



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS BIODIGESTORES EMPLEADOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PORCÍCOLAS PROVENIENTES DE LAS GRANJAS DEL ESTADO DE YUCATÁN”

TESIS

PRESENTADA POR

I.Q.I ROSIMARY YAÑEZ PALMA

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRA EN INGENIERÍA

OPCIÓN AMBIENTAL

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2017



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS BIODIGESTORES EMPLEADOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PORCÍCOLAS PROVENIENTES DE LAS GRANJAS DEL ESTADO DE YUCATÁN”

TESIS

PRESENTADA POR

I.Q.I ROSIMARY YAÑEZ PALMA

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRA EN INGENIERÍA

OPCIÓN AMBIENTAL

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2017

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

“Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiera sido aprobado por el sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en el”

Agradecimientos

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por su apoyo y patrocinio para la realización de este proyecto de tesis denominado:

“ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS BIODIGESTORES EMPLEADOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PORCÍCOLAS PROVENIENTES DE LAS GRANJAS DEL ESTADO DE YUCATÁN”

De igual manera agradezco su valioso apoyo en todo el camino a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán.

Un agradecimiento especial para la RedBioLac por su colaboración y aportación de información para este proyecto.

RESUMEN

Actualmente en el Estado de Yucatán, la porcicultura es una de las principales actividades económicas, sin embargo, representa una de las mayores fuentes de contaminación, debido a que muchas granjas aún no cuentan con sistemas de tratamiento o no funcionan adecuadamente, generando altos volúmenes de desechos sólidos y líquidos con una elevada carga orgánica.

Este trabajo presenta los resultados de la investigación sobre la variación en la eficiencia de remoción de materia orgánica de seis granjas porcinas en Yucatán, México y la calidad de biogás generado de cinco biodigestores para los procesos productivos *pie de cría* y *ciclo completo*.

De la comparación de las características del influente de las 6 granjas, se notó que la concentración de materia orgánica varía con el tipo de producción, con el tamaño de la granja y el uso del agua, dando como resultado en promedio para las granjas de ciclo completo una concentración de DQO de 5727 mg/L, para 298 UPA y 70 L/UPA y para las de pie de cría una DQO de 3664mg/L para 130 UPA y 81 L/UPA. Lo que se observó además es que las granjas de mayor tamaño hacen un uso más eficiente del agua.

Con respecto a los sistemas de tratamiento estudiados, el sistema que presenta la mejor eficiencia fue el biodigestor operado con un tiempo de retención hidráulico (TRH) ≤ 24 días, se obtuvo la remoción de: SST ≥ 93 %; DQO ≥ 92 %; DBO₅ ≥ 92 %; P ≥ 90 % y la calidad del biogás con un 63.97% de CH₄.

De los resultados se concluye que hay diferencia significativa respecto al tipo de granja tanto para la eficiencia de remoción y calidad de biogás y que a pesar de los altos porcentajes de remoción (>90%) no garantiza un efluente de buena calidad, ya que ninguna granja cumple con los lineamientos de las normatividad vigente.

Palabras clave: efluentes porcinos, Biodigestor, biogás, digestión anaerobia.

ABSTRACT

Currently in the State of Yucatan, pig farming is one of the main economic activities, however, it represents one of the biggest sources of contamination, because many farms still do not have treatment systems or do not work properly, generating high volumes of pollution, solid and liquid waste with a high organic load.

This paper presents the results of the research on the variation in the efficiency of removal of organic matter from six pig farms in Yucatan, Mexico and the quality of biogas generated from five digesters for the productive processes of *breeding* and *full cycle (Farrow-to-Finish)*.

From the comparison of the characteristics of the affluent of the six farms, it was noted that the concentration of organic matter varies with the type of production, with the size of the farm and the use of water, resulting in average for full-cycle farms a concentration of COD of 5727 mg / L, for 298 UPA and 70 L / UPA and for those of breeding standing a COD of 3664mg / L for 130 UPA and 81 L / UPA. Likewise, it was observed that larger farms make more efficient use of water.

With respect to the treatment systems studied, the system with the best efficiency was the digester operated with a hydraulic retention time (HRT) ≤ 24 days, was obtained the removal of: TSS $\geq 93\%$; COD $\geq 92\%$; BOD5 $\geq 92\%$; P $\geq 90\%$ and the quality of the biogas with 63.97% of CH₄.

From the results it is concluded that there is a significant difference with respect to the type of farm both for the removal efficiency and biogas quality and that despite the high removal percentages ($> 90\%$) it does not guarantee a good quality effluent, since none of the Farm complies with the guidelines of the current regulations.

Key words: porcine effluents, digester, biogas, anaerobic digestion

Contenido

I. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Planteamiento del problema	12
1.2. Objetivos	13
1.2.1. Objetivo general	13
1.2.2. Objetivos específicos	14
II. MARCO TEÓRICO	14
2.1. Porcicultura en Yucatán	15
2.2. Tipos de biodigestores	17
2.2.1. Biodigestor anaerobio de campana flotante o “tipo hindú”	17
2.2.2. Biodigestor anaerobio de campana fija o “tipo chino”	18
2.3. Caracterización del agua residual porcícola	19
2.4. Parámetros de operación	21
2.4.1. Temperatura	21
2.4.2. Relación entre el tiempo de retención y la temperatura	22
2.4.3. pH	22
2.4.4. Relación Carbono / Nitrógeno	23
2.4.5. Alcalinidad	23
2.4.6. Biogás	24
2.4.7. Nutrientes	24
2.4.7.1. Nitrógeno	24
2.4.7.2. Fósforo	25
2.4.8. Casos de estudios referentes al uso de los biodigestores anaerobios de cúpula flotante y fija para el tratamiento del agua residual porcina.	25
2.4.9. Normatividad ambiental	26
III. METODOLOGÍA	28
3.1. Muestreo	28
3.2. Parámetros y análisis	29
IV. RESULTADOS	33
4.1. Biodigestor	33
4.2. Características del agua residual	34
4.3. Características de las granjas y sus parámetros de operación	35
4.4. Resultados de materia orgánica y los nutrientes	35

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS	41
5.1. Materia orgánica	42
5.2. Nutrientes	44
5.3. Comparación de resultados	45
5.4. Análisis estadístico de las eficiencias de remoción de materia orgánica de los biodigestores	47
5.5. Regresión lineal para la remoción de materia orgánica y los parámetros de operación del biodigestor.	53
5.6. Análisis y estimación de la producción del Biogás	55
5.7. Análisis Estadístico para la calidad de biogás.	57
5.8. Regresión múltiple de los parámetros de operación y la calidad de metano en el biogás.	59
VI. CONCLUSIONES	61
VII. RECOMENDACIONES	62
7.1. Continuación del estudio	62
7.2. Manejo de biodigestores	62
VIII. BIBLIOGRAFÍA	63
IX. ANEXOS	67
ANEXO 1. Encuesta sobre el manejo de aguas residuales y parámetros de operación del biodigestor en las granjas porcícolas de Yucatán	67
ANEXO 2. Tablas de resultados de las eficiencias de remoción de los parámetros fisicoquímicos	69
ANEXO 3. Carga orgánica volumétrica puntual de las 4 campañas	71
ANEXO 4. Resultados puntuales de la medición de calidad de biogás	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Existencia de ganado porcino por entidad y municipio (INEGI 2007).....	16
Tabla 2. 2 Unidades de producción con ganado porcino (INEGI 2007)	16
Tabla 2. 3 Caracterización de las aguas residuales por sitio productivo de diferentes granjas porcinas de tamaño mediano (Garzón-Zuñiga 2013).....	20
Tabla 2. 4 Comportamiento de la fermentación respecto al pH (GTZ-CVC-OEKOTOP 1987).	23
Tabla 2. 5 Concentración de metano reportado en diferentes trabajos	24
Tabla 2. 6 Límites máximos permisibles para contaminantes básicos.....	27
Tabla 2. 7 Límites máximos permisibles de contaminantes promedio mensual tipo de reúso.....	28
Tabla 3. 1 Granjas Porcinas seleccionadas.....	29
Tabla 3. 2 Indicador de mediciones del biogás.....	30
Tabla 3. 3 Métodos estándar para el análisis de los parámetros fisicoquímicos.....	32
Tabla 4. 1 Parámetros medidos in situ del influente.....	34
Tabla 4. 2 Parámetros medidos in situ del efluente.....	34
Tabla 4. 3 Características de las granjas y Parámetros de operación de los biodigestores	36
Tabla 4. 4 Valores puntuales de materia orgánica en granjas de pie de cría	37
Tabla 4. 5 Valores puntuales de nutrientes en granjas de pie de cría	37
Tabla 4. 6 Valores puntuales de materia orgánica en granjas de ciclo completo.....	38
Tabla 4. 7 Valores puntuales de nutrientes en granjas de ciclo completo.....	38
Tabla 5. 1 Índices de calidad de Agua.....	43
Tabla 5. 2 Comparación de las relaciones de los parámetros fisicoquímicos.....	46
Tabla 5. 3 ANOVA para el porcentaje de Remoción de materia orgánica por el tipo de granja.....	48
Tabla 5. 4 ANOVA al 90% de confianza para el porcentaje de Remoción de materia orgánica por granja.	49
Tabla 5. 5 ANOVA al 90% de confianza para el porcentaje de Remoción de materia orgánica entre las granjas 4 y 6.	53
Tabla 5. 6 Regresión lineal al 90% de confianza para el Tiempo de retención (TRH) y COV	54

Tabla 5. 7 Estimación del biogás y su calidad.....	55
Tabla 5. 8 ANOVA al 90% de confianza para %CH ₄ por Tipo de granja	58
Tabla 5. 9 ANOVA al 90% de confianza para %CH ₄ entre las granjas del mismo tipo	59
Tabla 5. 10 Diseño del análisis de regresión múltiple del biogás.....	59
Tabla 5. 11 Análisis de regresión múltiple del biogás	60
Tabla 5. 12 ANOVA al 90% de confianza del modelo de regresión múltiple del biogás	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Esquema de una planta de campana flotante (tipo hindú)	17
Figura 2. 2 Esquema de una planta de cúpula fija (tipo chino).	18
Figura 3. 1 Diagrama esquemático de la metodología	31
Figura 4. 1 Diseño del biodigestor empleado en las granjas porcinas	33
Figura 4. 2 Promedio de las eficiencias de remoción de materia orgánica de los biodigestores de pie de cría.....	39
Figura 4. 3 Promedio de las eficiencias de la remoción de Nutrientes de los biodigestores de pie de cría.....	39
Figura 5. 1 Diferencia entre la cúpula de los biodigestores	47
Figura 5. 2 Medias y 90% de Fisher LSD para COT	50
Figura 5. 3 Medias y 90% de Fisher LSD para DBO ₅	50
Figura 5. 4 Medias y 90% de Fisher LSD para SST	50
Figura 5. 5 Medias y 90% de Fisher LSD para SSV.....	50
Figura 5. 6 Medias y 90% de Fisher LSD para NKT	50
Figura 5. 7 Promedio de las eficiencias de remoción de materia orgánica de los biodigestores de la granjas 4 y 6	51
Figura 5. 8 Promedio de las eficiencias de remoción de nutrientes de los biodigestores 4 y 6	52
Figura 5. 9 Calidad del biogás en porcentaje de metano en los biodigestores	56
Figura 5. 10 Cámara de gas oxidada por la presencia de H ₂ S.....	57
Figura 5. 11 Medias y 90% de Fisher LSD para Tipo de granja	58

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Hoy en día, la contaminación ambiental es uno de los temas con mayor importancia mundial, con su principal preocupación en las fuentes de contaminación como parte de las actividades industriales y agrícolas. En el Estado de Yucatán ha aumentado la relevancia de este concepto al convertirse en una región con una base económica de importancia en el sector agroindustrial, después del declive henequenero a principios de 1990.

Una de las principales actividades agroindustriales en el estado, es la porcicultura, pero a la vez representa una de las mayores e importantes fuentes de contaminación, debido a que generan altos volúmenes de desechos sólidos y líquidos con una elevada carga orgánica, nutrientes, patógenos y metales pesados.

La alta demanda a nivel nacional e internacional del consumo de carne de cerdo ha provocado un crecimiento acelerado en la población de cerdos.

La porcicultura conlleva a una alta generación de residuos como sustancias tóxicas: amoníaco, metano, sulfuro de hidrógeno, ácidos grasos volátiles, compuestos orgánicos volátiles, monóxido de carbono, cianuro, fósforo, nitratos, metales pesados y fármacos. Además, estos residuos llegan a contener a patógenos que pueden causar enfermedades en los seres humanos, como la *salmonela*, *cryptosporidium*, *streptocolli* y *girardia*.

En el trabajo publicado por Méndez, (2009) se lee: “se ha calculado la generación de aguas residuales dentro de las granjas porcícolas de 6,095,500 m³ por año, y una aproximación de 1, 681,810 cerdos en un total de todas las granjas existentes dentro del Estado de Yucatán”.

Aún existe la falta de control sobre estos desechos causando contaminación del manto acuífero además de ser fuentes probables de enfermedades para la población y los animales. Cabe señalar que la principal fuente de abastecimiento de agua para el Estado de Yucatán, proviene de los mantos acuíferos.

Debido a la alta permeabilidad del suelo de Yucatán, se encuentra vulnerable a una constante contaminación. Dicha vulnerabilidad exige un mayor cuidado y un tratamiento adecuado a las descargas de desechos de actividades agroindustriales.

Por lo cual, a finales del 2012 la Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente del Estado de Yucatán da a conocer el proyecto de biodigestores para pequeñas y medianas granjas porcícolas, el cual, consiste en la instalación de 50 biodigestores anaerobios de campana flotante para mitigar la contaminación por residuos porcinos. En junio del 2016 para dar continuidad al proyecto, se realizó la inversión para la instalación de 100 unidades adicionales a las 50 ya instaladas en las granjas porcinas en Yucatán, abarcando 42 de los 106 municipios del Estado (SEDUMA 2012-2018)

Por lo tanto, este trabajo tuvo como objetivo establecer una comparación de las eficiencias de remoción de materia orgánica y calidad del biogás así como analizar factores como el pH, temperatura, concentración de materia orgánica y parámetros de operación que conduzcan a incrementar los rendimientos de los sistemas anaerobios de granjas porcícolas en el Estado.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Evaluar la eficiencia de los biodigestores con base en las condiciones de operación en granjas porcícolas del Estado de Yucatán.

1.2.2. Objetivos específicos

- Evaluar las condiciones de operación de seis sistemas de tratamiento instalados en granjas porcícolas
- Evaluar las eficiencias de remoción de materia orgánica y la generación de biogás en los biodigestores estudiados con base en las condiciones de operación
- Evaluar si existe correlación entre los parámetros de operación, características del influente, volumen de biogás producido y eficiencia de remoción de materia orgánica en cada granja porcícola.

II. MARCO TEÓRICO

Desde hace ya algunas décadas hasta la actualidad, se ha buscado describir el escenario de los impactos que generan los sistemas de producción de la actividad agropecuaria, tal es el caso de la producción animal intensificada, debido, al alto consumo de algunos insumos como el agua y por las emisiones que generan, y al mal manejo de residuos ganaderos respecto a las regulaciones existentes en cada región.

El escurrimiento por el mal manejo de residuos provenientes de animales, la falta de tratamiento adecuado a los mismos y la disposición de las aguas residuales a diversos cuerpos de agua, afecta adversamente la calidad del agua superficial y subterránea. Los nutrientes presentes como el fósforo y el nitrógeno en los residuos no tratados de animales llegan a aguas superficiales, provocando la eutrofización de los cuerpos de agua. Esto representa la proliferación de algas y menor capacidad de transportar oxígeno en el medio.

Otro factor que degrada la calidad del agua, es la presencia de agentes patógenos en los desechos animales. Los microorganismos presentes en las aguas

residuales porcinas tratadas inadecuadamente contienen bacterias, protozoos, helmintos y virus (Rowse 2011).

El objetivo principal en diversos trabajos de investigación, es la aplicación de tecnologías que permitan ofrecer un adecuado tratamiento a los desechos sólidos y líquidos presentes en el agua residual, proveniente de las actividades de la ganadería intensiva.

Dentro de estas tecnologías se encuentra la implementación de biodigestores, que han logrado disminuir la cantidad de residuos sin tratar dentro de la producción animal intensificada y el aprovechamiento de la biomasa para la producción del biogás.

En este contexto es importante hacer referencia al término biomasa, que define García (2011) como toda materia orgánica de origen vegetal o animal, así como los residuos y desechos orgánicos, sean sólidos o líquidos.

Una forma de aprovechar el recurso biomásico, es a partir de la digestión anaerobia, el cual es un proceso de tratamiento biológico que a partir de los flujos de residuos orgánicos, recupera productos como la energía y los nutrientes en formas utilizables.

La energía se recupera en forma de biogás, un subproducto dentro de los procesos anaerobios para el tratamiento del agua residual.

Típicamente el biogás es una mezcla de 70% de metano (CH_4), 29% de dióxido de carbono (CO_2), y un pequeño porcentaje de sulfuro de hidrógeno (H_2S) (Rittmann y McCarty 2001).

2.1. Porcicultura en Yucatán

A partir de la década de los noventa, la producción de carne de cerdo experimentó un crecimiento acelerado, llegando a una media anual de producción de carne de más de 38,000 en Unidad de Peso Animal (UPA) (INEGI 1994).

Como reflejo de dicho crecimiento, se observa que la porcicultura en Yucatán ha llegado a ser una de las actividades más importantes para la economía regional, ya que crea un gran número de empleos directos e indirectos (INEGI 1994).

Dependiendo del objetivo de su producción, las granjas porcícolas se pueden dividir en:

Pie de cría: Los lechones nacidos en estas granjas se conservan durante la lactancia hasta llegar a un peso aproximado de 20 kg.

Engorda: Adquieren los lechones destetados y se dedican a engordarlos hasta que llegan el peso en que son enviados al rastro.

Ciclo completo: Tienen sus propios vientres y sementales; los lechones nacen en la granja y ahí mismo son criados y engordados hasta su envío al rastro.

En el 2007 se llevó a cabo el VII censo Agrícola-Ganadero por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), en las Tablas 2.1 y 2.2 se presentan datos obtenidos del censo realizado.

Tabla 2. 1 Existencia de ganado porcino por entidad y municipio (INEGI 2007)

Entidad/Municipio	Existencia Total (Cabezas)	Sementales	Vientres	Otros
Yucatán	241,999	4,646	28,414	208,939
Mérida	55,722	273	5,323	50,126
Otros municipios	186,277	4,373	23,091	158,813

Tabla 2. 2 Unidades de producción con ganado porcino (INEGI 2007)

Entidad/Municipio	Unidades de Producción
Yucatán	20,912
Mérida	470
Otros municipios	20,442

Desde la década de los cincuenta, se generalizó la explotación del cerdo bajo un modelo de producción intensivo, sin embargo; no se había contemplado que dicha actividad conllevaría al problema de tratamiento de los desechos generados en gran volumen por la cría y engorda de los cerdos en confinamiento.

2.2. Tipos de biodigestores

La adopción de biodigestores ha dado como consecuencia, mermar la cantidad de residuos sin tratar dentro de la producción animal intensificada y el aprovechamiento de la biomasa para la producción del biogás. Esta tecnología desarrolla sistemas altamente depurativos y eficientes (Olaya 2006).

En el tratamiento de las aguas residuales, los reactores están diseñados para utilizar microorganismos para la eliminación de la materia orgánica, la demanda de oxígeno, y el contenido de nutrientes de los flujos de residuos del influente (Rittmann y McCarty 2001).

Como resultado de diversas investigaciones, se han desarrollado diseños de biodigestores para el tratamiento de aguas residuales y producción del biogás como subproducto, como el caso del modelo del biodigestor anaerobio de campana flotante o el “tipo hindú” (Figura 2.1) y el modelo del biodigestor anaerobio de campana fija o “tipo chino”(Figura 2.2).

2.2.1. Biodigestor anaerobio de campana flotante o “tipo hindú”

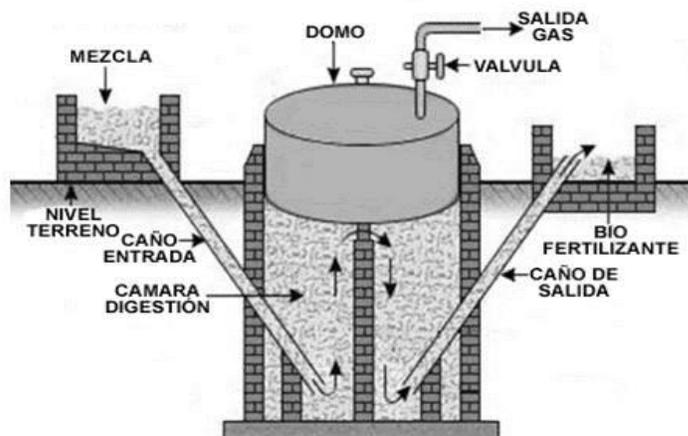


Figura 2. 1 Esquema de una planta de campana flotante (tipo hindú)

Consiste en un digestor subterráneo y una parte móvil superior llamada cúpula que a su vez, se desplaza hacia arriba cuando se acumula el biogás y hacia abajo cuando éste se consume. La cúpula de gas flota directamente sobre el sustrato en digestión (materia orgánica) o en una película acuosa, disponiendo de algún tipo de guía externa para evitar las desviaciones en la trayectoria de la cúpula y que a la vez permita retirar el tambor flotante para hacer el mantenimiento (Information and advisory 2004). Se puede concluir que el nivel de la cúpula dependerá del gas almacenado, permitiendo conocer de una manera más simple la cantidad de gas respecto a la posición de la cúpula.

La presión de acumulación del gas es constante, esto se debe al propio peso de la cúpula, lo cual hace que la construcción de este biodigestor sea más sencilla comparada con el de cúpula fija, ya que no precisa de la cúpula estanca para almacenamiento del gas y de reguladores de presión (Information and advisory 2004).

La vida útil de este reactor es más corta comparado con el de cúpula fija, teniendo unos 15 años como máximo y sólo unos 5 años en zonas tropicales costeras con condiciones muy agresivas con temperaturas más elevadas (Olaya 2009).

2.2.2. Biodigestor anaerobio de campana fija o “tipo chino”

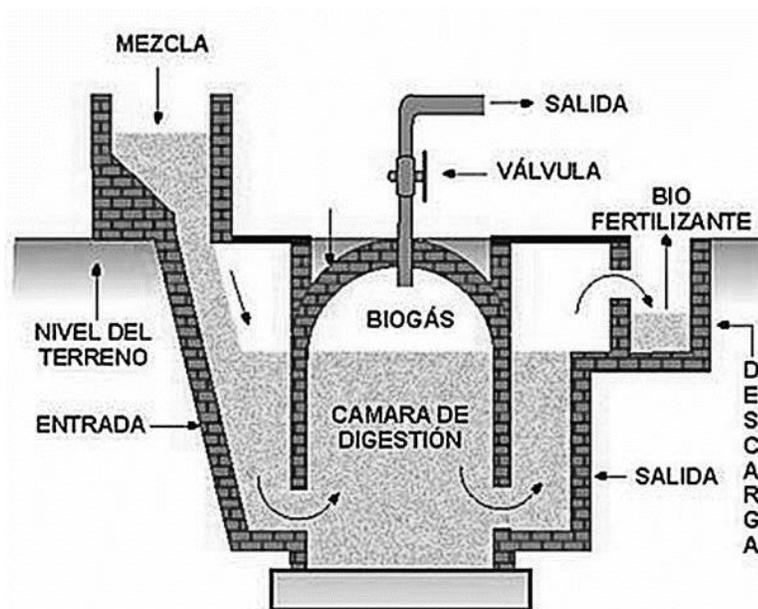


Figura 2. 2 Esquema de una planta de cúpula fija (tipo chino).

Consiste en una de las tipologías de planta más sencilla, esto se debe a que este biodigestor no cuenta con partes móviles, lo que conlleva a un diseño compacto que ahorra espacio, se encuentra aislado térmicamente y normalmente está enterrado.

La construcción es laboriosa y necesita una constante supervisión, provocando un aumento de costo por complejidad de construcción (Information and advisory 2004).

Debido al hecho que los principales problemas suceden por la pérdida de estanqueidad de la cúpula, permitiendo la fuga del gas, por lo cual la cúpula debe de trabajar como un tapón que no permita el paso del gas fuera de ella, puesto que debe almacenarlo sin pérdidas, asemejándose al digestor de cúpula flotante.

Cuando la producción de gas empieza, se desplaza el sustrato a la cámara de expansión, acumulándose el gas en la cúpula. La presión aumenta con la acumulación del gas y ésta viene dada por la altura de sustrato acumulado en la cámara de expansión (Information and advisory 2004).

Dentro de sus características importantes se encuentra la elevada flexibilidad de tamaño con la que funcionan, pudiéndose adaptar a producciones muy dispares de estiércol y tiene una vida útil muy larga, que puede ser de 20 años o más (Olaya 2006).

2.3. Caracterización del agua residual porcícola

Es importante conocer las materias primas fermentables para el proceso de digestión anaerobia, éstas se encuentran en un amplio espectro a los excrementos animales y humanos, aguas residuales orgánicas de las industrias, restos de cosechas, entre otros. La elección de la biomasa tiene una alta influencia en el proceso microbiológico, ya que éste requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, así como estar presentes en un cierto equilibrio con sales minerales (Olaya 2006).

Un estudio reciente acerca de la caracterización de la descarga por proceso o sitio productivo en diferentes granjas dentro de la República Mexicana elaborado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua se muestran en la Tabla 2.3

Garzón-Zúñiga (2013) afirma que *“en las aguas residuales de granjas porcinas se presenta una alta variación en la concentración de contaminantes dependiendo del proceso productivo (maternidad, destete, engorda, mezcla, ciclo completo), tamaño de la granja y manejo del agua. Existe una correlación entre el tamaño de la granja y el uso eficiente del agua. Generalmente a mayor tamaño de granja, el agua se utiliza de forma más eficiente y la concentración de contaminantes en el efluente es mayor”*.

Tabla 2. 3 Caracterización de las aguas residuales por sitio productivo de diferentes granjas porcinas de tamaño mediano (Garzón-Zuñiga 2013).

Granja	1		2			3	4	5*
	Maternidad	Destete	Maternidad y gestación	Engorda	Mezcla	Engorda	Mezcla	Maternidad
Proceso productivo caracterizado								
Capacidad animales	6000	6600	3000	3000	3000	5000	5500	5600
Tamaño de granja	Mediana	Mediana	Mediana	Mediana	Mediana	Mediana	Mediana	Mediana
Disponibilidad de agua	Media	Media	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Media
Clima del lugar	Cálido-semiseco	Cálido-semiseco	Sub-tropical	Sub-tropical	Sub-tropical	Sub-tropical	Tropical	Templado
Observaciones sobre el muestreo	Durante lavado de naves	Dato no disponible	Final de lavado poca agua					
DQO (mg/L)	3339	37498	19365	38544	6419	19344	25205	3809
DBO ₅ (mg/L)	2494	5600	9262	9188	2646	9613	8460	1657
SST (mg/L)	1130	16357	11250	25166	2210	10125	15042	1994
SSV (mg/L)	478	13000	9125	21500	1657	7875	11792	1852
N Total (mg/L)	550	1345	1371	1452	576	1515	2034	
NTK (mg/L)	550	1345	1369	1450	574	1515	2033	405
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	380	440	640	1270	380	1500	1760	178
N-(NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻) (mg/L)	0.13	0.13	2.06	1.87	1.89	0.13	0.63	0.13
P Total (mg/L)	28.6	79.5	118.6	149	41.1	76.7	180.1	41.4
pH	7.83	6.14	6.99	6.79	7.17	7.06	6.94	6.87
Coliformes fecales	1.50E+07	2.10E+07	4.60E+08	1.10E+08	9.30E+07	4.60E+04	9.20E+08	1.60E+08
DBO/DQO	0.75	0.15	0.48	0.24	0.4	0.50	0.3	0.4

* Granja de tipo ciclo completo. Pero al momento del muestreo solo estaba descargando el área de maternidad

2.4. Parámetros de operación

Se pueden combinar reactores y operarlos de diferentes maneras con el fin de lograr un tratamiento deseable, donde el efluente cumpla con la legislación ambiental.

Para reducir las repercusiones que se puedan tener dentro del proceso de tratamiento del agua residual, es necesario conocer los parámetros de operación del biodigestor.

2.4.1. Temperatura

Las velocidades de reacción en los procesos de digestión anaeróbica son mucho más sensibles a los cambios de temperatura (Tchobanoglous et al. 2003). Por lo cual, una temperatura estable dentro del proceso es muy importante, y no se recomiendan los cambios de temperatura de más de 0.5 °C / día (Vesilind 1998).

Al aumentar la temperatura, la velocidad de reacción procede más rápido, lo cual propicia una mayor eficiencia de operación y un bajo requerimiento de tiempo de retención.

Dos rangos de temperatura han sido establecidos para llevar a cabo una digestión anaerobia eficiente, en el nivel mesofílico y termofílico (Information and advisory 2004).

- Zona mesofílica: entre 20 y 40°C
- Zona termofílica: por encima de los 40°C

Trabajando en el rango termofílico se asegura la higienización del digerido, puesto que se destruyen patógenos, debido a que a altas temperaturas se produce la lisis celular de varios microorganismos.

Las siguientes variaciones en función del rango de temperatura de trabajo no son todavía inhibitoras del proceso (Information and advisory 2004).

- Rango mesofílico: ± 1 °C/hora
- Rango termofílico: $\pm 0,5$ °C/hora

La fluctuación durante el día de la temperatura no será un gran problema en plantas que estén construidas bajo suelo, al contar éste con una temperatura prácticamente constante a un metro de profundidad (“Information and advisory” 2004).

Se ha encontrado una temperatura óptima mesofílica de 40°C y al aumentarla a 45°C no se encontró una mejora en comparación a los 35°C, así mismo, se ha podido observar que dentro del rango termofílico con una temperatura de 63°C se puede dar una inhibición metanogénica (Pfeffer 1974).

2.4.2. Relación entre el tiempo de retención y la temperatura

El rango de temperatura fija en el periodo de retención dentro del biodigestor, (Alcayaga 1999; Olaya 2009):

- Más de 100 días de retención fermentación psicofílica: para un rango de temperatura debajo de 20°C y.
- Aproximadamente 30 a 40 días de retención fermentación mesofílica: para un rango de temperatura entre 20 y 40°C y.
- Más de 8 días de retención fermentación termofílica: para un rango de temperatura superior a los 40°C y. Este tipo de fermentación no es apropiada para plantas sencillas.

2.4.3. pH

Las bacterias responsables del mecanismo de la digestión anaerobia son altamente sensibles a cambios en el pH, oscilando el rango entre 6.0 y 8.0 (es deseable un valor entre 7.0 y 7.2) (GTZ-CVC-OEKOTOP 1987).

El pH del lodo de fermentación indica si el proceso transcurre sin problemas. En la Tabla 2.4 se muestra el comportamiento de la fermentación dentro del biodigestor de acuerdo con el valor del pH.

Tabla 2. 4 Comportamiento de la fermentación respecto al pH (GTZ-CVC-OEKOTOP 1987).

pH	Comportamiento
7.0-7.2	Óptimo
6.2	Retarda la acidificación
7.6	Retarda la amonización*

*Se llama así a la transformación de las materias orgánicas nitrogenadas en compuesto amoniacal

2.4.4. Relación Carbono / Nitrógeno

La presencia de nutrientes como el nitrógeno es necesaria, y en una adecuada proporción con el carbono para el correcto desarrollo de la flora bacteriana.

Cuando las cantidades de nitrógeno son muy elevadas pueden existir problemas de inhibición por formación de amonio. Por lo tanto se sugiere establecer una relación C/N de 20:1 hasta 30:1 para una digestión anaerobia óptima (Alcayaga 1999).

2.4.5. Alcalinidad

La alcalinidad tiene un papel importante dentro de la digestión anaerobia, esto se debe a que es una variable ambiental la cual se tiene la necesidad de controlar, debido a que ésta mantiene la capacidad amortiguadora a los cambios de pH, los cuales se deben a los ácidos grasos volátiles presentes en las aguas residuales.

Se considera que unos valores de alcalinidad de 2000-3000 partes por millón son suficientes. Si no se cumple se deberá de plantear la posibilidad de regular exteriormente el pH (Morales y Moreno 2004).

2.4.6. Biogás

La aplicación de la tecnología de biodigestores ha ganado popularidad dentro de la agroindustria, ya que tiene la capacidad de producir biogás por medio de la transformación de la biomasa.

El biogás es una mezcla de gases cuya composición varía de acuerdo con los métodos de su producción y de la proveniencia de la biomasa. Sus componentes principales son el metano y el dióxido de carbono, adicionalmente se encuentran en menores cantidades el nitrógeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, vapor de agua, amoníaco y compuestos aromáticos (Pedroso 2007).

El biogás obtenido mediante la digestión anaerobia es un combustible confiable siempre que el contenido de metano sea mayor del 50% (Hilbert 2008).

El valor energético del biogás se ve afectado por la proporción de los gases que lo componen, esta problemática se puede ver reflejada en el grado de flamabilidad del biogás.

En la Tabla 2.5 se observan diferentes concentraciones de metano en biogás producido de la digestión anaerobia de varios proyectos de investigación.

Tabla 2. 5 Concentración de metano reportado en diferentes trabajos

Fuente	Lansing 2008	Zicari 2003	Safley Jr 1988	Hansen 1998
%Metano	76	50-60	68-80	71
Biomasa	Porcina	Bovina	Porcina	Porcina

2.4.7. Nutrientes

2.4.7.1. Nitrógeno

El nitrógeno se puede encontrar en las aguas residuales en tres formas predominantes:

1) Nitrógeno orgánico, éste incluye proteínas, aminoácidos, aminos, entre otros. Puede ser soluble o insoluble en el agua.

2) Nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3 \leftrightarrow \text{NH}_4^+$) que, según el pH, puede estar en forma de amoniaco (generador de malos olores) o como amonio (soluble en agua). Éste proviene de la descomposición del nitrógeno orgánico.

3) Nitrato (NO_3^-), que básicamente es la forma de nitrógeno completamente oxidada, en otras palabras, es cuando el amonio se oxida a nitrato

El proceso de nitrificación/desnitrificación sirve para la remoción efectiva del nitrógeno en aguas residuales. Consiste en dos pasos claves:

1) La nitrificación, en que se busca oxidar la mayor parte del nitrógeno a nitrato.

2) Desnitrificación. Esta reacción convierte el nitrato en nitrógeno elemental, el cual al ser un gas se libera al ambiente, eliminándose así el nitrógeno del agua residual (Viquez 2013).

2.4.7.2. Fósforo

El fósforo aparece como fosfato en las formas siguientes:

Ortofosfatos solubles: Fácilmente precipitables, pueden proceder directamente de los vertidos o del resultado de una degradación en el proceso del tratamiento de los polifosfatos orgánicos o inorgánicos.

Polifosfatos: Orgánicos o inorgánicos, que pueden bien degradarse en ortofosfatos, o bien permanecer inertes. A su vez pueden estar en solución o en suspensión más o menos sedimentable (Dapena 1995).

Una fracción de los fosfatos, en su mayoría orgánicos es sedimentable y por otra parte es asimilado por microorganismos heterótrofos.

2.4.8. Casos de estudios referentes al uso de los biodigestores anaerobios de cúpula flotante y fija para el tratamiento del agua residual porcina.

En un estudio realizado por Sosa et al (2014), se dispuso de un biodigestor anaerobio de cúpula fija de 90 m^3 que se alimentó con aguas residuales porcinas.

Con una carga orgánica en la entrada del reactor de 2310 mg/L de DQO, el trabajo reporta una eficiencia de remoción de 81% de sólidos totales, 85% para los sólidos volátiles y un 72% en la carga orgánica. Sin embargo, aunque el estudio menciona tener un buen resultado con el 72% de remoción de DQO, esto indica una DQO final de 646.8 mg/L. La cual, basados en la legislación ambiental de México, el efluente no cumpliría con las especificaciones de la NOM-SEMARNAT-001-1996.

En el estado de Yucatán, la falta de estudios locales y de análisis acerca del agua residual porcina y los tratamientos actuales implementados, hacen escasa la información acerca de la eficiencia del biodigestor anaerobio de cúpula flotante, por lo cual este trabajo de investigación busca la actualización de datos y la nueva información dentro de los temas antes mencionados.

2.4.9. Normatividad ambiental

Los desechos porcinos influyen directamente sobre el medio ambiente, por lo que es necesario determinar el impacto ambiental que generan los desechos, sobre los recursos de agua y suelo.

El control de contaminación por descargas de aguas residuales porcinas, está regulada por las siguientes leyes y normas.

- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
- Ley de Aguas Nacionales
- Ley Federal de Derechos en Materia de Agua
- Ley General de Salud
- NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

En las tablas 2.6 y 2.7 se muestran los límites máximos permisibles de contaminantes.

Tabla 2. 6 Límites máximos permisibles para contaminantes básicos

PARÁMETROS	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO			
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)		HUMEDALES NATURALES (B)	
(miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Temperatura °C (1)	N.A	N.A	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40
Sólidos Suspendidos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A	N.A	75	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A	N.A	75	150
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A	N.A.	N.A.	15	25	N.A	N.A	N.A	N.A
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A	N.A	N.A.	N.A.	5	10	N.A	N.A	N.A	N.A

(1)Instantáneo, P.D. Promedio Diario P.M Promedio Mensual N.A No Aplica (A), (B), y (C) Tipo de Cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos

Tabla 2. 7 Límites máximos permisibles de contaminantes promedio mensual tipo de reúso

TIPO DE REUSO	Coliformes Fecales NMP/100ml	Huevos de Helmintos h/L	Grasas y aceites mg/L	DBO ₅ mg/L	SST mg/L
Servicios al público con contacto directo	240	≥1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	1000	≤5	15	30	30

Sectores productivos completos continúan desregulados o no contemplados por la normatividad y la política ambiental. Este es el caso de la ganadería, la agricultura, la actividad forestal, la pesca y las empresas de servicio, especialmente las dedicadas al turismo. Ocurre parcialmente con actividades de competencia local como el crecimiento urbano o el manejo de residuos municipales.

III. METODOLOGÍA

3.1. Muestreo

Para esta investigación, se llevó a cabo un muestreo por conveniencia de localización y factibilidad de entrada a las granjas. Las muestras se tomaron de los biodigestores pertenecientes a seis granjas porcícolas del Estado de Yucatán, realizando en total cuatro campañas de muestreo.

La ubicación de las granjas seleccionadas, la población de cerdos y el tipo de producción se presentan en la Tabla 3.1.

Se llevó a cabo una encuesta que se muestra en el Anexo 1. Ésta, fue respondida por los operarios de cada granja, con el fin de obtener mayor información de la implementación de los biodigestores, los parámetros de operación del mismo, y las características adicionales en cada granja.

Tabla 3. 1 Granjas Porcinas seleccionadas

GRANJA	1	2	3	4	5	6
Localización	Chixulub Pueblo	Chixulub Pueblo	Conkal	Sierra Papacal	Sierra Papacal	Paraíso, Progreso
Número de Cerdos promedio	226	707	143	600	158	550
Tipo de Granja	Pie de cría	Ciclo Completo	Ciclo Completo	Ciclo Completo	Pie de Cría	Pie de Cría

Las muestras fueron recolectadas en una botella de vidrio ámbar con capacidad de 1 litro.

El transporte y manejo de las muestras hacia el laboratorio ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UADY, así como el almacenamiento de las mismas, fue de acuerdo al Standard Methods Apha (1995).

Las muestras del influente se tomaron en el cárcamo de recepción, en el cual, es depositado el agua residual generada por el lavado proveniente de los chiqueros.

Así mismo, las muestras del efluente fueron tomadas de la tubería donde rebosa el biodigestor previo al humedal como depósito final del proceso.

La muestra del biogás, se analizó con el equipo Landtec GEM 9000 plus directo de la tubería del quemador que se encuentra al final del biodigestor.

3.2. Parámetros y análisis

Los parámetros medidos y analizados para cada muestra se encuentran en la Tabla 3.3, así como el método para su determinación.

Los análisis se realizaron por triplicado para un mayor control de confianza de los resultados a reportar.

Con los datos recabados de los diferentes muestreos se determinaron las eficiencias de remoción de la materia orgánica y producción de biogás.

La calidad del biogás fue obtenida por medio del equipo Landtec GEM 9000 plus, proporcionando el porcentaje de composición de los siguientes compuestos:

Tabla 3. 2 Indicador de mediciones del biogás

Compuesto	Indicador
CO ₂ (Dióxido de Carbono)	En porcentaje
H ₂ S (Ácido Sulfhídrico)	Presencia o Ausencia.
CH ₄	En porcentaje

Se realizaron análisis de varianza para encontrar si existe diferencia significativa entre los diferentes biodigestores. Con base en estos resultados y en la forma en que se operan los biodigestores se analizaron las causas que pudieran estar limitando que los sistemas alcancen mayores remociones de materia orgánica o mayor generación de biogás. Los análisis estadísticos se realizaron por medio del software Statgraphics.

Así mismo, se realizaron análisis de regresión lineal para determinar si existen correlaciones entre las eficiencias de remoción de materia orgánica y los parámetros de operación. Del mismo modo para la calidad del biogás. En la figura 3.1 se muestra un resumen de la metodología aplicada a la investigación.

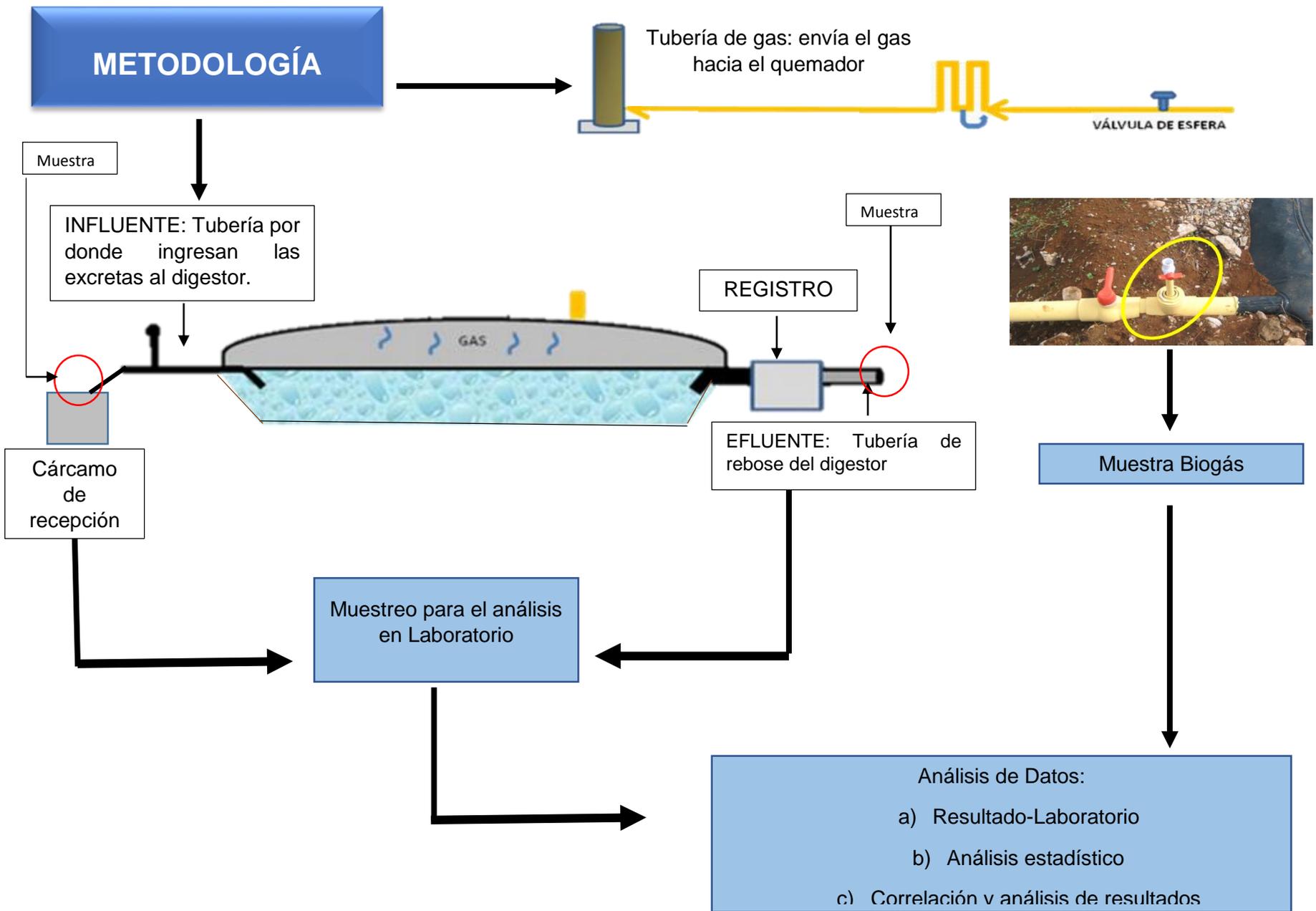


Figura 3. 1 Diagrama esquemático de la metodología

Tabla 3. 3 Métodos estándar para el análisis de los parámetros fisicoquímicos

Parámetro	Método	Parámetro	Método
DQO _{TOTAL}	STANDARD METHODS 5220 D. Colorimetric	P (Fósforo)	STANDARD METHODS 4500-P. C Vanadomolybdophosphoric Acid
DQO _{SOLUBLE}	STANDARD METHODS 5220 D. Colorimetric	N-NH ₃ (Nitrógeno amoniaco)	STANDARD METHODS 4500-NH3-C Titrimetric method
DBO ₅	STANDARD METHODS 5210-B 5 day BOD test	NKT (Nitrógeno total Kjendahl)	STANDARD METHODS 4500-Norg. B Macro Kjendahl method
SST (Sólidos suspendidos totales)	STANDARD METHODS 2540D. Dried at 103-105°C	COT (Carbón Orgánico Total)	STANDARD METHODS 5310 B Combustion-Infrared
SSV (Sólidos suspendidos volátiles)	STANDARD METHODS 2540E. Ignited at 550°C	O.D, pH y Temperatura	Multiparamétrico YSI-556, in situ

IV. RESULTADOS

4.1. Biodigestor

Como se mencionó en el Capítulo 2.2 “Tipos de biodigestores”, se tomó de referencia el caso del modelo del biodigestor anaerobio de campana flotante o el “tipo hindú” y el modelo del biodigestor anaerobio de campana fija o “tipo chino” para la presente investigación.

Sin embargo se observaron diferencias y similitudes entre la estructura del biodigestor empleado para cada granja respecto a los biodigestores tipo hindú y chino.

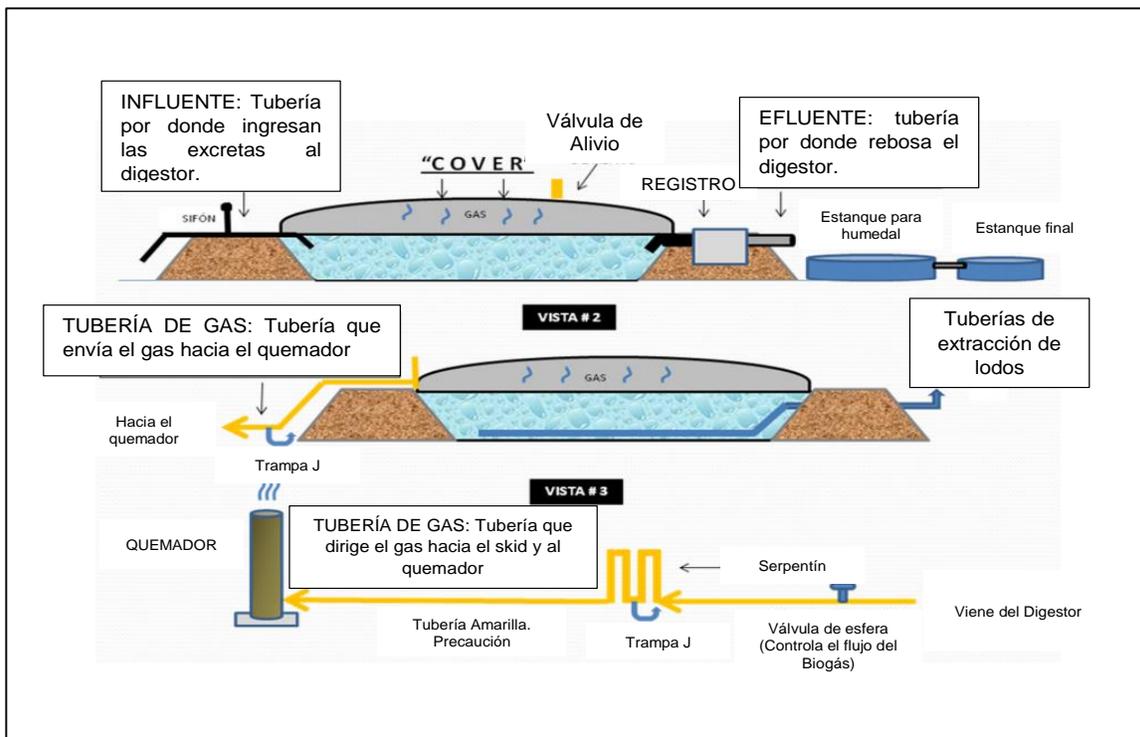


Figura 4. 1 Diseño del biodigestor empleado en las granjas porcinas

El suelo en Yucatán, conocido como kárstico, es muy sensible a los cambios externos, debido a que son suelos superficiales y delgados. La roca caliza que los conforma es de una permeabilidad extrema y la cercana ubicación del acuífero al suelo dificultan la excavación para la construcción e instalación de biodigestores

subterráneos, sin embargo, para poder acondicionar esta tecnología y con el fin de favorecer las condiciones de operación como es la temperatura en la digestión anaerobia, se construyeron de manera superficial como se observa en la Figura 4.1, teniendo taludes como soporte del biodigestor en contraste a los biodigestores tipo chino e hindú, consisten en la construcción subterránea de la cámara de digestión cómo se observa en las Figuras 2.1 y 2.2.

Sin embargo, el biodigestor sujeto a esta investigación se asemeja más al tipo hindú, ya que ambos presentan una parte móvil superior (cúpula) la cual, se desplaza hacia arriba cuando se acumula el biogás y hacia abajo cuando éste se consume.

4.2. Características del agua residual

La caracterización del agua residual proveniente de las granjas porcinas previas a someterse al tratamiento, indica las propiedades del influente el cual puede repercutir dentro de las eficiencias de remoción de materia orgánica.

En las Tablas 4.1 y 4.2 se muestran los valores promedios de los parámetros medidos in situ en cada biodigestor.

Tabla 4. 1 Parámetros medidos in situ del influente

Parámetros	Biodigestores											
	1	D.E	2	D.E	3	D.E	4	D.E	5	D.E	6	D.E
pH	6.72	0.18	6.98	0.14	6.36	0.13	6.75	0.2	7.15	0.14	6.78	0.16
T °C	27.7	0.3	28.07	0.4	28	0.18	27.75	0.6	27.5	0.5	28.55	0.2
O.D mg/L	1.46	0.23	0.86	0.31	1.77	0.22	1.065	0.35	1.155	0.51	1.28	0.36

*D.E Desviación Estándar.

Tabla 4. 2 Parámetros medidos in situ del efluente

Parámetros	Biodigestores											
	1	D.E	2	D.E	3	D.E	4	D.E	5	D.E	6	D.E
pH	7.59	0.28	8.03	0.15	7.61	0.19	8	0.13	7.83	0.16	7.74	0.14
T °C	28.42	0.2	29.5	0.2	28	0.3	28.47	0.23	28.3	0.4	28.7	0.3
O.D mg/L	2.12	0.13	0.76	0.33	1.44	0.28	1.91	0.34	1.33	0.43	1.12	0.26

*D.E Desviación Estándar.

4.3. Características de las granjas y sus parámetros de operación.

Se estimaron las Unidades de Población Animal (UPA) debido a la variabilidad del peso promedio por cerdo, con el fin de estimar la cantidad de agua utilizada en cada granja. La UPA equivale a 100 kg de peso vivo por cerdo.

Se utilizó la relación que indican Méndez et al. (2009) donde se considera que el peso de los cerdos de pie de cría es de 200 kg; de 15 kg para cerdos de destete y de 80 kg para cerdos de engorda.

Para realizar los cálculos se multiplicó el número de cerdos de cada tipo de cerdo por su peso promedio, con lo que se determinó el peso total de los cerdos y para obtener la cantidad de UPAs el peso total de los cerdos se dividió entre 100 kg.

En la Tabla 4.3 se muestran las características de las granjas y los parámetros de operación de cada biodigestor.

4.4. Resultados de materia orgánica y los nutrientes

En las Tablas 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 se muestran los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio de los parámetros físico-químicos sujetos a estudio. (I- en el influente, E- en el efluente, las unidades de los parámetros están en mg/L)

Tabla 4. 3 Características de las granjas y Parámetros de operación de los biodigestores

Granja	UPA	Frecuencia de bombeo (días/semana)	Volumen de bombeo (m ³)	Agua utilizada L/UPA	Volumen del Biodigestor (m ³)*	TRH (días)	Carga Orgánica Volumétrica**
1	82	1	2.45	29	75	30.61	3993
2	442	2	42.68	48	500	23.43	3290
3	80	2	22.61	141	50	4.4	914
4	372	2	20.25	27	250	24.69	4386
5	73.6	1	7.4	100	75	10.13	4072
6	239	1	27.5	113	75	2.72	2929

*Datos proporcionados por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente del Estado de Yucatán

**Valor promedio de la carga orgánica en las 4 campañas (kg DQOtotal/(m³ día)), para mayor información de los valores puntuales de la carga orgánica volumétrica, ver Anexo 3

Tabla 4. 4 Valores puntuales de materia orgánica en granjas de pie de cría

Granja	Campaña	DQOtotal-I	DQOtotal-E	DQOsoluble-I	DQOsoluble-E	SSV-I	SSV-E	SST-I	SST-E	DBO-I	DBO-E	COT-I	COT-E
1	1	4718	333	2287	485	3290	383	3726	430	1555	101	850	43
	2	4018	785	2798	345	750	118	936	170	1678	221	902	131
	3	2863	396	1909	345	510	77	603	94	1098	123	600	60
	4	4371	1418	847	336	880	140	1273	162	916	204	500	100
5	1	5785	699	1763	945	3018	148	3802	350	1480	262	802	139
	2	4761	398	1718	288	1350	79	1733	97	1040	187	232	73
	3	3574	367	1994	207	1520	45	1820	47	1744	131	560	96
	4	2171	314	1460	283	1220	58	1453	71	1134	198	747	100
6	1	5441	710	231	63	653	201	1620	450	440	155	970	60
	2	3316	463	1909	349	630	87	760	130	1345	199	500	98
	3	1752	336	838	216	493	59	583	71	933	192	600	56
	4	1207	465	1016	429	906	57	1153	68	716	351	400	190

Tabla 4. 5 Valores puntuales de nutrientes en granjas de pie de cría

Granja	Campaña	P-I	P-E	NKT-I	NKT-E	NH ₃ -I	NH ₃ -E
1	1	94	24	548	462	426	386
	2	86	17	319	269	240	217
	3	68	29	319	263	225	200
	4	246	45	390	361	307	228
5	1	89	34	345	233	193	148
	2	62	7	184	151	114	100
	3	558	99	231	183	152	110
	4	309	115	223	183	153	138
6	1	60	36	222	199	206	174
	2	64	9	157	150	120	111
	3	170	79	193	186	119	99
	4	405	165	263	234	211	182

Tabla 4. 6 Valores puntuales de materia orgánica en granjas de ciclo completo

Granja	Campaña	DQOtotal-I	DQOtotal-E	DQOsoluble-I	DQOsoluble-E	SSV-I	SSV-E	SST-I	SST-E	DBO-I	DBO-E	COT-I	COT-E
2	1	5330	347	2372	560	760	370	1131	433	1223	93	648	40
	2	11252	1007	4212	659	3766	208	5263	266	2294	291	1256	154
	3	4837	341	1985	169	1163	121	1380	170	2113	105	1144	50
	4	4904	918	3038	715	3983	214	5363	251	2041	234	1130	117
3	1	1617	549	1134	498	1094	253	1218	328	1113	90	598	45
	2	1828	666	1008	279	1123	306	1288	450	1038	253	576	138
	3	2185	1330	874	189	508	101	615	121	878	284	418	160
	4	1682	118	1016	150	1766	563	2033	901	1123	385	640	210
4	1	7674	948	3505	160	3343	613	3936	748	1753	148	969	62
	2	14927	718	5145	453	1636	60	1760	66	2245	182	1273	39.66
	3	5730	496	2696	763	936	27	1016	29	2378	101	1300	45
	4	6761	341	5241	260	2946	45	3363	47	2329	292	1300	164

Tabla 4. 7 Valores puntuales de nutrientes en granjas de ciclo completo

Granja	Campaña	P-I	P-E	NKT-I	NKT-E	NH ₃ -I	NH ₃ -E
2	1	83	8	724	683	602	532
	2	67	11	461	407	338	315
	3	267	29	348	307	253	199
	4	292	101	444	414	393	337
3	1	66	23	277	214	162	150
	2	116	53	179	130	102	92
	3	164	85	134	87	64	54
	4	120	50	125	90	80	71
4	1	58	13	440	334	341	274
	2	110	5	345	259	250	239
	3	385	24	254	217	165	152
	4	265	16	284	254	237	175

En las Gráficas 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 se presentan los valores promedio de las eficiencias de remoción de cada parámetro de las cuatro campañas realizadas.

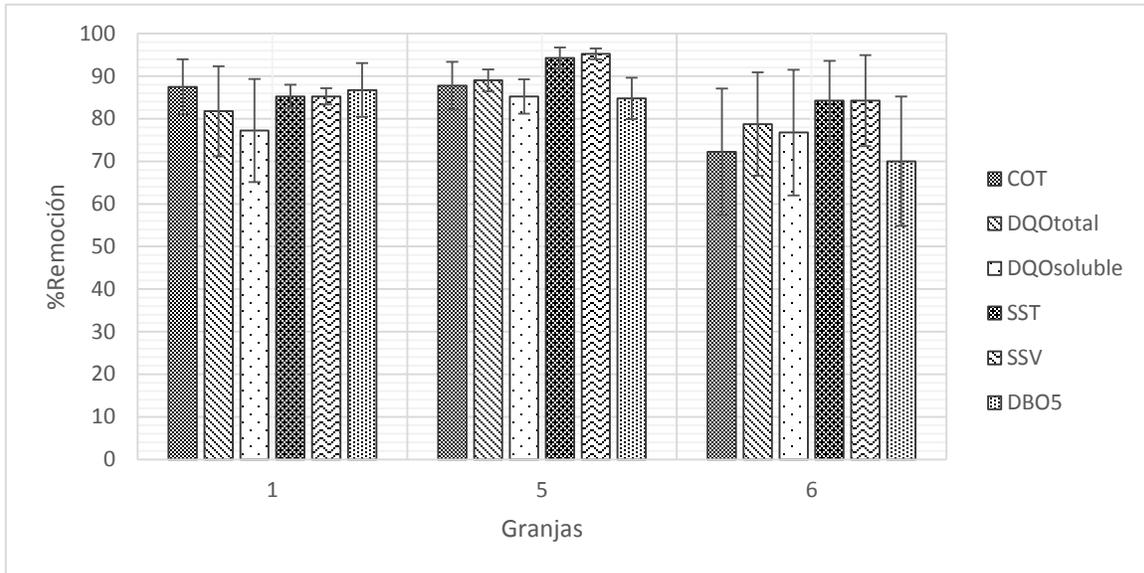


Figura 4. 2 Promedio de las eficiencias de remoción de materia orgánica de los biodigestores de pie de cría

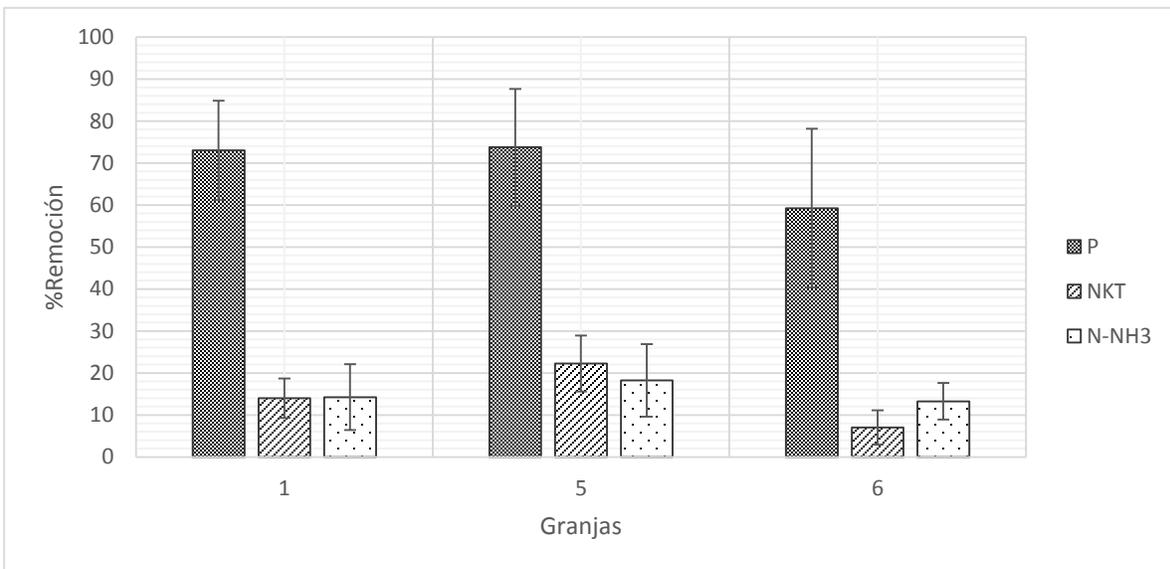


Figura 4. 3 Promedio de las eficiencias de la remoción de Nutrientes de los biodigestores de pie de cría

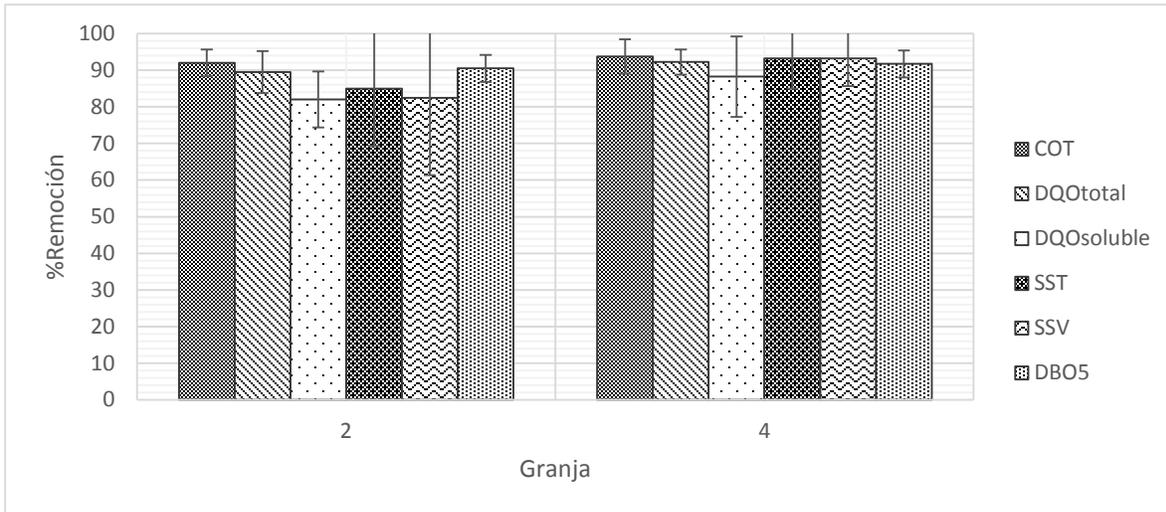


Figura 4.4 Promedio de las eficiencias de remoción de materia orgánica de los biodigestores de ciclo completo

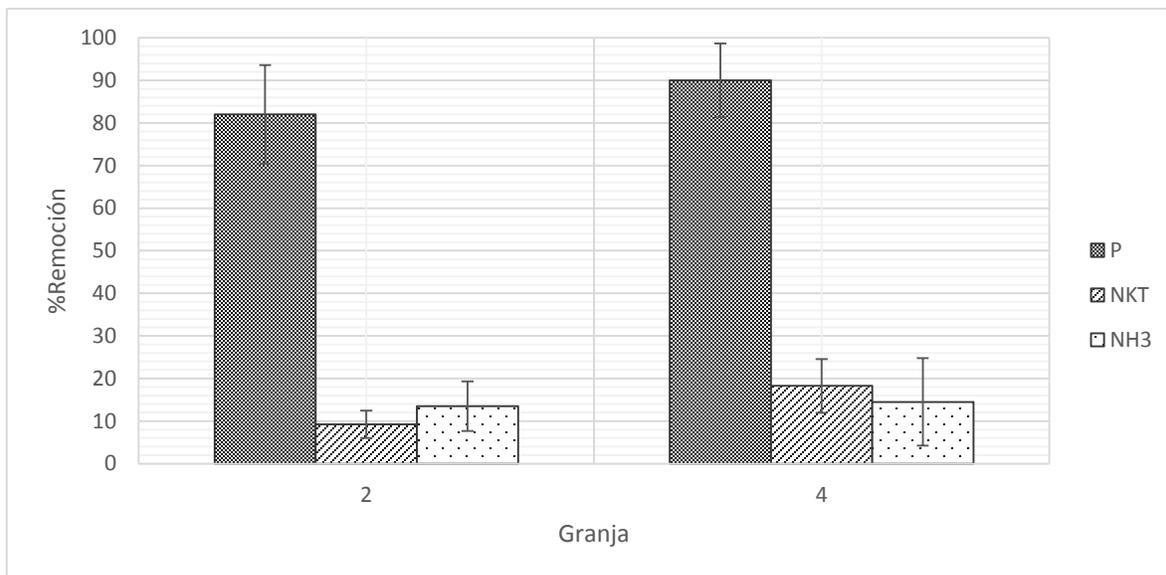


Figura 4.5 Promedio de las eficiencias de remoción de nutrientes de los biodigestores de ciclo completo

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se observa en las Gráficas 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 que existe una variación en los porcentajes de remoción de materia orgánica de 1.2 hasta 21 %, lo cual nos indica que existe diferencia entre las desviaciones estándar para los parámetros de cada granja.

Estas variaciones se deben a problemas encontrados en los biodigestores, como problemas de bombeos, acumulación de nata en el cárcamo de recepción y toma de muestra al momento del lavado de corrales o con acumulación de excretas.

Estas particularidades presentan interferencias dentro de los análisis, ya que se tomaron durante las campañas muestras con mayor cantidad de sólidos lo cual se ve reflejado en el porcentaje de remoción.

Se observa que se llegan a obtener valores de los porcentajes de remoción de materia orgánica de hasta el 90%, sin embargo, eso no garantiza un efluente de buena calidad, ya que ninguna granja cumple con los límites máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997.

Como se mencionó en el Capítulo II, el tipo de uso de agua que se utiliza en las granjas porcinas es de riego agrícola en suelos, sin embargo la NOM-001-SEMARNAT-1996 muestra que los límites máximos permisibles no se aplican para este caso.

Aunado a lo anterior, se comparó los resultados de concentración de los efluentes con el tipo de uso público urbano y tipo de reúso como lo condicionan la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997 respectivamente.

Como se muestra en la Tabla 2.7, dentro de los límites máximos permisibles para el reúso se encuentran los parámetros DBO_5 y SST.

Los porcentajes de remoción más altos para la DBO_5 en las seis granjas fueron de 86, 90 y 92 correspondientes a las granjas 1, 2 y 4 respectivamente, sin embargo ninguna cumple con la normatividad ambiental teniendo concentraciones mayores a los 30 mg/L

Del mismo modo para los casos con mayor porcentaje de remoción de SST (93 y 94 pertenecientes a las granjas 4 y 5 respectivamente) superando la concentración máxima permisible de 30 mg/L de la normatividad.

Para el caso de “Uso público urbano”, se clasificó el tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos y al comparar los efluentes con la normatividad ambiental, se obtiene que para las granjas 4,5 y 6 corresponden a un tipo de cuerpo receptor C, superando los límites máximos permisibles de concentración para SST (>40 mg/L), DBO₅ (>30 mg/L), N (>15 mg/L) y P (>5 mg/L).

Para el caso de las granjas 1, 2 y 3, éstas corresponden al tipo de cuerpo receptor B, superando los límites máximos permisibles de concentración para SST (>75 mg/L), DBO₅ (>75 mg/L), N (>40 mg/L) y P (>20 mg/L).

5.1. Materia orgánica

LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA y SEMARNAT utilizan tres parámetros indicadores para evaluar la calidad del agua: la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos suspendidos totales (SST), que representan el grado de contaminación, cuanto mayor es la DQO y DBO₅, se puede decir que la muestra es más contaminante .

Al comparar los resultados obtenidos en los efluentes de cada granja con los índices de calidad de agua presentados en la Tabla 5.1 y los resultados puntuales de los influentes y efluentes de cada parámetros en cada granja, se observa que los influentes de cada granja para los parámetros DQO, DBO₅ y SST, entran en la clasificación de “Agua fuertemente contaminada”, sin embargo, una vez terminado el tratamiento en cada biodigestor se observó un cambio dentro de la calidad del agua residual. Las granjas 1,2,3 y 4 mostraron una mejora en cuanto al parámetro DBO₅, teniendo un influente de fuertemente contaminado a uno “contaminado”; para el parámetro DQO, ninguna granja mostró un mejoramiento entre el índice de calidad en el influente y efluente, esto refleja que a pesar de contar con altas eficiencias de remoción, el agua residual aún se encuentra fuertemente contaminado.

Tabla 5. 1 Índices de calidad de Agua

DBO5		
Criterio mg/L	Clasificación	Color
$DBO5 \leq 3$	Excelente Muy Buena calidad	Azul
$3 < DBO5 \leq 6$	Buena calidad	Verde
$6 < DBO5 \leq 30$	Aceptable	Amarillo
$30 < DBO5 \leq 120$	Contaminada	Naranja
$DBO5 > 120$	Fuertemente contaminada	Rojo
DQO		
$DQO \leq 10$	Excelente Muy Buena calidad	Azul
$10 < DQO \leq 20$	Buena calidad	Verde
$20 < DQO \leq 40$	Aceptable	Amarillo
$40 < DQO \leq 200$	Contaminada	Naranja
$DQO > 200$	Fuertemente contaminada	Rojo
SST		
$SST \leq 25$	Excelente Muy Buena calidad	Azul
$25 < SST \leq 75$	Buena calidad	Verde
$75 < SST \leq 150$	Aceptable	Amarillo
$150 < SST \leq 400$	Contaminada	Naranja
$SST > 400$	Fuertemente contaminada	Rojo

Fuente: Semarnat, Comisión Nacional del Agua, Estadísticas del Agua en México, 1a edición, CNA, México, 2007

Por último, para el parámetro SST, todas las granjas mostraron mejoría en el índice de calidad, la granja 2, de “Fuertemente contaminada” a “contaminada”, las granjas 1 y 3 llegaron a un efluente con un índice de calidad “Aceptable” y para las granjas 4, 5 y 6 se obtuvo la clasificación de “Buena calidad”.

Esta diferencia de índices de los SST respecto a la DQO y DBO₅ se debe al tamaño de las partículas sólidas contenidas en el agua residual porcina, las cuales

presentaron una alta sedimentación llegando a porcentajes de remoción de 94% permitiendo un índice de mayor calidad que en otros parámetros.

En promedio las granjas de ciclo completo presentan una mayor concentración de DQO (5727 mg/L) en el influente en comparación a las de tipo de pie de cría (3664mg/L); este mismo comportamiento se ve reflejado para los SST (Ciclo completo: 2363 mg/L; Pie de cría: 1621 mg/L) y la DBO₅ (Ciclo completo: 1707 mg/L; Pie de cría: 1172 mg/L).

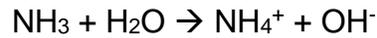
Debido a que las granjas 2 y 4 presenta la mayor cantidad de UPA y menor cantidad de agua utilizada al momento de lavado de corrales, presentaron la mayor concentración de DQO con 6580 y 8773 mg/L respectivamente, en comparación de las granjas 1,3,5 y 6. De la misma forma el factor de tipo de granja se hace evidente dado que en términos absolutos, la cantidad de peso vivo determina el volumen de excretas y por lo general son más en granjas de ciclo completo que en pie de cría, provocando una mayor concentración de materia orgánica (Pérez 2006).

5.2. Nutrientes

En la remoción de nutrientes, para el caso particular del fósforo, se obtuvieron valores desde el 53 hasta el 93% de eficiencia de remoción, lo cual es provocado en parte por la alta precipitación que presentan los ortofosfatos solubles producto de la degradación de polifosfatos presentes en el agua residual.

A diferencia del fósforo, se observa que el nitrógeno total Kjeldhal tiene una baja remoción, sin embargo, al corresponder a un tratamiento anaerobio no se presenta el proceso de nitrificación, el cual consiste en la oxidación del nitrógeno a nitrato. Por lo cual la remoción del nitrógeno orgánico solo se presenta por la asimilación de los microorganismos presentes dando como resultado una baja remoción del nutriente.

Al ser un producto natural de la descomposición de compuestos nitrogenados, el amoníaco está presente en las aguas residuales, éste, es un compuesto soluble lo cual provoca la interacción con el agua teniendo como resultado la siguiente reacción:



Las proporciones de amoníaco y de ion amonio en el agua residual, depende del pH, favoreciendo el desplazamiento a la derecha por un medio ácido y de caso contrario un pH alcalino provoca que la reacción se desplace a la izquierda, desprendiendo el amoníaco como gas.

Ya que se registraron valores de pH de 8 en los efluentes de los biodigestores, se infiere, que la remoción del amoníaco se debe a que el ion hidróxido abstrae un protón del ion amonio, generando amoníaco el cual termina como componente del biogás generado de la digestión anaerobia.

Así mismo, el cerdo genera una excreta con una elevada proporción de nutrientes por ser ineficiente en la asimilación. Sólo puede aprovechar el 33% de la proteína de la dieta consumida. El nitrógeno no absorbido se encuentra en las heces (16%) y en la orina (51%), luego el 34% se transforma en gas y un 32% se incorpora al suelo (BPP 2012).

5.3. Comparación de resultados

En la Tabla 5.2 se muestran valores típicos encontrados en la literatura, los cuales servirán de referencia para comparar los resultados.

Siendo factores que no son controlables dentro de esta investigación las que inciden en las variaciones entre los valores obtenidos y los reportados en la literatura, se encuentra el tipo y cantidad de sustrato usado en la alimentación de los cerdos, esto se debe al contenido de nutrientes, proteínas y minerales administrados dentro del alimento que llegan a influir en la composición C:N:P de la biomasa a tratar, teniendo como resultado alteraciones en la digestión anaerobia.

Tabla 5. 2 Comparación de las relaciones de los parámetros fisicoquímicos

Relación	Referencia	Valores	Granjas					
			1	2	3	4	5	6
DQO/COT	(Ramalho 1996)	2.6	2.6	2.8	1.8	3.4	2.4	1.9
DBO/DQO	(Ramalho 1996)+	0.7	0.33	0.32	0.58	0.28	0.37	0.4
	(Garzón-Zuñiga 2013)++	0.2-0.6						
C:N	(Guevara 1996)*	13:1	10:1	15:1	11:1	27:1	17:1	15:1
	(Alcayaga 1999)**	20-30:1						
SSV/SST	(Garzón-Zuñiga 2013)	0.7-0.9	0.8	0.7	0.85	0.9	0.8	0.7
+Relación DBO/DQO aguas residuales ++Relación DBO/DQO reportados de granjas porcinas								
*Relación C:N de residuos porcinos **Relación C:N para una digestión anaerobia óptima								

Otro factor se encuentra en las variaciones de operación de la propia granja, como frecuencia de bombeo, tiempo de retención, frecuencia de lavado de chiqueros, cantidad de agua utilizada, etc., que se hicieron evidentes en los muestreos.

La relación DBO/DQO no se encuentra de acuerdo a la indicada por Ramalho (1996) ya que la establecida por él es para aguas residuales domésticas y no específica de granjas porcinas. Los valores obtenidos en este estudio para las 6 granjas monitoreadas se encuentran en el rango de 0.28 a 0.58, lo que es coincidente con los valores reportados en el trabajo de investigación de Garzón-Zuñiga (2013), que también trabajó con agua porcícola. Este hecho se debe a que el agua porcícola tiende a ser menos biodegradable que las aguas residuales urbanas. Así mismo en la relación SSV/SST en este estudio se encuentran valores coincidentes con los reportados por Garzón-Zuñiga (2013).

En la relación C:N, los valores encontrados en este trabajo de investigación varían de 10:1 hasta 27:1, siendo este último valor el que se aleja de los otros que se encuentran más hacia el valor de la decena y al valor de referencia presentado por Guevara (1996) para el caso de residuos porcinos. La diferencia entre la literatura y este trabajo de investigación, radica en que en este trabajo la muestra está

compuesta de excretas y orina, mientras que la de Guevara (1996) presenta la relación C: N sólo de excreta porcina.

Alcayaga et al. (1999) mencionan que la relación C: N, reportada como la óptima para la digestión anaerobia, se encuentra en el rango de 20-30:1. Como ya se mencionó en el párrafo anterior, los valores obtenidos en el marco de esta investigación se encuentran en el rango de 10:1 a 27:1, de los cuales 5 de las granja muestran valores inferiores a 20 y solo para la granja 4 el valor fue de 27:1, lo que se relaciona a la presencia de una gran concentración de ácidos grasos volátiles.

5.4. Análisis estadístico de las eficiencias de remoción de materia orgánica de los biodigestores

La granja 3 presentó problemas de operación del biodigestor (Fugas en la membrana, bomba averiada, falta de bombeo etc), dando como resultado la falta de producción de biogás (Figura 5.1) y acumulación de lodo séptico en el efluente, por lo que se decidió omitir la granja 3 en los análisis estadísticos para evitar sesgos dentro de los resultados.



Figura 5. 1 Diferencia entre la cúpula de los biodigestores

A la izquierda se muestra un biodigestor funcional con la membrana inflada por el biogás. A la derecha se observa el biodigestor de la granja 3 sin producción de biogás.

Existen dos tipos de granjas en esta investigación: Pie de cría y Ciclo completo, para llevar a cabo la comparación entre las granjas se procedió a verificar si la variable independiente “Tipo de granja” es o no significativa en la variable respuesta “Eficiencia de remoción”.

Este análisis se realizó para los 9 parámetros físico-químicos que son: COT, DQOtotal, DQOsoluble, SST, SSV, DBO₅, P, NKT y NH₃ como variable respuesta.

Se verificó el comportamiento de distribución normal para cada variable respuesta eligiendo un análisis de varianza (ANOVA) al 90% de confianza con ayuda del software Statgraphics, los resultados se reportan en la Tabla 5.3.

Tabla 5. 3 ANOVA para el porcentaje de Remoción de materia orgánica por el tipo de granja.

Variable Respuesta- %Remoción	Valor-P
COT	0.027
DQOtotal	0.05
DQOsoluble	0.271
SST	0.783
SSV	0.944
DBO ₅	0.025
P	0.012
NKT	0.848
NH ₃	0.709

El análisis de varianza evalúa la hipótesis de que las medias del porcentaje de remoción de cada uno de los 2 niveles de tipo de granja sean iguales.

Si el valor-P es mayor o igual a 0.1, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias con un nivel de 90% de confianza.

En la tabla de ANOVA se observa que en los parámetros COT, DQOtotal, DBO₅ y P, existe una diferencia estadísticamente significativa entre los tipos de granja.

Dados los resultados obtenidos, se debe realizar el estudio de comparación entre las granjas porcícolas de cada tipo de granja.

Para conocer si existe o no diferencia entre las granjas de cada tipo se realizó un ANOVA (tabla 5.4), y como variable dependiente los porcentajes de remoción para cada parámetro y como variable independiente cada tratamiento (granja).

Tabla 5. 4 ANOVA al 90% de confianza para el porcentaje de Remoción de materia orgánica por granja.

Variable Respuesta %Remoción	Valor-P para el tipo de granja	
	Pie de cría	Ciclo completo
	Valor-P	Valor-P
COT	0.087	0.578
DQOtotal	0.33	0.441
DQOsoluble	0.513	0.386
SST	0.07	0.387
SSV	0.067	0.374
DBO ₅	0.079	0.649
P	0.356	0.312
NKT	0.008	0.043
NH ₃	0.6	0.87

De acuerdo a los valores registrados en la Tabla 5.4 las variables: DQOtotal, DQOsoluble, P y NH₃ no mostraron diferencia entre las 3 granjas de pie de cría, así mismo las variables: COT, DBO₅, SST, SSV y NKT mostraron una diferencia entre ellas.

Respecto a las granjas de ciclo completo (granja 2 y 4), operan de manera similar, respecto al tiempo de retención y carga orgánica volumétrica lo cual se puede verificar con el resultado del ANOVA presentado, ya que no muestran una diferencia significativa entre las eficiencias de remoción de materia orgánica, a excepción del NKT.

Dado que las granjas 2 y 4 no presentaron diferencia estadísticamente significativa entre ellas, a continuación se presenta un análisis para observar los grupos homogéneos para cada parámetro de las granjas de pie de cría, a continuación se muestran las gráficas de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para los parámetros que indican diferencia estadísticamente significativa.

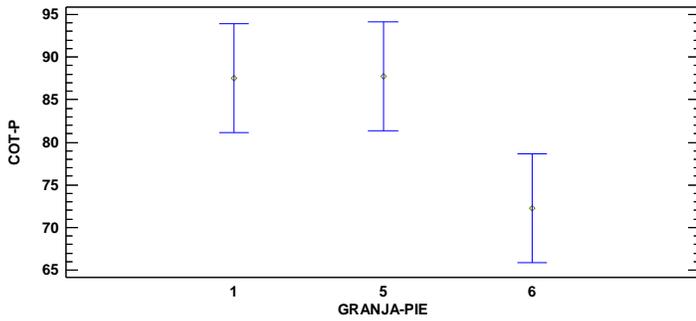


Figura 5. 2 Medias y 90% de Fisher LSD para COT

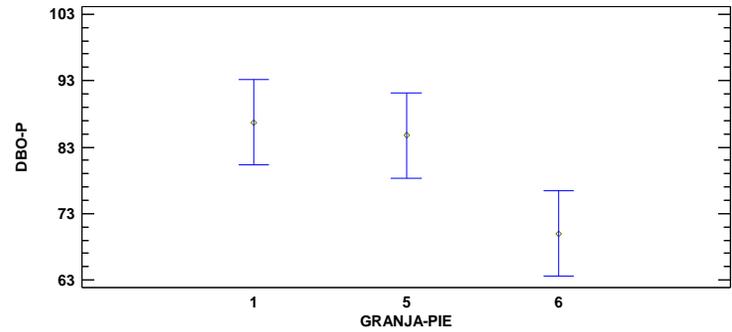


Figura 5. 3 Medias y 90% de Fisher LSD para DBO₅

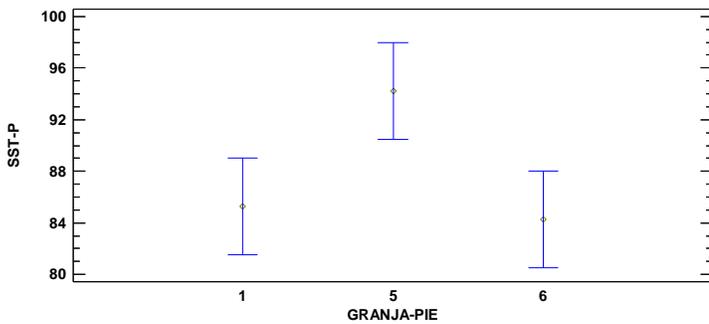


Figura 5. 4 Medias y 90% de Fisher LSD para SST

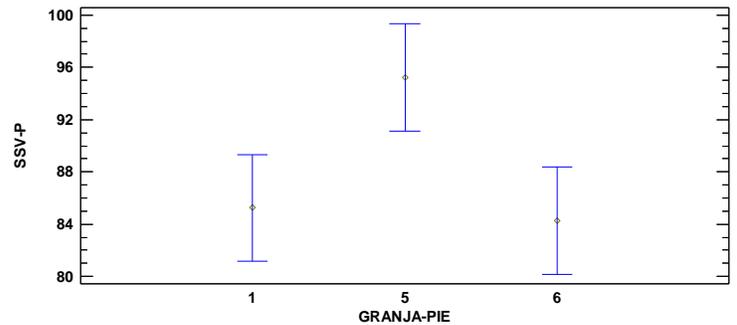


Figura 5. 5 Medias y 90% de Fisher LSD para SSV

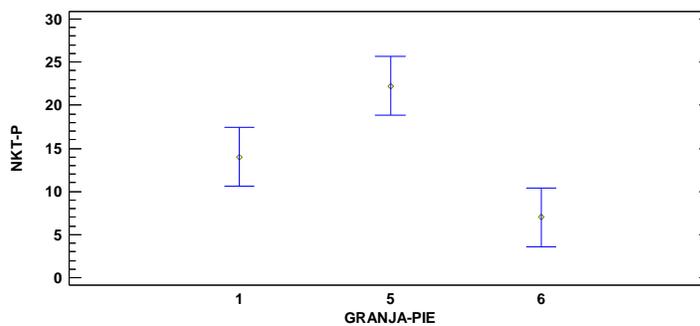


Figura 5. 6 Medias y 90% de Fisher LSD para NKT

Se observa que para los parámetros COT y DBO₅ se encuentran como grupo homogéneo la granja 1 y 5, esto se debe a los parámetros de operación de los biodigestores, ya que estas granjas presentan una carga orgánica volumétrica similar entre sí y un mayor tiempo de retención a diferencia de la granja 6, lo que es favorable para la digestión anaerobia ya que permite la disponibilidad de alimento para los microorganismos.

Para los parámetros de SST y SSV, se encuentra como grupo homogéneo las granjas 1 y 6, es debido a que en la granja 1, las tomas de muestras se realizaron en días de lavado afectando la variabilidad en el resultado de porcentaje de remoción de sólidos, así como se puede observar, la variación que presenta la granja 6 permite que las medias se traslapen y formen el grupo homogéneo.

Es importante conocer de manera general que la población de microorganismos es compleja y variable, los microorganismos metanógenos son organismos sumamente sensibles a cambios de pH, temperatura y concentración de ácidos grasos volátiles, los cuales intervienen para la remoción de materia orgánica y de nutrientes.

Para poder ver el efecto de los parámetros de operación de los biodigestores sin tomar en cuenta el tipo de granja, se eligieron las granjas 4 y 6 para poder realizar la comparación.

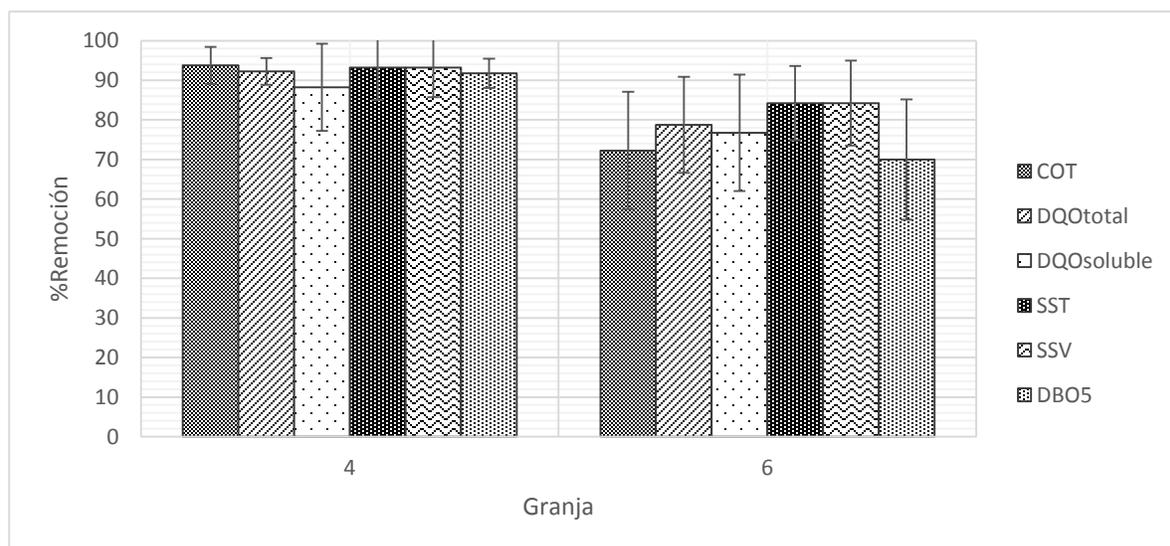


Figura 5. 7 Promedio de las eficiencias de remoción de materia orgánica de los biodigestores de la granjas 4 y 6

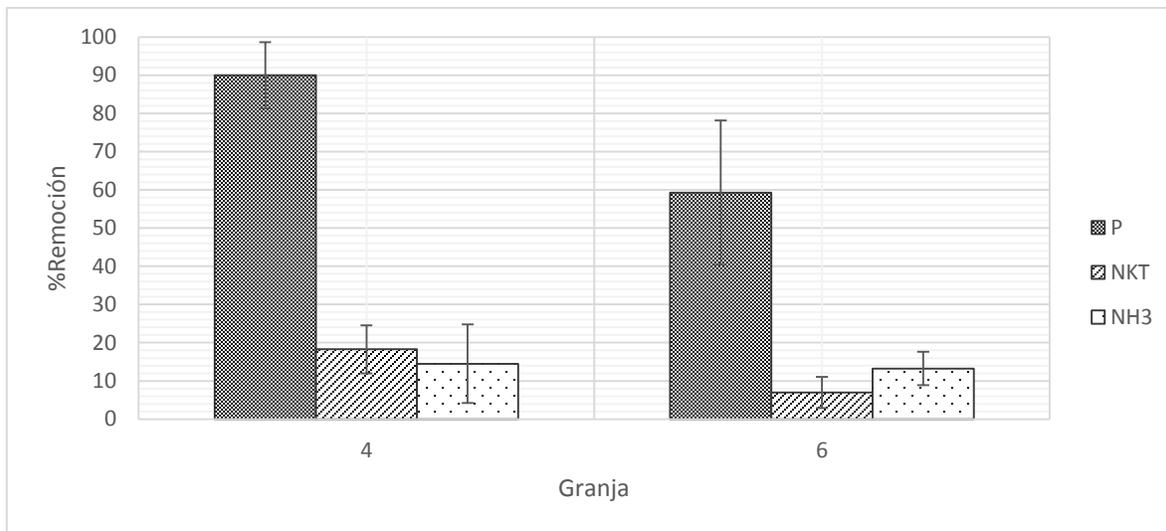


Figura 5. 8 Promedio de las eficiencias de remoción de nutrientes de los biodigestores 4 y 6

En la Figura 5.7 se observa que la granja 4 presenta mayor remoción de materia orgánica que la granja 6 debido a que ambas operan de manera muy diferente entre sí.

La granja 6, opera el biodigestor a un tiempo de retención de 2 días debido a una baja capacidad del volumen del cárcamo y del biodigestor y una carga orgánica diluida por el alto consumo de agua utilizado en el lavado de corrales.

Por otro lado en la granja 4 el biodigestor trabaja con un tiempo de retención de 24 días y el uso de agua de lavado es moderado en comparación a la granja 6, lo cual interfiere en el proceso de digestión anaerobia teniendo como resultado una mejor eficiencia de remoción de materia orgánica.

Sin embargo, para poder corroborar si existe una diferencia estadísticamente significativa en este caso y observar si la variación en los porcentajes de remoción de cada muestreo de las granjas influye estadísticamente, se realizó un análisis de varianza.

Tabla 5. 5 ANOVA al 90% de confianza para el porcentaje de Remoción de materia orgánica entre las granjas 4 y 6.

Variable Respuesta %Remoción	Valor-P
COT	0.032
DQOtotal	0.075
DQOsoluble	0.257
SST	0.198
SSV	0.218
DBO ₅	0.031
P	0.0254
NKT	0.024
NH ₃	0.829

Como se puede observar en la tabla anterior, no en todos los porcentajes de remoción mostraron diferencia estadísticamente significativa, por lo que se puede aseverar que la variación en las eficiencias para cada campaña influyó en los análisis estadísticos (Traslape entre los máximos y mínimos por la magnitud de la desviación estándar), indicando que para las variables DQOsoluble, SST, SSV y N-NH₃ no existe diferencia significativa, aun operando de manera diferente.

5.5. Regresión lineal para la remoción de materia orgánica y los parámetros de operación del biodigestor.

Es importante conocer la relación que existe entre los parámetros de operación de un biodigestor y la eficiencia de remoción de materia orgánica del mismo.

En la Tabla 5.6 se muestran los resultados obtenidos de los análisis de regresión lineal para las variables tiempo de retención (Tabla 4.3) y carga orgánica volumétrica puntual (Ver Anexo 3).

Tabla 5. 6 Regresión lineal al 90% de confianza para el Tiempo de retención (TRH) y COV

%Remoción	TRH			COV		
	Valor-P	R ²	Coefficiente de correlación	Valor-P	R ²	Coefficiente de correlación
COT	0.009	31.58	0.56	0.5507	2	0.14
DQOtotal	0.3637	4.6	0.214	0.6364	1.2	0.11
DQOsoluble	0.768	0.491	0.07	0.635	1.27	0.113
SST	0.939	0.032	-0.018	0.3526	4.81	0.21
SSV	0.827	0.272	-0.05	0.4716	2.9	0.17
DBO ₅	0.004	37.52	0.6126	0.5141	2.4	0.15

Para el tiempo de retención, se encontró que los porcentajes de remoción de COT y la DBO₅ el modelo explica un 31.58% y 37.52% de su variabilidad respecto al tiempo de retención, teniendo una relación estadísticamente significativa.

Para los otros parámetros, no se encontró relación significativa ya que los coeficientes de correlación indicaban una relación débil entre las variables.

Respecto a la carga orgánica volumétrica, no se encontraron relaciones estadísticamente significativas entre las variables respuestas y la variable independiente.

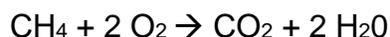
Estas relaciones pueden estar influenciadas por los datos obtenidos en las encuestas como la frecuencia de bombeo y el volumen del biodigestor.

Estos resultados contradicen a Ramalho (1996), quien afirma que los parámetros de operación de un biodigestor como el TRH y carga orgánica se encuentran correlacionadas con la eficiencia del proceso. Sin embargo, los resultados obtenidos de los análisis de regresión, sólo nos indican si para nuestro experimento las variables pueden ser explicadas por los parámetros de operación estudiados.

5.6. Análisis y estimación de la producción del Biogás

En términos generales, la digestión anaerobia, como se ha comentado anteriormente, es un proceso por el cual la materia orgánica es reducida por microorganismos convirtiendo la materia orgánica y otros compuestos, en biogás, el cual es una excelente fuente de energía para reemplazar combustibles provenientes del petróleo, teniendo un efecto positivo sobre la reducción de gases de efecto invernadero, siempre y cuando éste se presente en las composiciones adecuadas. Se realizaron 3 campañas para el estudio de la calidad del biogás en 5 biodigestores del estudio (1, 2, 4,5 y 6).

Así mismo, se realizaron cálculos para la estimación de producción del biogás, basados en el método de la DQO_{total} removida que consiste en asumir que toda la materia orgánica es completamente oxidada a CO₂ teniendo como relación (Viquez 2016):



1 mol de CH₄ = 22.4 L de CH₄ 2 mol O₂ = (16 x 4) = 64 gramos

$$\left(\frac{22.4 \text{ L CH}_4}{64 \text{ gramos O}_2 \text{ consumido}} \right) = 0.35 \text{ L } \frac{\text{CH}_4}{\text{gDQOremovido}}$$

A continuación, se muestran los resultados promedios obtenidos de la medición de calidad del biogás, así como su estimación en volumen.

Tabla 5. 7 Estimación del biogás y su calidad

Granja	CH ₄ %	CO ₂ %	Otros %	Biogás m ³	CH ₄ m ³	TR días
1	48.07	19.60	32.34	5144.82	2473.32	30.61
2	70.37	23.40	6.23	67137.13	46623.99	23.43
4	63.97	28.57	7.47	95495.01	61101.34	24.69
5	58.80	19.07	22.14	13748.59	8138.64	10.13
6	56.50	28.33	13.17	13602.96	8038.48	2.72

Los valores reportados en porcentaje son los promedios de las mediciones en las campañas. Para más información de los valores puntuales ver ANEXO 4.

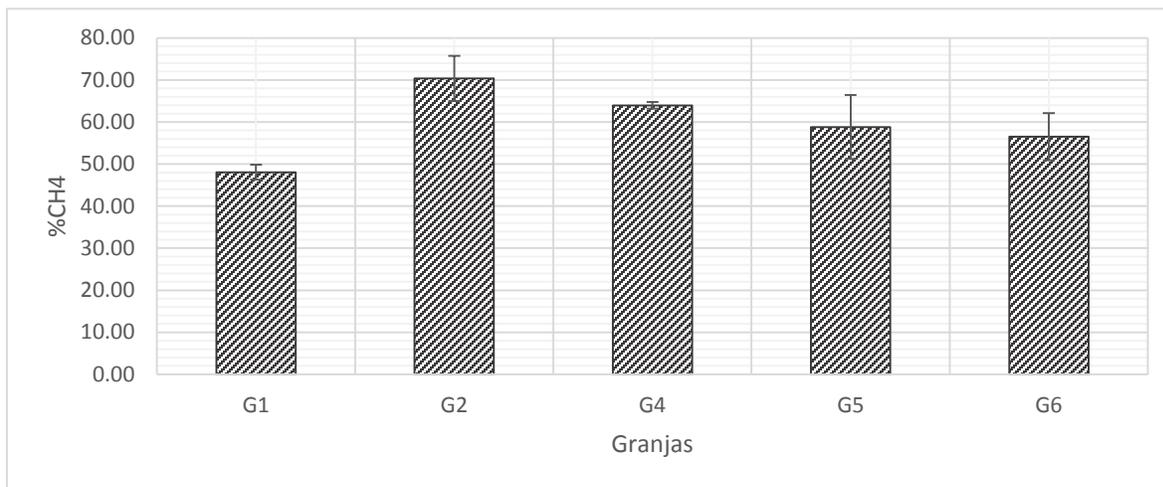


Figura 5. 9 Calidad del biogás en porcentaje de metano en los biodigestores

En la Figura 5.9, se observa la variación del porcentaje de metano obtenido en los 5 biodigestores.

Con los datos disponibles se puede inferir que los biodigestores que trabajan con un tiempo de retención prolongado (mayor a los 23 días), las bacterias consumen toda la materia biodegradable presente, deteniendo el proceso por falta de alimentación.

Por el contrario, tiempos de retención bajos en comparación con el de la granja 2, impiden la reproducción adecuada de las bacterias metanogénicas, cuya velocidad de regeneración es muy baja frente a la de las bacterias acidogénicas, produciéndose el fenómeno de lavado del digestor, es decir, el arrastre de las bacterias con el efluente antes de que se puedan reproducir.

Así mismo, se detectó la presencia de H₂S en el biogás de los 5 biodigestores, esto fue evidente por la oxidación de la cámara de quemado de gas, el olor característico a huevo podrido y por la detección del equipo utilizado para la medición de la calidad del biogás.



Figura 5. 10 Cámara de gas oxidada por la presencia de H_2S

5.7. Análisis Estadístico para la calidad de biogás

El biogás es una mezcla de gases cuya composición varía de acuerdo a la proveniencia de la biomasa (Pedroso 2007). Sin embargo, los biodigestores analizados contienen el mismo sustrato, agua residual porcina; pero con características diferentes ya que para las granjas de pie de cría suelen utilizar una mayor cantidad de agua de lavado para los corrales obteniendo un sustrato más diluido que las granjas de tipo ciclo completo, por lo que se considera el tipo de granja como un parámetro para analizar.

A continuación, se muestra el análisis de varianza con el 90% de confianza realizado para la variable respuesta “Porcentaje de CH_4 ” y la variable independiente “Tipo de granja”.

Tabla 5. 8 ANOVA al 90% de confianza para %CH4 por Tipo de granja

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	581.66	1	581.66	10.44	0.0066
Intra grupos	724.356	13	55.7197		
Total (Corr.)	1306.02	14			

Puesto que el valor-P es menor a 0.1 nos indica que hay diferencia estadísticamente significativa del porcentaje de metano en los 2 diferentes tipos de granja, lo cual se concluye que el tipo de granja es un factor ligado a la biomasa la cual influye en la calidad del biogás coincidiendo con Pedroso (2007).

En la Figura 5.11 se muestra el resultado del método de la diferencia mínima significativa de Fisher (LSD) donde se muestra que el tipo de granja ciclo completo presenta un mayor porcentaje de metano en el biogás, esto es debido a que los biodigestores de este tipo de granja operan de manera similar con tiempos de retención superiores a los de pie de cría así como menor volumen de agua de lavado lo que propicia una carga orgánica más concentrada lo que favorece el proceso de digestión anaerobia.

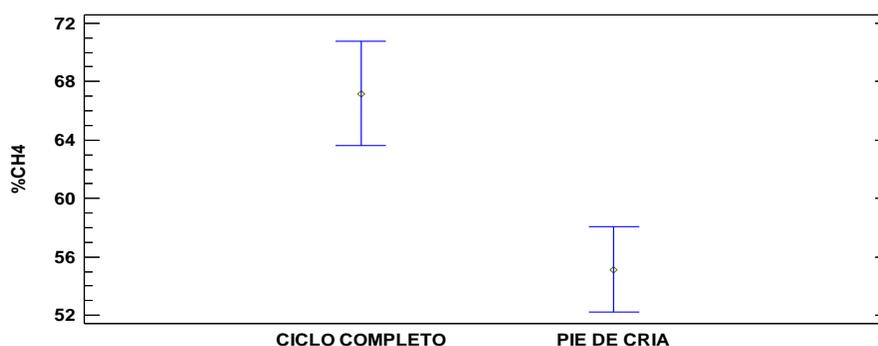


Figura 5. 11 Medias y 90% de Fisher LSD para Tipo de granja

Dado los resultados de la ANOVA por tipo de granja, se realizaron análisis de varianza para cada tipo de granja, con el fin de observar si existe o no diferencia entre un biodigestor y otro.

Tabla 5. 9 ANOVA al 90% de confianza para %CH₄ entre las granjas del mismo tipo

Tipo de granja	Valor-P
Pie de cría	0.1677
Ciclo completo	0.1460

Puesto que el valor-P para ambos análisis es mayor a 0.1 nos indica que no hay diferencia estadísticamente significativa del porcentaje de metano (CH₄) entre las granjas de cada tipo.

5.8. Regresión múltiple de los parámetros de operación y la calidad de metano en el biogás.

En el apartado anterior, se observó que el tiempo de retención y el tipo de granja son parámetros que pueden influir en el porcentaje de metano en el biogás, por lo tanto, se realizó un análisis de regresión múltiple quedando de la siguiente manera:

Tabla 5. 10 Diseño del análisis de regresión múltiple del biogás

Variable dependiente	Variables independientes
Porcentaje de metano	Tiempo de retención (TR)
	Tipo de granja*
*Se otorgó el valor 1 a las granjas de tipo pie de cría y 2 para ciclo completo	

En la siguiente tabla se muestra el resultado del análisis de regresión múltiple a un 90% de confianza.

Tabla 5. 11 Análisis de regresión múltiple del biogás

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	43.5071	5.43768	8.00105	0.0000
TRH	-0.35875	0.193363	-1.85532	0.0883
TIPO DE GRANJA	16.1455	4.05667	3.98	0.0018

Tabla 5. 12 ANOVA al 90% de confianza del modelo de regresión múltiple del biogás

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	743.126	2	371.563	7.92	0.0064
Residuo	562.89	12	46.9075		
Total (Corr.)	1306.02	14			

R-cuadrada = 56.9002 %

R-cuadrado (ajustado para grados de libertad.) = 49.7169 %

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre %CH₄ y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\%CH_4 = 43.5071 - 0.35875 \cdot TRH + 16.1455 \cdot TIPO DE GRANJA$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0.1, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 90.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 56.9002% de la variabilidad en %CH₄

VI. CONCLUSIONES

- Las granjas de tipo ciclo completo presentaron en promedio una mayor concentración de materia orgánica en el influente en comparación a las de pie de cría (Ciclo completo-DQO de 5727 mg/L; pie de cría -DQO de 3664mg/L)
- El tipo de granja es un factor que influye en el porcentaje de remoción de materia orgánica
- Durante el periodo de estudio, se observó que la granja 3 no operaba de manera adecuada, siendo la única granja sin producción de biogás.
- Ninguna granja cumplió con los lineamientos establecidos en las normas ambientales en materia de agua residual.
- Se obtuvieron índices de buena calidad en el tabulador de CONAGUA en el efluente respecto a SST en las granjas 4, 5 y 6. Los biodigestores empleados en las granjas de pie de cría, mostraron grupos homogéneos dentro del análisis de varianza para los porcentajes de remoción de materia orgánica.
- Los biodigestores empleados en las granjas de ciclo completo no mostraron diferencia estadísticamente significativa entre ellas.
- La granja 4 mostró mejores remociones de materia orgánica siendo ésta la granja que utilizó un volumen de 27 L/UPA para lavado de corrales, un tiempo de retención de 24 días y una carga orgánica volumétrica elevada de 4386 kg DQOtotal / (m³ día), en comparación con las demás granjas.
- Se obtuvieron relaciones débiles en un análisis de regresión lineal entre los parámetros de operación tiempo de retención y carga orgánica volumétrica con el porcentaje de remoción de materia orgánica
- Los análisis de regresión lineal son afectados por la insuficiencia de datos disponibles con que se contaban sobre todo para determinar el volumen

efectivo de reacción al interior de los biodigestores así como tiempo y la frecuencia de bombeo en la alimentación.

- El tipo de granja es un factor ligado a la biomasa la cual influye en la calidad del biogás (% de Metano).
- Entre los biodigestores de cada tipo de sistema productivo de granja, no se presentaron diferencias respecto al porcentaje de metano producido.
- Para este estudio, la variable calidad de biogás (Porcentaje de metano) queda explicada a un 56.9% por las variables tipo de granja y tiempo de retención.

VII. RECOMENDACIONES

7.1. Continuación del estudio

- Realizar análisis de actividad metabólica e identificación de la flora microbiana de los lodos.
- Monitoreo frecuente a los biodigestores
- Controlar las variables de operación del biodigestor
- Medición de compuestos orgánicos durante el proceso de digestión anaerobia
- Estudios de sustancias potencialmente inhibidoras como fármacos, metales y detergentes en el agua residual porcina.
- Estudio Bioquímico en las aguas residuales

7.2. Manejo de biodigestores

- Emplear un sistema de separador de sólidos para evitar el ingreso de materiales no deseados como trozos de madera, alambres, piedras, arena, plásticos, alimento, etc. que puedan afectar a la degradación del sustrato.
- Instalación de temporizadores para el control del bombeo del cárcamo de recepción de aguas de lavado de los corrales de las granjas.
- Mantenimiento a la membrana de recubrimiento del biodigestor para evitar posibles fisuras

- Realizar una purga de lodos periódicamente, con el fin de evitar la acumulación de lodos dentro del biodigestor
- Cambiar los filtros para el H₂S en las tuberías donde el biogás es transportado.
- Uso eficiente del agua en los corrales

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Alcayagas S., Glaria J., Guerrero L., (1999). Regulaciones de temperatura y potencial de hidrógeno en un biodigestor anaerobio de lecho de lodo granular expandida. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso.
- Dapena J. L ;Ronzano E. (1995). Tratamiento biológico de las aguas residuales. Madrid
- García G. S. (2011) Centrales termoeléctricas de biomasa Volumen 1. Renovetec.
- Garzón-Zuñiga M., Buelna G.(2013) Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. México
- Guevara V., A.; (1996). Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Producción de gas y saneamiento de efluentes. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente – Organización Panamericana de la Salud. (Lima).
- GTZ-CVC-OEKOTOP. (1987). Difusión de la tecnología del biogás en Colombia. Cali, Colombia. (Proyecto. Cali).
- Hansen, K. H.; Angelidaki, I.; Ahring, B. K.(1998). Anaerobic digestion of swine manure: inhibition by ammonia. In Elsevier
- Hilbert, J.A. (2008). Manual de la producción de biogás. Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar.

- INEGI. (2007) VII Censo Agrícola-Ganadero. Sistema de consulta electrónica tabulada. Yucatán, México
- Information and advisory service on appropriate technology. Gtz project. (2004) Biogas Digest. Volume I. Biogas Basics.
- Information and advisory service on appropriate technology. Gtz project. (2004) Biogas Digest. Volume II. Biogas – Application and Product Development.
- Lansing, S.; Víquez, J.; Martínez, H.; Botero, R.; Martin, J.(2008). Quantifying electricity generation and waste transformations in a low-cost, plug-flow anaerobic digestion system. In Elsevier.
- Ley Federal de Derechos. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 31 de diciembre de 1981. México.
- Méndez Novelo, R, Castillo Borges, E., Vázquez Borges, E., Briceño Pérez, O., Coronado Peraza, V., Pat Canul, R. y Garrido Vivas, P. (2009). Estimación del potencial contaminante de las granjas porcinas y avícolas del estado de Yucatán. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 13-2, pp. 13-21, ISSN: 1665-529X.
- Morales F., Moreno, (2004). Bioagricultura Casa Blanca (finca de producción, investigación y capacitación en agricultura ecológica y agroecoturismo). Lote 20. Lima, Perú
- NOM-001-SEMARNAT-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 24 de diciembre de 1996.
- NOM-003-SEMARNAT-1997. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 21 de septiembre de 1998.
- Olaya Y. (2006). Diseño de un biodigestor de cúpula fija. Trabajo de Grado, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira.

- Olaya Y. (2009). Fundamentos para el diseño de biodigestores. Modulo para la asignatura de construcciones Agrícolas, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). 2012. Manual de Buenas Prácticas Pecuarias (BPP) para la producción y comercialización porcina familiar.
- Pedroso, P. (2007). Potencialidades para la producción de biogás en entidades y asentamientos poblacionales del Municipio Viñales. Cuba
- Pfeffer J.T.(1974). Temperature effects on anaerobic fermentation of domestic refuse. Bioeng and Biotech.
- Pérez E. R. (2006) Granjas porcinas y medio ambiente;Contaminación del agua en la piedad, Michoacán. México.
- Ramalho R.S.(1996) Tratamiento de aguas residuales. Ed.Reverté
- Rittmann B. E., & McCarty P. L. (2001). Environmental biotechnology: Principles and applications International ed. McGraw Hill. Singapur
- Rowse L. E. (2011). Design of Small Scale Anaerobic Digesters for Application in Rural Developing Countries. Trabajo de grado, Universidad del Sur de Florida.
- Safley Jr. (1988). Biogas production from anaerobic lagoons. Biological wastes.
- SEDUMA. (2012-2018). Noticias. Entrega formal de biodigestores a granjas porcícolas. Mérida, Yucatán, México. Recuperado de: <http://www.seduma.yucatan.gob.mx/noticias/noticia-consultar.php>
- Sosa R., Díaz Y. M., Cruz, Tamara., de la Fuente J.L. (2014).Diversificación y perspectivas de la digestión anaerobia en la porcinocultura cubana. “Revista Cubana de Ciencia Agrícola”. vol. 48.
- SEMARNAT, CONAGUA. (2007). Estadísticas del agua en México. 1^{ra} edición. México.

- Speece. R.E (1982). Review-Environmental requirements for anaerobic digestion of biomass. In: Advances in solar energy: an annual review of research and development. Philadelphia
- Standard Methods (1995). For the examination of water and wastewater. Ed.19.
- Tchobanoglous G., Burton F. L., Y Stensel H. D. (2003). Wastewater engineering: Treatment and reuse. McGraw Hill. New York, NY.
- Vesilind P. A. (1998). Wastewater treatment plant design (4th ed.). USA: IWA Publishing and the Water Environment Federation. London, UK and Alexandria, VA.
- Viquez A. J. (2013). Alternativa eficiente para remover nitrógeno de aguas residuales en granjas porcinas. Revista No. 63 UTN informa al sector agropecuario
- Viquez J. (2016). Producción de biogás. En “Memorias del congreso Biodigestores: Contribuyendo al Desarrollo Bajo en Emisiones”, Red de Biodigestores para Latino América y el Caribe, San José, Costa Rica.
- Zacari S. M (2003). Removal of hydrogen sulfide from biogas using cow-manure compost. New York.

IX. ANEXOS

ANEXO 1. Encuesta sobre el manejo de aguas residuales y parámetros de operación del biodigestor en las granjas porcícolas de Yucatán

MUNICIPIO:

NOMBRE DE LA GRANJA:

RESPONSABLE:

1. TIPO DE GRANJA

CICLO COMPLETO PIE DE CRÍA ENGORDA

2. POBLACIÓN DE CERDOS

TOTAL:

VIENTRES:

DESTETES:

ENGORDA:

MACHOS:

OTROS:

3. ¿SE ADMINISTRAN FÁRMACOS PARA LA PREVENCIÓN O TRATAMIENTO DE ENFERMEDADES? SI NO

4. ¿SE USAN DETERGENTES, DESINFECTANTES O SANITIZANTES PARA EL LAVADO DEL CHIQUERO? DE SER ASÍ, ¿CUÁLES USA?

5. HAY PRODUCCIÓN DE BIOGÁS SI NO

6. FRECUENCIA DE QUEMA DE BIOGÁS

7. ¿CUÁNTA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS PRESENTA?

8. TIEMPO QUE LLEVA OPERANDO EL BIODIGESTOR _____ AÑOS Y _____ MESES

9. TIEMPO DE BOMBEO FOSA RECEPTORA

10. FRECUENCIA DE BOMBEO

11. TIEMPO DE RESIDENCIA DEL BIODIGESTOR

12. CANTIDAD DE AGUA PROMEDIO UTILIADA POR LAVADO DE EXCRETAS Y CERDOS (POR DÍA, MES O BIMESTRAL)

13. FRECUENCIA DE LAVADO DE LOS CHIQUEROS

14. FORMA DE LAVADO DE EXCRETAS

MANGUERA

ASPERSORES

OTRO

15. ¿SE CUENTA CON REJILLAS, CANALETAS O TUBERIAS PARA EL AGUA RESIDUAL?

16. ¿EL SISTEMA CUENTA CON SEPARADOR DE SÓLIDOS O GRASAS? (CRIBAS, FILTROS)

ANEXO 2. Tablas de resultados de las eficiencias de remoción de los parámetros fisicoquímicos

Campañas		Variable Respuesta								
Granja	Muestreo	%COT	%DQO Total	%DQO soluble	%SST	%SSV	%DBO ₅	%P	%NKT	%N-NH ₃
2	1	94	93	76	62	51	92	90	6	12
	2	88	91	84	95	94	87	84	12	7
	3	96	93	92	88	90	95	89	12	21
	4	90	81	76	95	95	88	65	7	14
	Media	92	89.5	82	85	82.5	90.5	82	9.2	13.5
	Desv.	3.6	5.7	7.6	15.6	21.1	3.7	12	3.2	6
3	1	92	66	73	70	75	75	57	28	11
	2	76	66	56	74	77	92	65	23	7
	3*	62	39	78	80	80	68	48	35	16
	4	67	93	85	56	68	66	58	28	11
	Media	74.3	66	73	70	75	75.3	57	28.5	11.3
	Desv.	13.2	22	12.4	10	5	12	7	5	3.7
4	1	94	88	95	81	82	92	77	24	20
	2	97	95	91	96	96	92	95	23	4
	3	97	91	72	97	97	96	94	15	8
	4	87	95	95	99	98	87	94	11	26
	Media	93.7	92	88	93	93	92	90	18.2	14.5
	Desv.	4.7	3.4	11	8.2	7.5	3.7	8.6	6.3	10.2
*Valores estimados por falta de muestreo debido a las condiciones del biodigestor										

Campañas		Variable Respuesta								
Granja	Muestreo	%COT	%DQO Total	%DQO soluble	%SST	%SSV	%DBO ₅	%P	%NKT	%N-NH ₃
1	1	95	93	79	88	88	93	74	16	10
	2	85	80	88	82	84	87	80	16	10
	3	90	86	82	84	85	89	56	17	11
	4	80	68	60	87	84	78	82	7	26
	Media	87.5	81.7	77.2	85.25	85.2	86.7	73	14	14.25
	Desv.	6.4	10.6	12	2.7	1.8	6.3	12	4.6	7.8
5	1	83	88	87	91	95	82	61	32	23
	2	83	92	83	94	94	82	89	18	12
	3	94	90	90	97	97	92	82	21	28
	4	91	86	81	95	95	83	63	18	10
	Media	87.5	89	85.2	94.2	95.2	84.7	74	22	18.25
	Desv.	5.6	2.5	4	2.5	1.2	4.8	14	6.6	8.6
6	1	69	87	93	72	69	65	40	10	15
	2	87	86	82	83	86	85	85	4	7
	3	80	81	74	88	88	79	53	3	17
	4	53	61	58	94	94	51	59	11	14
	Media	72.2	78.7	76.7	84.25	84.25	70	59	7	13.2
	Desv.	14.8	12.1	14.7	9.3	10.7	15.2	19	4	6.8

ANEXO 3. Carga orgánica volumétrica puntual de las 4 campañas

Valores puntuales de la carga orgánica volumétrica						
Muestreo	Granjas					
	1	2	3	4	5	6
1	4718	2665	808.5	3837	5785	5441
2	4018	5626	914	7463.5	4761	3316
3	2863	2418.5	1092.5	2865	3574	1752
4	4371	2452	841	3380.5	2171	1207

Las unidades están en Kg de DQO/m³ día

ANEXO 4. Resultados puntuales de la medición de calidad de biogás

Composición del biogás de cada campaña				
Granja	Muestreo	%CH ₄	%CO ₂	%Otros
1	1	50.2	17.6	32.2
	2	48	19.2	32.8
	3	46	22	32
	4	47	20	33
2	1	67.8	21.7	10.5
	2	77.3	20.9	1.8
	3	66	27.6	6.4
	4	66	26	8
4	1	63.9	25.3	10.8
	2	63	28	9
	3	65	32.4	2.6
	4	64	28	8
5	1	58	13	29
	2	68.4	29.2	2.4
	3	50	15	35
	4	56	13	31
6	1	63	30	7
	2	62	31	7
	3	50.5	24	25.5
	4	58	28	14