetato e hidrógeno en metano.

La digestión anaerobia ha sido estudiada por muchos autores como lo demuestra Gunaseelan (1997), analizando los diversos tipos de biomasa utilizada para la generación de biogás; así también

Muhammad *et al.*, (2012), recopilaron información de diversas investigaciones de digestión anaerobia con diversos tipos de residuos orgánicos a los cuales puede ser aplicada la digestión anaerobia como lo son los residuos sólidos municipales, residuos de frutas entre otros; utilizando diversos tipos de reactores, por ejemplo, reactores en lotes o discontinuos, reactores agitados continuos.

La codigestión de digestión de residuos contribuye en la mejora de la tasa de generación de biogás como lo expresa Pagés-Díaz *et al.*, (2019). Esto dado la combinación mejorar la relación C/N de la mezcla propiciando una mejor eficiencia de generación de biogás y de digestión de los residuos. Así mismo, Marin-Batista *et al.*, (2016) encontró que la codigestión de residuos de estiércol con vinaza incrementó la capacidad búfer reduciendo el riesgo de acidificación e incrementando la tasa de generación de biogás en un 55%. La presente investigación tiene el objetivo de analizar la factibilidad de la codigestión de residuos para una planta de generación de biogás de una industria huevos.

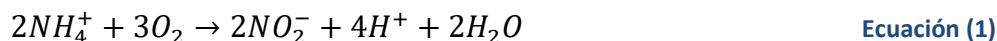
El residuo producto de digestión anaerobia puede ser utilizado, con previo tratamiento como mejorador de suelos a través del proceso de compostaje. Pero si la pretensión es disponerlo de forma adecuada aun precisa de un tratamiento para la remoción del nitrógeno presente, por lo cual eso puede realizarse por nitrificación – desnitrificación.

El proceso de nitrificación – desnitrificación es un tipo de tratamiento biológico en etapas (aerobia –anóxica), en el cual el objetivo es potenciar las bacterias nitrificantes en la parte aerobia, y así pasar el nitrógeno amoniacal NH_3^+ a nitrito NO_2^- y después de nitrito NO_2^- a nitrato NO_3^- ; posteriormente en la etapa anaerobia se pretende potenciar las bacterias desnitrificantes para pasar el nitrato a nitrógeno gas N_2 .

La remoción de amonio se realiza en dos etapas: La nitrificación por autótrofos en forma aerobia y la desnitrificación por heterótrofos en forma anaerobia (Chen y Ni, 2011). Los organismos autótrofos responsables por la nitrificación son las Nitrosomonas, en el proceso denominado nitrificación, y las Nitrobacter, en el proceso llamado nitratación (Ferreira, 2000). La estequiometría del proceso de nitrificación – desnitrificación se presenta en la ecuación 1 y 2 (nitrificación), y desnitrificación ecuación 3.

Nitrificación:

Nitroso-bacteria



Nitro-bacteria

**Desnitrificación:**

El proceso de nitrificación – desnitrificación es uno de los más usados para la remoción de nitrógeno en aguas. (Ada *et al.*, 2009). El mismo puede ser realizado en separado o en un único tanque, cuyo fundamento esencial es el ciclo del nitrógeno. La eliminación biológica de nitrógeno es una de las formas más económicas que existen, eso de acuerdo a Cuevas-Rodríguez y Tejero, (2004). Dado que se basa primordialmente en la generación de condiciones adecuadas para lo microorganismos encargados del proceso.

Los objetivos de la presente investigación son: Determinar la tasa de generación de gas metano mediante la digestión anaerobia de la mezcla de estiércol de gallina y OFI. Así también determinar la tasa de eliminación de nitrógeno amoniacal mediante el proceso de nitrificación – desnitrificación.

Materiales y métodos

La planificación experimental de la investigación (Figura 1) se desarrolló en 2 etapas:

1. Digestión anaerobia: En esta etapa el objetivo principal es la digestión de materia orgánica por los microorganismos mediante el ensayo de biodegradabilidad anaerobia (Guerrero y Alkalay, 1996) y por ende generar biogás en el proceso. El substrato utilizado es una mezcla de estiércol de gallina y Opuntia Ficus Indica, OFI.
2. Nitrificación – Desnitrificación: La etapa siguiente es el proceso de nitrificación – desnitrificación, en el cual el residuo final de la AD es tratado para eliminar el nitrógeno amoniacal presente. En la Figura 1 se muestra el esquema del desarrollo experimental

Características del residuo a tratar

El substrato introducido en la digestión anaerobia es una mezcla de estiércol de gallina en un 90% e OFI en un 10%; realizada a una temperatura 30 °C. Los porcentajes de cada residuo se adoptaron con el objetivo de que la OFI sea un mejorador del proceso. Los parámetros de caracterización del estiércol y OFI se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Caracterización del estiércol y OFI

Parámetro	Concentración	
	Estiércol de gallina (%w/w)	OFI (%w/w)
Sólidos totales	41.8 %	31.0 %
Sólidos volátiles	5.76 %	13.4 %
Carbono orgánico	29.5 %	29.1 %
Nitrógeno total	9.50 %	2.84 %
Nitrógeno NTK	8.46 %	1.11 %
Nitrógeno amoniacal	1.04 %	1.73 %
Fósforo total	3.66 %	0.176 %
Sulfatos	0.482 %	1.27 %

Las características de la mezcla se presentan en la tabla 2. Ambos residuos fueron triturados previamente a través de un procesador de alimentos para homogenizar los mismos.

Tabla 2. Características de mezcla de estiércol (90%) y OFI (10%)

Parámetro	Concentración	Unidad
Sólidos Totales	0.4837	g/g
Sólidos Totales Volátiles	0.3142	g/g
Nitrógeno NTK	36176	mg/L
Fosforo	21068	mg/L
pH	7.0	

El residuo tratado en la AD fue sometido al proceso de nitrificación – desnitrificación para lo cual el residuo resultante fue diluido con un 55% de agua (45% digestato). El objetivo de diluir fue mejorar el contacto de la materia orgánica y microorganismos y a su vez reducir la carga orgánica.

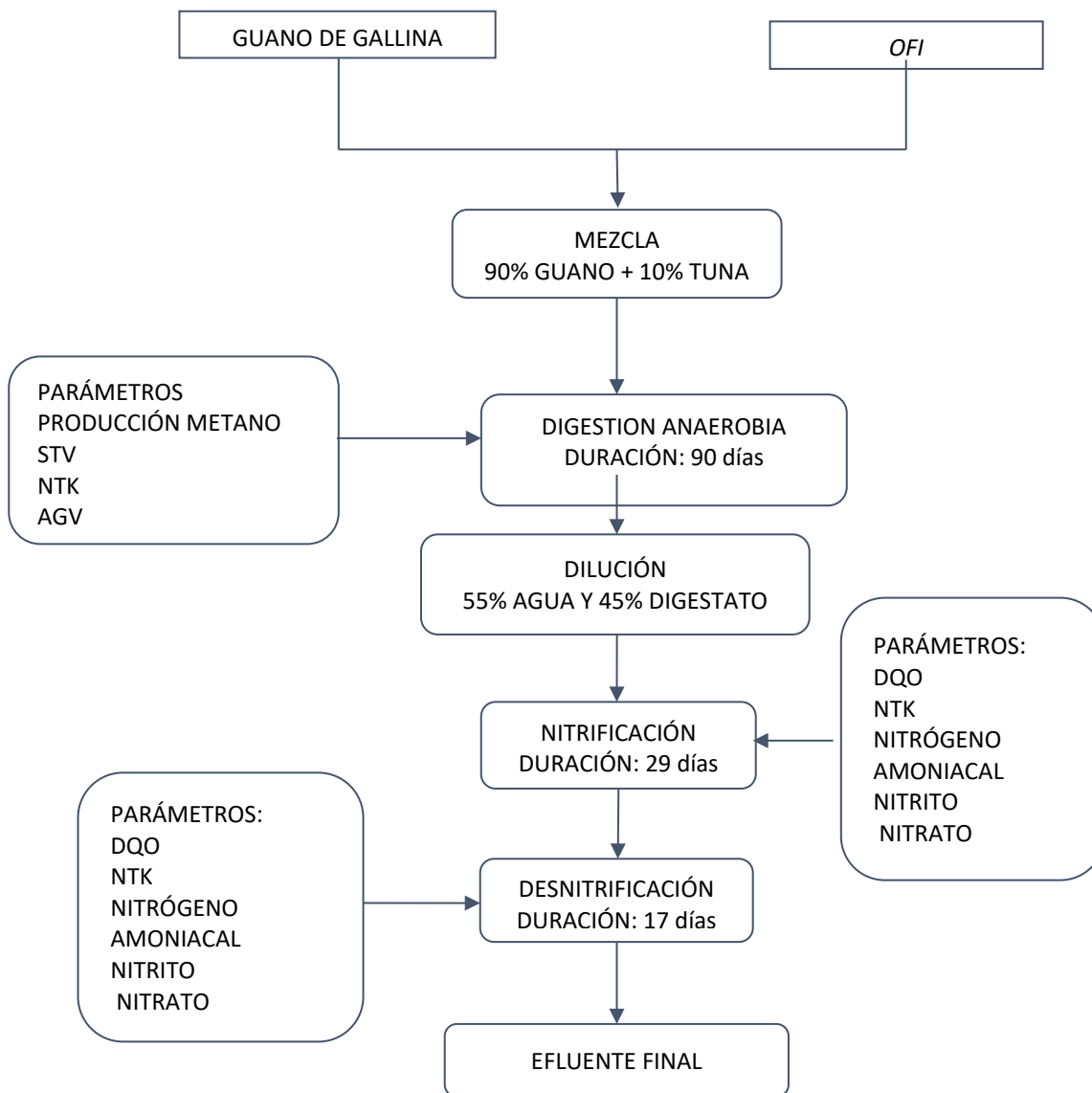


Figura 1. Esquema desarrollo experimental.

Digestión Anaerobia

Características del inóculo

El inóculo utilizado en el ensayo de biodegradabilidad anaerobia fue obtenido de un reactor UASB de una industria de tabaco; la concentración de microorganismos en los reactores fue de 3 g/L. Las principales características de inóculo son: Sólidos Totales, 69350 mg/L, Sólidos Suspendidos Totales, 51600 mg/L y Sólidos en Suspensión Volátiles, 40400 mg/L.

Metodología del ensayo de Biodegradabilidad Anaerobia

La metodología se basó en el ensayo de biodegradabilidad anaerobia utilizando reactores *batch*; este permite determinar la tasa de digestión de materia orgánica por lo microorganismos, cuyo proceso metabólico produce biogás. El ensayo fue realizado con microorganismos anaerobios en una concentración de 3 g/L y en forma duplicada cada reactor, 2 reactores con residuos y 2 blancos a una temperatura de 30°C. El residuo con los microorganismos se introdujo en los frascos de 250 ml, el cual se sellaba con un corcho y silicón, dejando 1 tubo para el flujo de biogás hacia el frasco invertido con NaOH. El CO₂ se neutralizaba con la soda y el metano se medía por desplazamiento de líquido.

Los materiales usados fueron: 4 mini reactores de 250 ml, baño maría, frascos de vidrio con NaOH 2.5%, probetas de medición de líquido desplazado. Los parámetros de control y su periodicidad del ensayo se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de control del ensayo de biodegradabilidad anaerobia

	Parámetro	Periodicidad
Reactor	ST	Inicio y final
	STV	Inicio y final
	Nitrógeno Total	Inicio y final
	Fósforo	Inicio y final
	Ácidos grasos volátiles	1 vez
Biogás	Caudal de metano	Diario
	Composición biogás	2 veces en total

Nitrificación – desnitrificación

Características del inóculo

En la etapa de nitrificación el inóculo usado fue a partir de un sistema de lodo activado; la concentración de microorganismos en los reactores fue de 3 g/L. Las características del inóculo son: Sólidos Totales 30450 mg/L, Sólidos Suspendidos Totales 15770 mg/L, Sólidos en Suspensión Volátiles 11730 mg/L, DQO_{TOTAL} 8500 mg/L y pH 7.1.

En la etapa de desnitrificación el inóculo usado fue obtenido de un reactor UASB; la concentración de microorganismos en los reactores fue de 3 g/L. Sólidos Totales 76480 mg/L, Sólidos Suspendidos Totales 68050 mg/L, Sólidos en Suspensión Volátiles 21950 mg/L, DQO_{TOTAL} 23040 mg/L e pH 7.1.

Metodología del ensayo de Nitrificación - Desnitrificación

La nitrificación biológica consiste en un ensayo aerobio con reactores *batch* con el residuo e inóculo, en duplicado junto a sus respectivos blancos. El ensayo fue realizado a temperatura ambiente, cercana a los 22°C. El proceso de aireación fue suministrado por una bomba de acuario de 2100 ml/min de aire y una presión de 4 psi., para lo cual fueron utilizados reactores de 500 ml. Los frascos se colocaron de forma invertida con la entrada del aireador al fondo del mismo. Estos se cortaron en su parte del fondo para ser abiertos a la atmósfera con una malla para prevenir la entrada de insectos. El residuo se diluyó para mejorar la termodinámica del proceso.

El proceso de desnitrificación fue realizado en condición anóxica en forma similar al ensayo de biodegradabilidad anaerobia. El proceso se desarrolló a una temperatura de 37°C; el objetivo principal del ensayo es convertir el nitrato en nitrógeno gaseoso. Los parámetros de control de la etapa de nitrificación se muestran en la Tabla 4 y para la etapa de desnitrificación se presentan en la Tabla 5.

Tabla 4. Parámetros de control del ensayo de nitrificación

	Parámetro	Periodicidad
	Nitrógeno Total	Inicio y final
	Fósforo Total	Inicio y final
	DQO _{TOTAL}	3 veces por semana
	DQO _{SOLUBLE}	3 veces por semana
Reactor	SST	3 veces por semana
	SSV	3 veces por semana
	pH	3 veces por semana
	NO ₃ ⁻	1 vez por semana
	NO ₂ ⁻	1 vez por semana
	Nitrógeno amoniacal	1 vez por semana

Tabla 5. Parámetros de control de la etapa de desnitrificación

	Parámetro	Periodicidad
	Nitrógeno Total	Inicio y final
	Fosforo Total	Inicio y final
	DQO _{TOTAL}	3 veces por semana
	DQO _{SOLUBLE}	3 veces por semana
Reactor	SST	3 veces por semana
	SSV	3 veces por semana
	pH	3 veces por semana
	NO ₃ ⁻	1 vez por semana
	NO ₂ ⁻	1 vez por semana
	Nitrógeno amoniacal	1 vez por semana
Gas	Caudal	Diario

Resultados e discusión

Digestión anaerobia

Los resultados obtenidos del ensayo de biodegradabilidad anaerobia se presentan a continuación:

Materia orgánica

La materia orgánica se determinó a través de los Sólidos Totales Volátiles (STV), obteniendo el porcentaje de eliminación de la misma en el ensayo. Los resultados se muestran en la tabla 6. La eliminación de ST fue de 38.3% y 28.3%, en promedio fue de 33.8%. El porcentaje de eliminación de SV fue de 57% y 40%, en promedio fue 46.4% en promedio, a una temperatura de 30 C.

Tabla 6. Sólidos Totales e Sólidos Totales Volátiles de la digestión anaerobia y porcentaje de eliminación de materia volátil.

Reactor	Concentración (g /g mistura)			% Eliminación
	Inicial	T=0 días	T=90 días	
ST				
1	0.4706	0.5847	0.3578	
2		0.5259	0.3769	
STV (g SV/g mistura)				
1	0.1633	0.3577	0.1598	57%
2		0.3768	0.1770	40%

Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)

El nitrógeno NTK presente en los residuos mostrado en la Tabla 7 denota una reducción de la concentración, iniciando en 36176 mg/L llegando a 24827 mg/L con una disminución del 31.4%. En cuanto al fósforo la concentración inicial fue de 21068 mg/L llegando a 14570 mg/L, eliminando un 31%.

Tabla 7. Nitrógeno NTK e fósforo total de la mezcla inicial

Parámetro	Concentración (mg/L)	
	T = 0 días	T = 90 días
Nitrógeno NTK	36176	24827
Fosforo	21068	14570

Generación de gas metano CH₄

El método de captación de gas metano fue un dispositivo de desplazamiento de NaOH en un 2.5% en agua, con amarillo de metilo como indicador de CO₂, por tanto, la medición obtenida en la probeta es directamente del gas metano. La tasa de generación de gas metano del ensayo de biodegradabilidad anaerobia con Tiempo de Detención, (TD) de 90 días se presenta en la Figura 2.

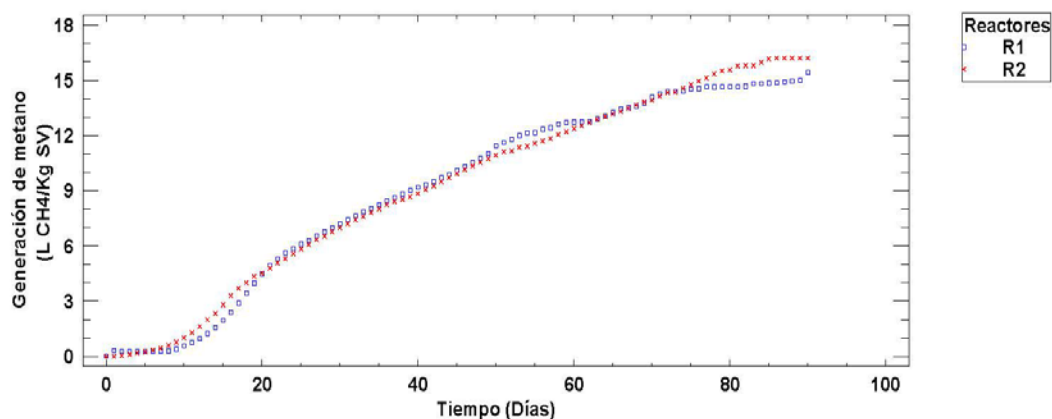


Figura 2. Generación de gas metano por kg SV en el ensayo de biodegradabilidad anaerobia.

Nitrificación – Desnitrificación

Las características iniciales y finales de cada etapa del proceso de nitrificación – desnitrificación se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Características inicial y final de las etapas de nitrificación y desnitrificación

Parámetro	Etapa		Etapa		Unidad
	Nitrificación		Desnitrificación		
	Inicial	Final	Inicial	Final	
DQOtotal	104000	59091	61091	51709	mg/L
DQO soluble	16000	3244	3909	3244	mg/L
Sólidos Totales	415	273	273		g/L
Sólidos Totales Volátiles	244	231	231		g/L
Sólidos Suspensos	77.27	11.0	11.0	8.4	g/L
Fósforo Total	22109	14884	14884	5309	mg/L
Nitrógeno NTK	20313	9367	9367	3751	mg/L
Nitrógeno Amoniacal	1536	205	205	764	mg/L
Nitrito	164	216	216	57	mg/L
Nitrato	655	1307	1307	319	mg/L
pH	7	7.5	7.5	7.4	

La DQO en ambas etapas denota una reducción no siendo el objetivo su eliminación, pero debido a las altas concentraciones propiciaron la reducción. Los compuestos nitrogenados tuvieron una reducción importante, el nitrógeno amoniacal se redujo en un 51% y el nitrógeno Kjeldahl se redujo en un 81%, el fósforo se eliminó en 76%.

Compuestos de Nitrógeno

El comportamiento del nitrógeno NTK inicial y final en el proceso de nitrificación – desnitrificación se presenta en la Tabla 11. La tasa de eliminación de nitrógeno NTK en la etapa de nitrificación fue de 54% y en la etapa de desnitrificación fue de 60%; en total se obtuvo una eliminación del 81%.

Tabla 11. Concentración de Nitrógeno NTK

Parámetro	Etapas de Nitrificación	Etapas de Desnitrificación	Unidad
Inicial	20313	9367	mg/L
Final	9367	3751	mg/L

En la Figura 3 se observa el comportamiento del amonio, nitrito y nitrato en la etapa de nitrificación. El nitrógeno amoniacal inició en 1536 mg/L disminuyen a 205 mg/L; el nitrito inició en 164 subiendo hasta 800 mg/L y posteriormente bajando a 216 mg/L; el nitrato inició en 655 mg/L subiendo hasta 1307 mg/L. En la Figura 4 se muestra el comportamiento del amonio, nitrato y nitrito en la etapa de desnitrificación, denotando una tendencia del nitrógeno amoniacal a incrementar su concentración de 205 mg/L a 764 mg/L. Se deduce que parte del nitrato fue convertido en amonio, proceso denominado amonificación. El nitrito bajó de 216 mg/L a 57 mg/L; el nitrato inició en 1307 y llegó a 319 mg/L.

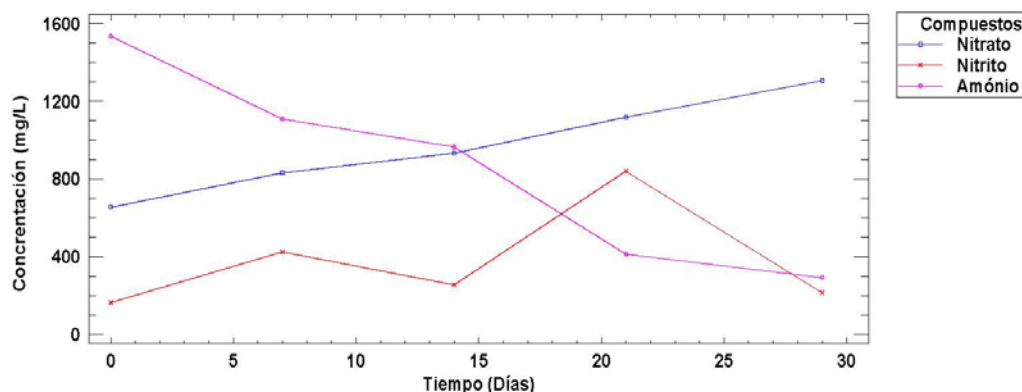


Figura 3. Comportamiento de amonio, nitrato y nitrito en la etapa nitrificación

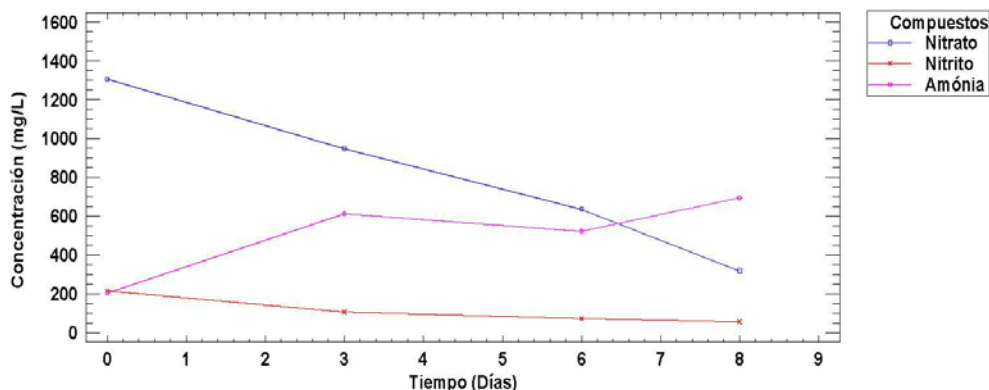


Figura 4. Comportamiento de amonio, nitrato y nitrito en la etapa de desnitrificación

Materia orgánica

El comportamiento de la materia orgánica analizada como DQO se presenta en la Figura 5 para la etapa de nitrificación y Figura 6 para la etapa de desnitrificación. En ella se observa que la eliminación de materia orgánica fue mayor los primeros días hasta el día 9, después se mantuvo estable.

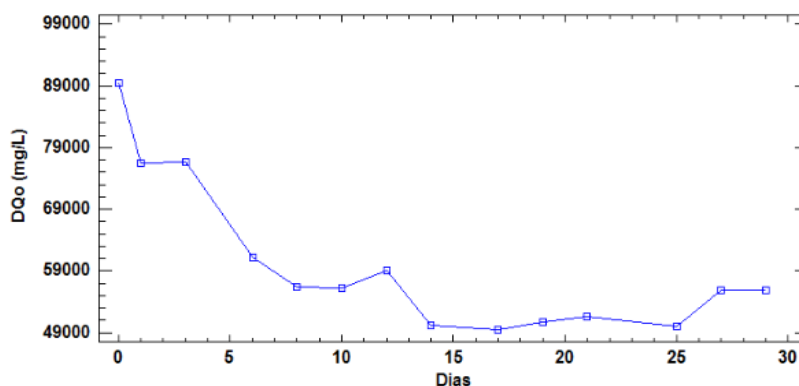


Figura 5. Comportamiento de materia orgánica en la etapa de nitrificación.

En general la tasa de eliminación fue de 44%. La relación C/N del proceso fue 5.2 sugiriéndose que no sea mayor de 5 para estimular los microorganismos nitrificantes, dado que si la carga orgánica es alta y por ende la relación C/N es mayor a 5 causa que la nitrificación disminuya y se incremente la competencia entre microorganismos heterótrofos y nitrificantes. Para la etapa de desnitrificación la relación C/N fue de 6.5, valor arriba del rango que propicie la conversión de nitrato en nitrógeno gas.

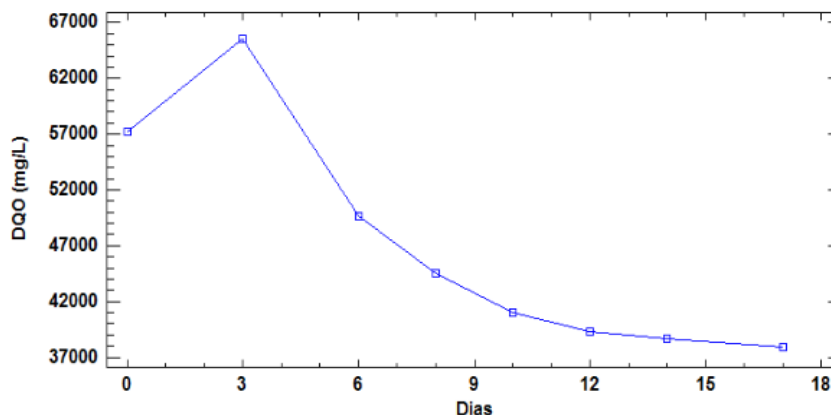


Figura 6. Comportamiento de la materia orgánica en la etapa de desnitrificación.

En la Figura 6 se presenta el comportamiento de la materia orgánica en la fase de desnitrificación. En ella se muestra que hasta el día 6 la eliminación fue más fuerte y posteriormente se estabilizó. El porcentaje de eliminación fue de 43.1%.

Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)

El comportamiento de los SSV en la etapa de nitrificación se muestra en la Figura 7 y para la etapa de desnitrificación se muestra en la Figura 8. En la Figura 7 se denota que la tendencia inicial de la concentración de microorganismo se incrementó del día 1 al 4, posteriormente baja levemente para estabilizarse hasta el día 11, luego su concentración descendió drásticamente, hasta estabilizarse coincidiendo con la baja de materia orgánica en el día 14.

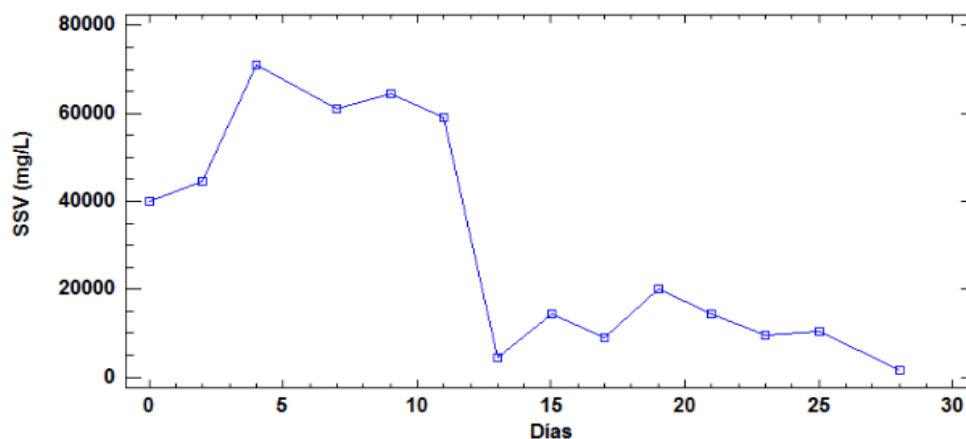


Figura 7. Sólidos Suspendidos Volátiles (Nitrificación)

En la Figura 7 se observa la adaptación de los microorganismos a su entorno creciendo en forma exponencial hasta el día 5. Después pasan a una etapa estable para posteriormente decrecer. De la misma forma en la Figura 8 para la fase desnitrificación.

En la Figura 8 se observa un incremento en la concentración de microorganismos hasta el día 4, posteriormente su tendencia es a estabilizarse y mantenerse en torno a los 10,000 mg/L.

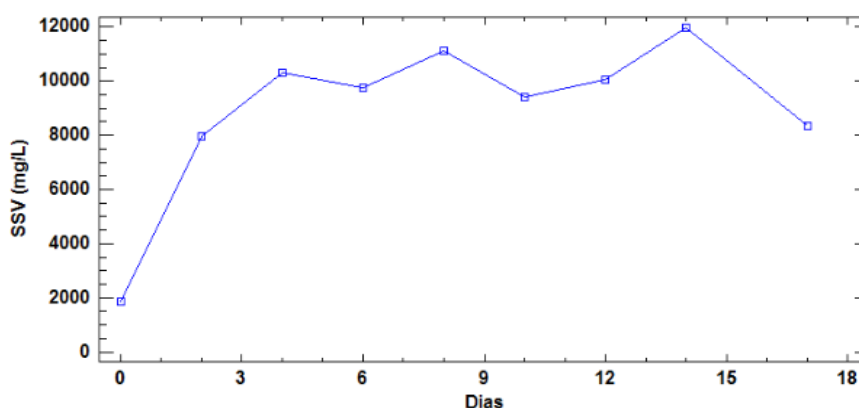


Figura 8. Sólidos Suspensos Volátiles (Desnitrificación)

pH

El comportamiento del pH durante las etapas de nitrificación y desnitrificación se presenta en las Figuras 9 y 10 respectivamente.

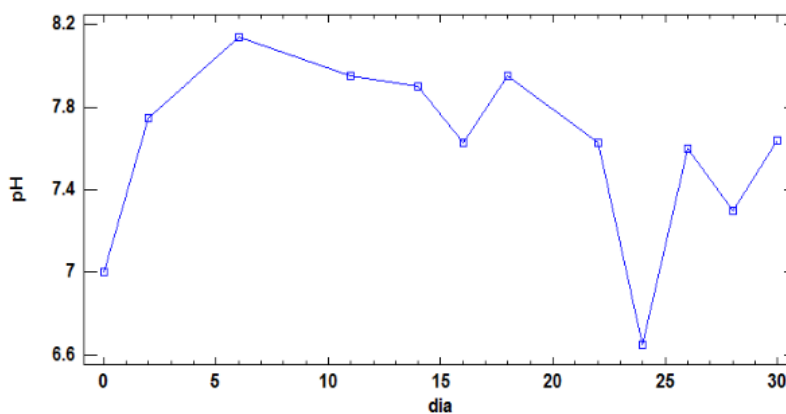


Figura 9. pH (Nitrificación).

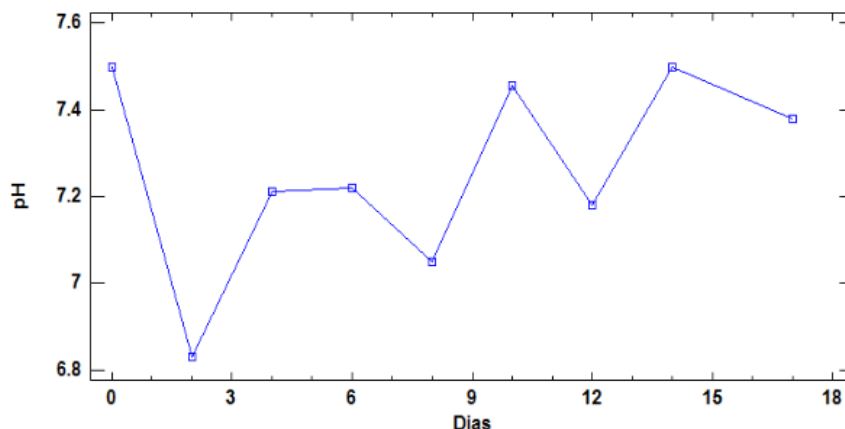


Figura 10. pH (Desnitrificación)

El comportamiento del pH en la fase de nitrificación se observa en la Figura 9, cuyo rango osciló entre 6.5 y 8.1 en promedio. El rango recomendado es entre 7 y 8.5, por lo que se mantuvo en el rango sugerido. En la etapa de desnitrificación el pH se comportó de acuerdo a la tendencia de la Figura 10, el cual osciló entre 7 y 7.6, cuyo rango recomendado es entre 7 y 8.

En la Figura 11 se presentan de forma esquemática los principales resultados de la digestión anaerobia. El porcentaje de eliminación de materia orgánica medida como SV fue de 46.4% en promedio, resultado bajo comparado a lo planteado en la literatura el cual teóricamente se obtendría a una temperatura de 30°C un porcentaje de eliminación del 71%. (Montalvo y Guerrero, 2003). Esto es un 24.6% más bajo de los esperado, lo cual pues ser explicado por el efecto de inhibición de algunas sustancias presentes en el residuo como es el nitrógeno amoniacal o la relación adoptada entre sustrato y microorganismos. El nitrógeno NTK presente en los residuos denota una reducción del 31.4%, eso en concordancia con Tchobanoglous, (2003) que plantea que en procesos biológicos por asimilación bacteriana se da una eliminación de nitrógeno que oscila entre 30% y 70%. El porcentaje se encuentra en la parte baja del rango. La concentración final de nitrógeno amoniacal fue de 1878 mg/L.

La generación de metano fue lenta durante todo el desarrollo del ensayo, lo que puede ser asociado a sustancias inhibitoras de la digestión (Wang, 2013). La producción total de gas en m³ fue de 0.012 m³ CH₄/Kg mezcla; teóricamente de acuerdo a literatura se puede obtener 0.06 m³ de biogás/Kg excreta, de lo cual el gas metano corresponde a un 50% – 80% Weiland (2010). Por tanto, se puede esperar una generación de gas metano de 0.039 CH₄/Kg excreta. Para estiércol de vacuno Chamy y Ramos (2008) recopilaron datos de generación de metano entre 0.01 a 0.06 L CH₄/g SV. La composición del biogás producido fue de 61% gas metano (CH₄) y 39% de dióxido de carbono (CO₂).

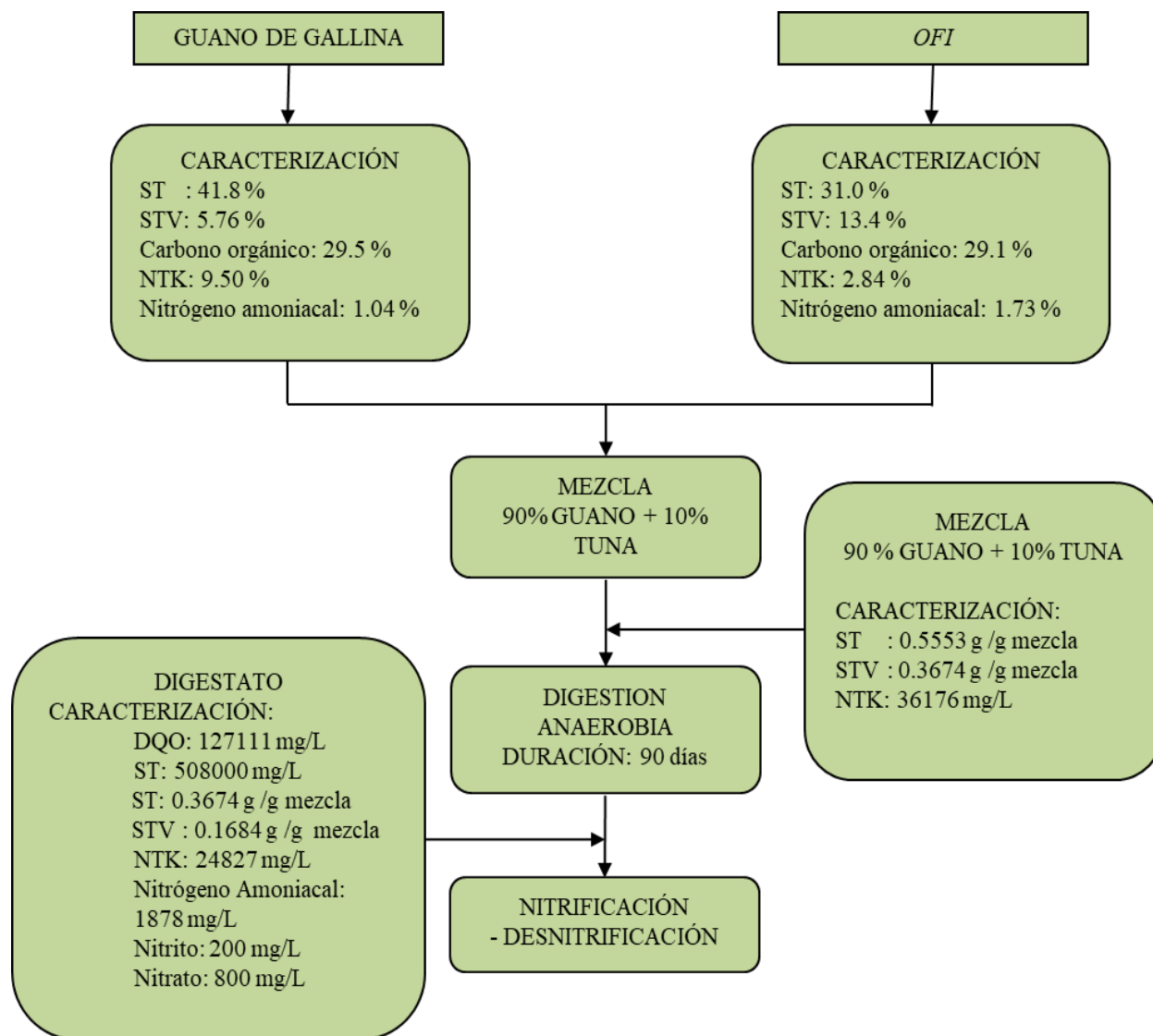


Figura 11. Esquema del desarrollo experimental con los principales resultados de la etapa de digestión anaerobia.

En la figura 12 se presentan de forma esquemática los principales resultados de la etapa de nitrificación – desnitrificación. El objetivo principal de la etapa de desnitrificación es transformar el nitrato generado en la etapa de nitrificación a nitrógeno gas. Pero, el nitrato presente puede sufrir amonificación por microorganismos productores por absorción, el cual sirve de alimento para consumidores retornando el nitrato a amonio. La eficiencia del proceso de desnitrificación fue de 38.05% y el proceso de amonificación fue de 58.2% con TD de 17 días.

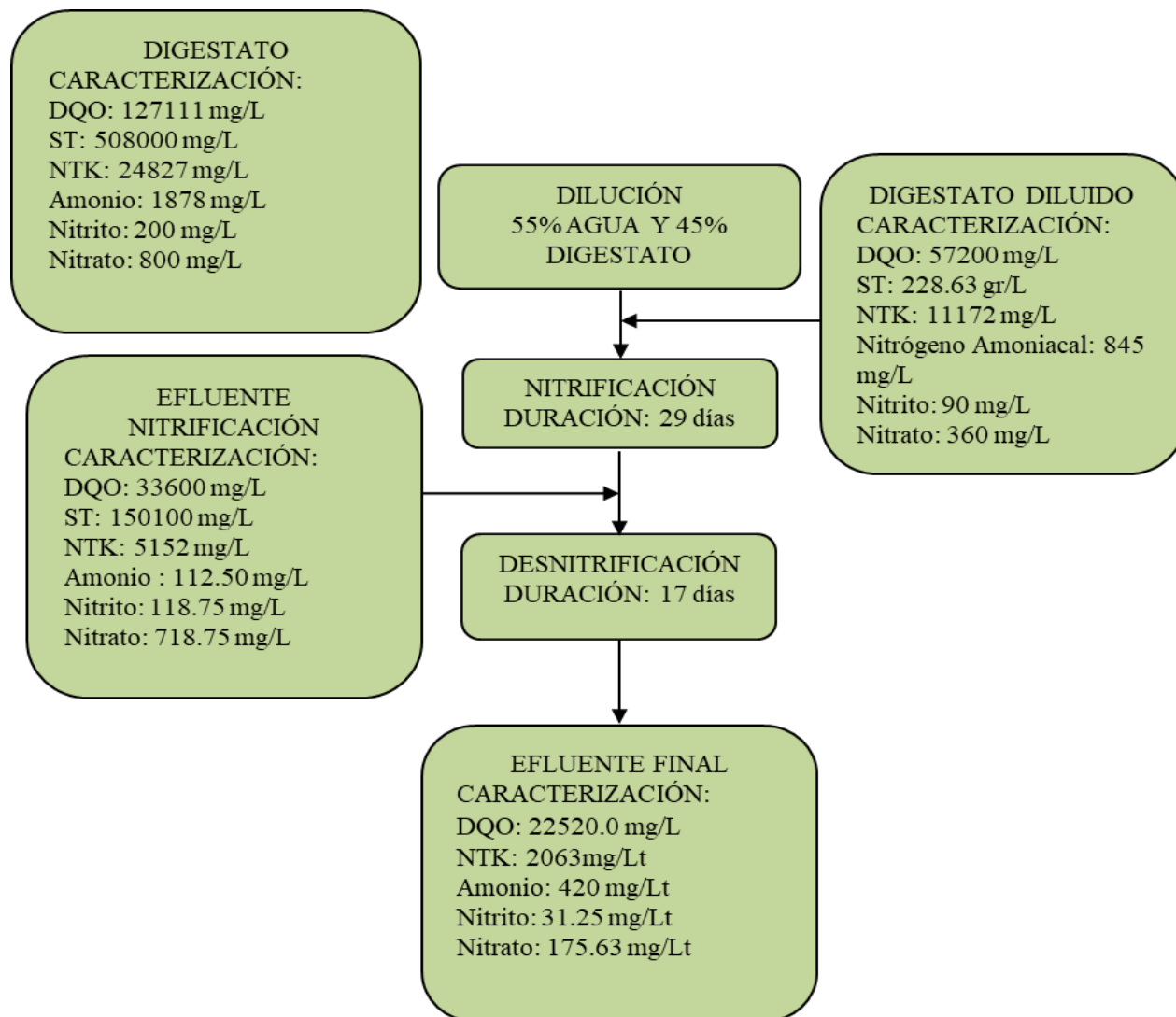


Figura 12. Esquema resumen con los principales resultados de la etapa de nitrificación – desnitrificación.

Al comparar los datos de nitrógeno NTK y los de nitrato se observa que el nitrógeno NTK es mayor a los de nitrato, eso indica que parte del nitrógeno NTK fue asimilado por la biomasa o sufrió desnitrificación y fue transformado a nitrógeno gas. (Grady *et al.*, 1999; Tchobanoglous. 2003; Di laconio *et al.*, 2004; Ferrara de Giner y A. Ramírez. 2010). En la etapa de nitrificación el porcentaje de conversión de nitrógeno amoniacal en nitrato fue de 52.5%. La conversión de amonio a otras formas de nitrógeno fue de 81%. Di laconio *et al.*, (2004), encontró valores entre 50.5 e 93% de conversión de nitrógeno amoniacal a otras formas de nitrógeno de acuerdo a la carga orgánica.

La relación C/N en la etapa de nitrificación fue de 5.2 y el valor recomendado está entre 4 y 5 para obtener velocidades altas de desnitrificación. Denotando que el nitrógeno amoniacal bajó 86.6% y el nitrato subió en un 199%. En cuanto a la etapa de desnitrificación la relación C/N fue de 6.5, valor superior al rango recomendado de 5.

La relación DQO/Nitrato fue de 46.7 para la etapa de desnitrificación, de acuerdo a Chamy *et al.*, (1996) cuando a relación oscila entre 8.86 y 53 se propicia a actividad de desnitrificación como la metanización, pues el carbono en exceso se metaniza; la tasa de generación de metano generado fue de 96.89 L CH₄ / Kg DQO.

El proceso global de nitrificación – desnitrificación se obtuvo una eliminación de materia orgánica de 50% aunque el objetivo principal no era eliminar materia orgánica, pero debido al tipo de microorganismos utilizados y la relación C/N se propició su digestión. La eliminación de nitrógeno NTK fue de 81% y la eliminación de nitrógeno amoniacal fue del 51% en todo el proceso.

Conclusiones

En la digestión anaerobia el porcentaje de eliminación de materia orgánica y por ende la producción de biogás no fue satisfactoria en comparación a datos de producción teóricos encontrado en bibliografía. por lo cual se puede inferir que el mismo tuvo interferencia de sustancias inhibitorias como lo es el nitrógeno amoniacal, dado que ambos componentes del sustrato de la AD lo contienen. En cuanto a nutrientes del proceso en conjunto se obtuvo una eliminación total de 90% del nitrógeno NTK y de fosforo un 75%.

En el proceso de nitrificación – desnitrificación se eliminó un 55% a pesar que en la etapa de desnitrificación parte del nitrato se amonificó potenciando la metanización de la materia orgánica debido a lata relación C/N.

Referencias

- Adav, S., Lee, D., Lai, J. (2009) Biological nitrification-denitrification with alternating oxic and anoxic operations using aerobic granules. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **84**(6), 1181-1189. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2129-y>
- Chamy, R., Aroca, G., Ruiz, G. (1996) Desarrollo de un Sistema Biológico para la eliminación de Nitrógeno de los residuos Industriales Líquidos: Nitrificación-Desnitrificación. *XII Congreso Nacional de Ingeniería Química*. Viña del Mar. Chile.
- Chamy, R., Ramos, C. (2008) Biometanización de estiércol. *XXXI Congreso Interamericano AIDIS*. Santiago, Chile.
- Chen, Q., Ni, J. (2011) Heterotrophic nitrification-aerobic denitrification by novel isolated bacteria. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, **38**(9), 1305-1310 pp. <https://doi.org/10.1007/s10295-010-0911-6>
- Chernicharo, C. (1997) *Reactores anaeróbicos Vol. 5*, Universidade Federal de Minas Gerais. Brasil. 380. pp.

- Cuevas-Rodríguez, G., Tejero, I. (2004) Nitrificación y desnitrificación en un reactor biopelícula de lecho sumergido fijo y membranas de microfiltración. *29th Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. San Juan, Puerto Rico.
- Di Iaconi, C., Bonenmazzi F., López, A., Ramador, R. (2004) Integration of chemical and biological oxidation in a SBBR for tannery wastewater treatment. *Water Science & Technology*, **50**(10), 107-114. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0621>
- Ferrara de Giner, G. Ramírez, A. (2010) Influencia de la relación C/N en la remoción de nitrógeno usando un sistema combinado de reactores por carga secuencial. *Revista de la facultad de ingeniería Universidad Central de Venezuela*, **25**(4), 41-51. Acceso en 22 de abril de 2020, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652010000400005&lng=es&tlng=es
- Ferreira, E. (2000) Cinética química e fundamentos dos processos de nitrificação e denitrificação biológica. *XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Rio Grande do Sul. Brasil.
- Grady, L., Daigger, G., Lim, H. (1999) *Biological Wastewater Treatment* (2ª. Ed.) Marcel Dekker. Inc., New York. 1076 pp.
- Guerrero, L., Alkalay, D. (1996) Tratamiento de residuos líquidos de una fábrica de galletas. *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. México. D.F.
- Gunaseelan, V. (1997) Anaerobic digestion of biomass for methane production: a review. *Biomass and bioenergy*, **13**(1-2), 83-114. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)00020-2)
- Jensen, J., Felby, C., Jørgensen, H., Rønsch, G., Nørholm, N. (2010) Enzymatic processing of municipal solid waste. *Waste management*, **30**(12), 2497-2503. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.07.009>
- Marin-Batista, José; Salazar, Luis; Castro, Liliana; Escalante, Humberto. (2016) Co-digestión anaerobia de vinaza y gallinaza de jaula: alternativa para el manejo de residuos agrícolas colombianos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, **18**(2), 6-12 pp. 10.15446/rev.colomb.biote.v18n2.53853
- Montalvo, S., Guerrero, L. (2003) *Tratamiento anaerobio de residuos. Producción de biogás*. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, 416 pp.
- Muhammad Nasir, I., Mohd Ghazi, T., Omar, R. (2012) Production of biogas from solid organic wastes through anaerobic digestion: a review. *Applied microbiology and biotechnology*, **95**(2), 321-329 pp. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4152-7>
- Tchobanoglous, G., Burton, F., Stensel H. (2003) *Wastewater engineering: treatment and reuse*. (4ª ed.) McGraw-Hill, New York, 1848 pp.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. (1994) *Gestión integral de residuos sólidos Vol. 1*. McGraw-Hill, Madrid, 607 pp.
- Wan, S., Sun, L., Douieb, Y., Sun, J., Luo, W. (2013) Anaerobic digestion of municipal solid waste composed of food waste, wastepaper, and plastic in a single-stage system: Performance and microbial community structure characterization. *Bioresource technology*, **146**, 619-627 pp. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.140>
- Weiland, P. (2010) Biogas production: current state and perspectives. *Appl Microbiol Biotechnol*. **85**(4), 849-860. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>