

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS “CARLOS RAFAEL RODRIGUEZ”
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO



Título: Propuesta tecnológica de un biodigestor para la producción de biofertilizante y electricidad con el tratamiento de residuales en una unidad porcina.

Autor: Carlos E. Rodríguez Grave de Peralta.

Tutor: MsC. Alejandro Valdés López.

Cotutor: Dr. C. José P. Monteagudo Yanes.

Año 63 de la Revolución
Cienfuegos, 2021

Pensamiento

*El mundo es un buen sitio y vale la pena
luchar por él.*

Ernest Hemíngway.

Dedicatoria

A mí mamá, por ser la persona más importante en mi vida, por todo su constante esfuerzo, sacrificio, comprensión y apoyo, por estar a mi lado en todo momento, y por ser la fuerza que me inspira a lograr grandes metas.

Y en memoria de mi abuela, que donde quiera que estés siempre te llevaré conmigo.

Agradecimientos

A mi madre: le doy las gracias por ser la mejor madre del mundo, por haberme dado la mejor educación; un hogar lleno de amor donde crecer, aprender y adquirir los valores que hoy definen mi vida, por ser mi ejemplo de superación y por haberme apoyado en este largo trayecto de sacrificio y dedicación, sin ti mima; este resultado no hubiera sido posible. Te quiero y adoro con la vida.

A mis amigos: les doy las gracias a Jorgito, Angelito, Luis, Maikel, José y Henry por estar unidos en todo momento, por ser un gran apoyo en esta trayectoria de estudio, sacrificio, y dedicación. También quiero agradecer a todos mis compañeros de aula por prestarme su ayuda en determinados momentos, a todos y cada uno muchas gracias.

A mis tutores: Alejandro y Pepe que han contribuido a mi formación profesional y me han regalado gran parte de su tiempo apoyando y aportando elementos que sin duda fueron decisivos en la confección de este trabajo, muchas gracias.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	6
1.1 Generalidades sobre los fertilizantes.	6
1.1.1 Importancia de los Fertilizantes.....	9
1.2 Generalidades sobre la gestión de residuos.....	10
1.2.1 Residuos orgánicos y su potencial como fertilizantes.....	13
1.3 Abonos Orgánicos (Biofertilizantes).	13
1.3.1 Clasificación de los abonos orgánicos.	15
1.3.2 El estiércol como abono orgánico.....	16
1.4 Generalidades sobre la producción de biogás y biofertilizantes	18
1.4.1 El proceso de digestión anaerobia.	18
1.4.2 Productos finales de la digestión anaerobia.	19
1.4.3 Composición química del biogás.....	19
1.4.4 Codigestión de residuos orgánicos.	19
1.4.5 El biogás por descomposición anaerobia.	20
1.4.6 Conceptos básicos sobre plantas de biogás.	21
1.4.7 Descripción de tipo de plantas de biogás.	21
1.4.8 Aplicaciones del biogás.	22
1.5 Sistemas de tratamiento de residuales.....	22
1.5.1 Tratamiento de los residuales porcinos.....	22
1.5.2 Plantas de tratamiento de residuos.....	23
1.5.3 Sistemas de lagunas de estabilización.....	24
1.5.4 Biodigestores anaerobios.	24
1.6 Lechos de Secado.....	28
1.6.1 Mecanismos de deshidratación de lechos.	29
1.6.2 Factores que afectan el rendimiento.	30
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
2.1 Descripción de la Empresa Porcina de la provincia de Cienfuegos.	31
2.1.1 Macrolocalización de la Empresa Porcino Cienfuegos.	31
2.1.2 Estructura organizativa de la Empresa Porcina Cienfuegos y sus Unidades Empresariales de Base.	32
2.1.3 Unidad Empresarial de Base Integral N°1 Porcino Cienfuegos.....	32

2.1.4 Distribución de la Unidad Integral N°1.	32
2.1.5 Descripción del proceso productivo de la Unidad Integral N°1.	32
2.1.6 Manejo de Portadores.....	33
2.1.7 Caracterización de los residuales de la Unidad Integral N°1.....	33
2.1.8 Sistema de recolección de residuales de la Unidad Integral N°1.	35
2.1.9 Estudio del módulo para 5 300 cebas.	36
2.2 Diagrama heurístico de la metodología propuesta.	37
2.3 Desarrollo de la metodología de diseño de biodigestor tropicalizado y sistema de aprovechamiento de residuales en la empresa porcina UEB Integral N°1.	38
2.3.1 Especificaciones del tanque de alimentación.	38
2.3.2 Caudal de diseño	38
2.3.3 Volumen útil del tanque de alimentación.	39
2.3.4 Volumen total del tanque de alimentación.	39
2.4 Especificaciones del biodigestor tropicalizado tipo laguna de lecho tapado.	39
2.4.1 Selección del tiempo de retención hidráulico.	39
2.4.2 Carga diaria para alimentar al biodigestor.....	40
2.4.3 Construcción de la laguna para el biodigestor.	40
2.4.4 Muro perimetral para sujetar la membrana de cubierta.....	43
2.4.5 Material para la cubierta del biodigestor.	44
2.5 Especificaciones de los lechos de secado.	45
2.6 Indicadores de producción de biogás del sistema de biodigestión.	45
2.7 Estructuras auxiliares.	46
2.7.1 Tuberías de alimentación y descarga.	46
2.7.2 Pozo de control del efluente del biodigestor.....	46
2.7.3 Tuberías de captación de biogás.	47
2.7.4 Antorcha o quemador de biogás.	49
2.7.5 Medidor de caudal de biogás.	50
2.8 Estado de la instalación del biodigestor tropicalizado.....	51
2.8.1 Diagrama de flujo de la planta.	51
2.8.2 Descripción de la instalación.	52
2.9 Evaluación Económica de la propuesta tecnológica.....	53
2.9.1 Evaluación económica de la solución propuesta.	53
2.9.2 Ingreso por venta biofertilizante sólido.....	53
2.9.3 Ingresos por producción de electricidad.....	54
2.9.4 Metodología para la evaluación económica de la solución propuesta.	55

2.9.5 Métodos para la evaluación financiera de proyectos de inversión:	56
CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
3.1 Especificaciones del tanque de alimentación.	59
3.2 Cálculo del caudal de diseño.	59
3.3 Cálculo del volumen útil.	60
3.4 Cálculo del volumen total del tanque de mezclado.	60
3.5 Construcción de la laguna para el biodigestor.	61
3.5.1 Cálculo de las dimensiones del biodigestor.....	61
3.6 Cálculo de los indicadores de producción de biogás del sistema de biodigestión.	63
3.7 Cálculo de la potencia del motor de los agitadores en los sistemas de agitación.	63
3.8 Cálculo del volumen de la antorcha o quemador de biogás.....	64
3.9 Evaluación económica de la propuesta tecnológica.	65
3.9.1 Ingreso por venta biofertilizante sólido.....	65
3.9.2 Cálculo de los ingresos por producción de electricidad.	66
3.9.3 Metodología para la evaluación económica de la solución propuesta.	69
CONCLUSIONES	72
RECOMENDACIONES	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	i
ANEXOS.....	xii

Resumen

RESUMEN

En el contexto contemporáneo la producción de biofertilizantes es de especial interés debido al potencial de este producto para suplir las crecientes necesidades de los productores agrícolas. En este sentido el proceso de biodigestión para la producción de biofertilizantes, biogás y electricidad es de los más atractivos una vez que se obtienen productos con valor agregado a la vez que se tratan residuos con elevados potenciales impactos ambientales. Por ello, el objetivo del presente trabajo fue elaborar una propuesta tecnológica para la instalación de una planta de biogás a partir de los residuos porcinos en la UEB Integral # 1 de la Empresa Porcina Cienfuegos. Se seleccionó la tecnología y se realizaron los cálculos correspondientes en el equipamiento adaptado a las condiciones tropicales cubanas; así como un análisis de los indicadores dinámicos de rentabilidad de la propuesta tecnológica. Se comprobó que para tratar las excretas de 5 300 cerdos de ceba se requiere un biodigestor tropicalizado de lecho tapado de 1 717, 2 m³ de volumen lo que permite obtener 416 t/año de biofertilizante y generar 250 425 kWh de electricidad en el año. Se comprobó que la tecnología seleccionada es factible económicamente por que con una inversión inicial de \$188 570.00, proporciona un VAN de \$482 468.25, una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 26 % y un Período de Recuperación de la Inversión (PRI) de cuatro años.

Abstract

ABSTRACT

In the contemporary context, the production of biofertilizers is of special interest due to the potential of this product to meet the growing needs of agricultural producers. In this sense, the biodigestion process for the production of biofertilizers, biogas and electricity is one of the most attractive, once value-added products are obtained while treating waste with high potential environmental impacts. Therefore, the objective of this work was to develop a technological proposal for the installation of a biogas plant from pig waste in the UEB Integral # 1 of the Empresa Porcina Cienfuegos. The technology was selected and the corresponding calculations were made on the equipment adapted to Cuban tropical conditions; as well as an analysis of the dynamic profitability indicators of the technological proposal. It was found that to treat the excreta of 5,300 fattening pigs, a tropicalized biodigester with a covered bed of 1 717,2 m³ volume is required, which allows obtaining 416 t /year of biofertilizer and generating 250 425 kWh of electricity per year. The selected technology was found to be economically feasible because with an initial investment of \$ 188,570.00, it provides a NPV of \$ 482,468.25, an Internal Rate of Return (IRR) of 26% and a Payback Period of Investment (PBP) of four years.

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

La producción de alimentos a nivel mundial alcanza los 6 500 millones de toneladas, según datos de la FAO en 2012. Esta producción busca satisfacer las necesidades de la población mundial que alcanzó los 7 000 millones en 2011. En la producción de los bienes agrícolas, participan varios insumos destacándose por su importancia los fertilizantes (Sánchez Navarro & Lis-Gutiérrez, 2016).

La estadística mundial recopilada por la Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes (IFA, por sus siglas en inglés) muestra claramente cómo se ha comportado el uso de los fertilizantes químicos en el mundo, que en 1961 ascendió a 31,7 millones de toneladas y en 2015 sumó 183,9 millones de toneladas. Esto significa que en 55 años el consumo mundial de fertilizantes se multiplicó casi seis veces. (Guzmán Flores, 2018). En cuatro países se concentra más del 60 % del consumo: China, India, Estados Unidos y Brasil, de ellos solo China es superavitario en su producción de fertilizantes químicos, por lo que el resto tiene que importar fertilizantes. El 58 % de la producción de éstos se concentra en seis países: China, India, Estados Unidos, Canadá, Rusia y Bielorrusia, siendo todos ellos exportadores de fertilizantes, a los que se suman países que si bien producen cantidades menores se han especializado en la exportación, como son Alemania, Bélgica, Países Bajos, Marruecos, Egipto, Uzbekistán, Chile, Arabia Saudita, Lituania, Jordania y Qatar (Guzmán Flores, 2018).

En Cuba después de 1959 la agricultura se basó en el modelo de la Revolución Verde y se importa el mayor porcentaje de los insumos necesarios para la producción agrícola. Como consecuencia se desarrolla una agricultura no sostenible, que significaba un gran impacto sobre el ambiente y los recursos naturales, además de una dependencia de insumos que importar (Martínez & Dibut, 2012). En la búsqueda de vías para aumentar la producción de alimentos, surge una nueva forma de desarrollo de la agricultura, basada en principios ecológicos, que interpreta el sistema agrícola de manera holística y en el que se conciben técnicas para el manejo del clima (Fonseca et al., 2013).

En esas condiciones la esfera agroalimentaria ha pasado a jugar un papel fundamental en la economía cubana e indispensable para el bienestar del pueblo. La búsqueda de alternativas productivas sostenibles y ecológicas como la rotación de cultivos, la diversificación, el empleo de bioestimulantes y biofertilizante de producción nacional, la capacitación de la fuerza, la utilización de métodos agro ecológicos como las coberturas muertas, el estudio de variedades, la obtención de semillas de calidad, entre otros, son

temas fundamentales para el aumento gradual de la suficiencia agrícola en el país (Peña et al., 2013).

La producción nacional de fertilizantes minerales, como productos a base de nitrógeno, fosfato y potasio, es muy escasa, al tiempo que el consumo aumenta de manera constante. Por consiguiente, la demanda se satisface principalmente mediante importaciones. Así, entre las dificultades señaladas por los principales productores de fertilizantes y plaguicidas en Cuba cabe destacar (ONUDI, 2017):

- Se considera que del 30 al 60 % del equipamiento de las unidades de producción funciona adecuadamente, y que el resto del equipamiento está obsoleto.
- Conocimientos y competencias insuficientes y disponibilidad limitada para la prestación de servicios de mantenimiento fiables.
- Limitadas capacidades de almacenamiento e infraestructuras deficientes a nivel industrial.
- La demanda de fertilizantes a nivel nacional excede el suministro limitado de fertilizantes producidos e importados.
- La producción de fertilizantes minerales sigue siendo baja, al tiempo que el consumo no deja de aumentar, y debe satisfacerse principalmente mediante las importaciones.
- La producción de cultivos que no sean la caña de azúcar (verduras y cereales) requiere una optimización del uso de los fertilizantes.

Según señala Mesa & García (2016) resulta importante adoptar alternativas para acometer acciones que minimicen y brinden soluciones a corto, mediano y largo plazo a estos procesos degradativos. Entre estas medidas se encuentran el aporte de diferentes fuentes de abonos orgánicos, la adopción de prácticas agroecológicas como las rotaciones de cultivo y la implementación de diferentes tipos de biofertilizantes. Por otra parte, existen en el país diferentes tipos de residuos orgánicos aprovechables de gran importancia los cuales son necesarios para lograr disminuir las importaciones según plantea Iglesias Gómez et al., (2016).

El uso de fuentes orgánicas en los últimos años ha tenido un fuerte crecimiento, a pesar de emplearse desde el origen de la actividad agrícola misma. El uso de estas fuentes orgánicas por años se asoció con pequeños productores, quienes con estos insumos mantenían la fertilidad y productividad de sus predios. Actualmente se tiene una industria en franco desarrollo en la cuestión de la producción y comercialización de fertilizantes

orgánicos, la cual fue precedida por la alta demanda de productos cada vez más inocuos. Sin embargo, no sólo fue la demanda de productos orgánicos, sino que también se debe entender que ante el alto impacto que han tenido los insumos agrícolas de síntesis química, la agricultura orgánica ha surgido como una alternativa viable («INTAGRI», 2017).

Por otra parte, la disposición inadecuada de los residuos de producción agroindustrial es un constante problema en este sector, y ocasiona alteraciones en los diferentes medios abióticos, bióticos y socioeconómicos, e incluso puede llegar a generar pérdidas económicas para las empresas (Ramírez, 2012). Sin embargo, el aprovechamiento de los residuos agroindustriales permite dar solución a diferentes problemáticas ambientales originadas tanto por la generación y disposición de estos residuos como por otros factores producto del desarrollo de otros sectores productivos (VARGAS CORREDOR & PÉREZ PÉREZ, 2018).

Ramírez (2012) agrega que el aprovechamiento de residuos es una alternativa que impulsa el desarrollo de tecnologías orientadas hacia una transformación sustentable de los recursos naturales. Los residuos agroindustriales bien aprovechados previenen la contaminación de diversos ecosistemas y podrían recuperar las condiciones del ambiente alteradas por las diversas actividades humanas, así que contribuirían a mejorar la calidad de aquel y evitarían afectaciones a la salud humana (Barragán et al., 2008), (Gómez et al., 2016).

Atendiendo a lo anteriormente expuesto, la reducción global del consumo de fertilizantes sigue siendo un objetivo ambiental prioritario, buscando disociar el incremento de su utilización con la producción agrícola (LBADR, 2002). Sin embargo, las perspectivas de crecimiento demográfico y por tanto de aumento en la demanda de alimentos no hacen previsible una sustitución de los fertilizantes minerales por abonos orgánicos, pero sí su reducción por hectárea mediante una utilización más eficiente (PAE, 2006). En este contexto, una gestión adecuada de los residuos orgánicos generados con el objetivo de producir abonos y enmiendas de calidad puede contribuir a una reducción del consumo de fertilizantes minerales y por tanto de su impacto ambiental, lo que sin duda favorecería la sostenibilidad de los sistemas productivos agrícolas (VARGAS CORREDOR & PÉREZ PÉREZ, 2018).

Respecto a lo anterior, la producción de biogás mediante el proceso de biodigestión se presenta como una de las alternativas más prometedoras dado que entre otras ventajas:

- Proporcionan combustible (biogás) para suplir las necesidades energéticas rurales, incrementando la producción de energía renovable (calor, luz, electricidad) y de bajo costo (Collazo Rodríguez, 2015).
- Se produce abono orgánico (bio-abono) con un contenido mineral similar al de las excretas frescas, pero de mejor calidad nutricional para las plantas (Pérez & Cerdá, 2011).
- Mediante la utilización del efluente como bio-abono se reduce el uso de fertilizantes químicos, cuya producción y aplicación tiene consecuencias negativas para el medio ambiente global y local (Collazo Rodríguez, 2015).

Asia es el continente que más instalaciones de biogás ha reportado. Desde 1973 se estableció la Oficina de Difusión del Biogás y posteriormente el Centro Regional de Investigación en Biogás para Asia y el Pacífico Sur adjunto al Ministerio de la Agricultura. En la República Popular China funcionan aproximadamente 6,7 millones de instalaciones de este tipo (Siles, 2012). En la India, país donde se construyó la primera instalación para producir biogás, en fecha cercana al año 1900, alrededor de 500 000 familiares utilizan plantas de biogás, para producir energía como sustituto del combustible doméstico. En Europa existen alrededor de 564 instalaciones productoras de gas biológico que representan unos 269 000 m³ de digestores. De estas 174 000 m³ digestores corresponden a instalaciones industriales. El resto, 95 000 m³ de digestores corresponden a instalaciones agrícolas. En América Latina se hacen esfuerzos aislados en distintos países, con el propósito de extender la tecnología del biogás a las condiciones de vida e idiosincrasia de nuestros pueblos. En la mayoría de estos países aún no sanciona o penaliza el desastre ecológico diario que provocan los organismos vertedores de residuos.

En Cuba las potencialidades del biogás son inmensas en las industrias azucarera, cafetalera, alimentaria y otras, pero su aprovechamiento es ínfimo. En el país se construyeron alrededor de 550 instalaciones pequeñas de biogás, cada día estas plantas de biogás han ido abandonándose, llegando hoy a la cifra de 4 000 instalaciones y donde sólo trabajan el 70 % de ellas (Lorenzo, 2014). En el sector porcino en particular solo hay unas 500 plantas de biogás para tratar los residuos. Estas producen un millón de metros cúbicos de biogás y unas 2 000 toneladas de fertilizante orgánico al año (Torres et al., 2004).

En nuestra provincia hace 6 años solo existían 7 biodigestores para la obtención de gas a partir de la excreta del ganado porcino. Hoy casi llegan a cien y con ello esparcen los

beneficios económicos, sociales y medioambientales de tales instalaciones. Las plantas de biogás como fuente de energía alternativa ya son utilizadas en muchos predios del territorio para la cocción de los alimentos y el alumbrado de las viviendas e instalaciones ganaderas (Reyes, 2012).

No obstante, si bien estos sistemas se han tratado con especial interés desde la perspectiva del aprovechamiento energético, se ha comprobado que el digestato obtenido como resultado de este proceso tiene buenas propiedades para ser usado como fertilizante. Luego, tomando en consideración lo anterior se estableció como problema de investigación:

Problema de investigación:

¿Cómo utilizar los residuales porcinos de la UEB Integral N°1 en la producción de biofertilizantes y electricidad?

Como respuesta anticipada a este problema de investigación se planteó la siguiente hipótesis.

Hipótesis:

El uso de un biodigestor con residuales porcinos de la empresa permitirá la generación de electricidad y la producción de biofertilizante.

Objetivo general:

Elaborar una propuesta tecnológica de un biodigestor en la UEB Integral N°1 de la Empresa Porcina de Cienfuegos para la producción de biofertilizante y energía eléctrica.

Objetivos específicos:

- 1 Precisar el estado actual y las tendencias de uso de los residuos porcinos en la producción de biofertilizante y biogás estableciendo los fundamentos científicos que sustentan la investigación.
- 2 Calcular el dimensionamiento de los equipos según la metodología propuesta por Moncayo Romero y otros autores.
- 3 Realizar la evaluación económica de la propuesta tecnológica basado en la metodología de Borroto y Monteagudo.

CAPÍTULO I

CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se discuten los aspectos más relevantes sobre la importancia de los fertilizantes. Se analizan los elementos esenciales para una adecuada gestión de residuos, y se discute como estos pueden ser tratados para la producción de biofertilizantes. Se analiza luego, con especial atención el proceso de biodigestión destacando las principales etapas, sustancias químicas y tecnologías involucradas.

1.1 Generalidades sobre los fertilizantes.

Un fertilizante no es más que cualquier material natural o industrial, que contenga al menos cinco por ciento de uno o más de los tres nutrientes primarios (N, P_2O_5 , K_2O). Según Arévalo de Gauggel & Castellano (2009), un fertilizante es una mezcla química, natural o sintética utilizada para enriquecer el suelo con nutrientes y favorecer el crecimiento vegetal. También FAO (2019) agrega en el Código Internacional de Conducta para el Uso y Manejo de Fertilizantes que un fertilizante es una sustancia que se emplea para proporcionar nutrientes a las plantas (Ver **Anexo 1**), normalmente a través de su aplicación en el suelo, pero también en el follaje o a través del agua en los sistemas de cultivos, la fertirrigación o el cultivo hidropónico, o en operaciones de acuicultura.

Ribeiro Oliveira (2017) asegura que, los fertilizantes se pueden clasificar en base a diferentes criterios.

Según su naturaleza:

- Fertilizantes orgánicos: en su sentido más amplio, se considera como abono orgánico toda sustancia de origen vegetal, animal o mixto (vegetal + animal), que se incorpora al suelo para mejorar su fertilidad.
- Fertilizantes minerales: son obtenidos mediante extracción o procedimientos industriales de carácter físico o químico cuyos nutrientes declarados se encuentran en forma mineral.
- Fertilizantes órgano-minerales: son una mezcla o combinación química de fertilizantes orgánicos y minerales.

Según su composición:

- Fertilizantes simples: están compuestos por un solo elemento principal (nitrogenado, fosfatado y potásico).
- Fertilizantes compuestos: son obtenidos químicamente y/o por mezcla conteniendo, al menos, dos nutrientes principales.
 - Binarios: NP, NK, PK.

- Ternarios: NPK.
- Abonos inorgánicos con elementos secundarios.
- Abonos inorgánicos con micronutrientes.
- Otros abonos y productos especiales: como aminoácidos, ácidos húmicos o inhibidores de la nitrificación.

Según el nutriente que se desea aportar:

- Fertilizantes nitrogenados: urea, amoníaco, nitrato de amonio.
- Fertilizantes fosforados: superfosfato simple, superfosfato triple.
- Fertilizantes azufrados: yeso (sulfato de calcio).
- Fertilizantes potásicos: cloruro de potasio.
- Fertilizantes combinados: nitrofosfatos, NPK.

Lugar de aplicación del fertilizante:

- Fertilizantes edáficos: se incorporan al suelo de diferentes formas (al voleo, en bandas o hileras, en cobertera, entre líneas), luego las raíces de las plantas los absorben y los distribuyen a los distintos órganos.
- Fertilizantes foliares: se aplican sobre las hojas de los cultivos con la maquinaria agrícola adecuada para lograr una correcta distribución. No todos los vegetales presentan una cubierta epidérmica adecuada para recibir de manera eficiente fertilización foliar.
- Fertirrigación: los abonos se disuelven en el agua que se utilizará posteriormente en el riego. Esta forma de fertilizar supone un ahorro de agua, de energía, de contaminación ambiental y, es más segura para el trabajador.

Según el estado del fertilizante:

- Líquidos: se pueden aplicar directamente o disueltos en agua. Se pueden encontrar en forma de suspensiones o mezclas y soluciones. Estos se pueden encontrar en forma de soluciones sin presión, o soluciones con presión que necesitan ser aplicados con equipos especializados.
- Sólidos: suelen presentarse en polvo, granulados, macro-granulados, en pastillas, bastones, perlados, etc.

De acuerdo a la composición de los fertilizantes Arévalo de Gauggel & Castellano (2009) plantean que, la composición de un fertilizante es la cantidad de nutriente que contiene. En los fertilizantes simples, las unidades que se consideran para el cálculo de su

composición son las siguientes: N, P_2O_5 , K_2O , CaO y MgO, y el resto de los nutrientes se valora en su forma elemental.

La composición de un fertilizante compuesto se indica por tres números que corresponden a los porcentajes de N, P_2O_5 y K_2O se denomina concentración a la suma de la riqueza de los tres elementos del fertilizante complejo. Un ejemplo es el siguiente: un fertilizante ternario 15-15-15 tiene una concentración nutricional de 45 % con contenidos de 15 %, 15 % y 15 % de N, P_2O_5 y K_2O , respectivamente. Es decir, que en un quintal de 15-15-15 posee 15 libras de N, 15 libras de P_2O_5 y 15 libras de K_2O , el 55 % restante de la composición del fertilizante es material inerte. Lo anteriormente se explica conociendo los grados de los fertilizantes de acuerdo a la composición de los diferentes fertilizantes teniendo en cuenta su composición física. En el (**Anexo 2**) se muestran algunos fertilizantes que existen de acuerdo al grado y el porciento en nutrientes que los caracterizan.

Según FAO (2002) el grado de los fertilizantes que contienen sólo un nutriente primario son denominados fertilizantes simples. Aquellos conteniendo dos o tres nutrientes primarios son llamados fertilizantes multinutrientes, algunas veces también fertilizantes binarios (dos nutrientes) o ternarios (tres nutrientes). Estos tipos de fertilizantes son de producción industrial (**Figura 1.1**)

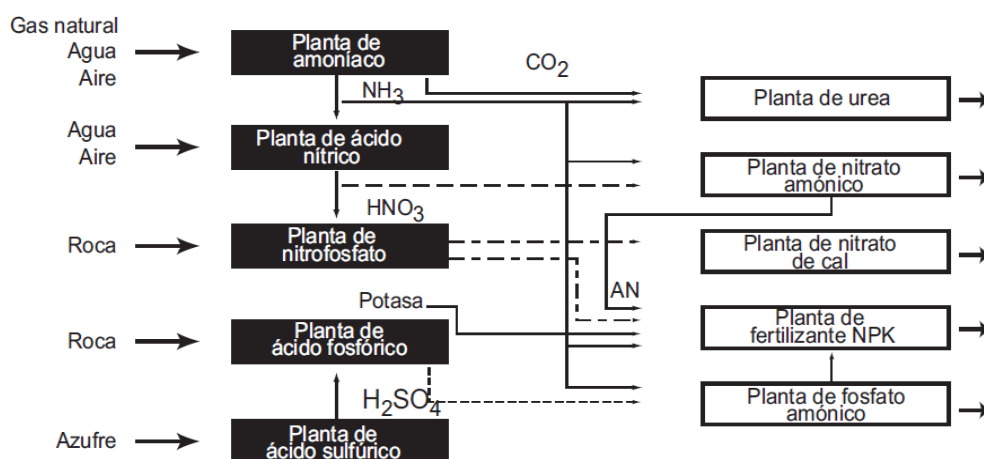


Figura 1.1. Diagrama de Flujo de la producción de Fertilizantes. **Fuente.** (FAO, 2002).

Dependiendo del proceso de fabricación, las partículas de los fertilizantes minerales pueden ser de muy diferentes tamaños y formas: gránulos, píldoras, «perlados», cristales, polvo de grano grueso / compactado o fino. La mayoría de los fertilizantes es provista en forma sólida mientras que los fertilizantes líquidos y de suspensión son importantes principalmente en América del Norte.

Según Arévalo de Gauggel & Castellano (2009), la presentación del fertilizante determina a menudo las condiciones de utilización y la eficacia del mismo. Los fertilizantes se presentan en estado sólido o líquido

Los sólidos pueden ser:

- a) *En polvo*: apropiados cuando la solubilidad en agua es escasa o nula. No son aconsejables para el uso si no son necesarios debido a la solubilidad ya que las dificultades que presenta en el manejo, en el tratamiento con maquinaria y las pérdidas en la manipulación le convierten en una forma ineficaz (Carulla, 2016).
- b) *Cristalinos*: permiten realizar la manipulación y la distribución de manera más fácil (Carulla, 2016).
- c) *Granulado*: permite que la distribución mecánica sea uniforme. El 90 % de las partículas presenta diámetros entre 1 y 4 mm. La forma deseable es la esférica.
- d) *Perlado*: granulado de tamaño muy uniforme.

Los líquidos según (Carulla, 2016) pueden ser en:

- a) *Suspensiones*: permiten la sobresaturación de alguna sal (generalmente cloruro potásico) para alcanzar concentraciones totales elevadas en estado líquido. Son necesarias la utilización de arcillas dispersas en el agua y su agitación periódica.
- b) *Soluciones bajo presión*: apropiadas para soluciones acuosas de nitrógeno donde participa como componente el amoníaco anhidro para llegar a una concentración superior a la que mantiene en equilibrio a presión atmosférica. Son necesarios equipos especiales que soporten las presiones requeridas.
- c) *Soluciones a presión atmosférica*: aportan uno o varios elementos nutritivos disueltos en agua.

Los líquidos pueden ser aplicados a los cultivos, ya sea al momento de la siembra o después de la emergencia. Son formulaciones que se logran elaborar a través de la mezcla de diferentes materiales que contienen los nutrientes necesarios para el desarrollo de los cultivos. Se presentan en forma de suspensiones para ser diluidas en agua y aplicadas a los cultivos (Arévalo de Gauggel & Castellano, 2009).

1.1.1 Importancia de los Fertilizantes.

Para alcanzar el reto de poder incrementar la producción agrícola para abastecer a la población, únicamente existen dos factores posibles:

- Aumentar las superficies de cultivo, posibilidad cada vez más limitada sobre todo en los países desarrollados, lo que iría en detrimento de las grandes masas forestales.

- Proporcionar a los suelos fuentes de nutrientes adicionales en formas asimilables por las plantas, para incrementar los rendimientos de los cultivos.

Esta opción es posible mediante la utilización de fertilizantes minerales, con cuya aplicación racional se ha demostrado, en los ensayos de larga duración, el gran efecto que ha tenido en el incremento de los rendimientos de las cosechas, obteniendo a su vez productos con mayor calidad. Los fertilizantes, utilizados de forma racional, contribuyen a reducir la erosión, acelerando la cubierta vegetal del suelo y protegiéndolo de los agentes climáticos.

Asimismo, la necesidad de obtener actualmente nuevas fuentes de energía abre un nuevo campo para la agricultura, y la aplicación adecuada de fertilizantes debe contribuir a conseguir este objetivo ya que la biomasa es una fuente principal para la obtención de energía renovable.

En definitiva, gracias a los fertilizantes se enfrentan los siguientes retos:

- Asegurar la productividad y calidad nutricional de los cultivos, ofreciendo una seguridad alimenticia e incrementando el contenido de nutrientes de las cosechas.
- Evitar la necesidad de incrementar la superficie agrícola mundial, ya que sin los fertilizantes habría que destinar millones de hectáreas adicionales a la agricultura.
- Conservar el suelo y evitar su degradación y, en definitiva, mejorar la calidad de vida del agricultor y de su entorno.
- Contribuir a la mayor producción de materia prima para la obtención de energías alternativas.

Sin embargo, la industria de fertilizantes consume una gran cantidad de recursos, los que son escasos. Debido a esto es de interés explorar la valorización de diversos tipos de residuos para la producción de estos productos dado que muchos tienen composiciones aceptables para este fin. De esta manera no solo se producirían productos con valor agregado (fertilizantes) y de gran demanda social, sino que además se integraría paralelamente con los sistemas de tratamiento de dichos residuos.

1.2 Generalidades sobre la gestión de residuos.

Elias, (2012) establece una diferencia entre residuo y desecho el cual plantea que:

- Residuo: es aquella sustancia u objeto generado por una actividad productiva o de consumo, de la que hay que desprenderse por no ser objeto de interés directo de la actividad principal.

- Desecho: cualquier sustancia sólida, líquida o gaseosa, que no puede usarse como un organismo o por cualquier sistema que lo produce, debiéndose diseñar métodos para su eliminación.

Por otra parte Navarro Pedreño et al., (1995) define como concepto de residuo a; aquellas materias derivadas de actividades de producción y consumo que no han alcanzado ningún valor económico. En general, todas las legislaciones suelen definir el residuo de una manera similar: como aquella sustancia u objeto que no resulta útil para su poseedor y por la cual tenga la intención, o bien la obligación de desprenderse de ella (Elias, 2012). El problema actual de la gestión de los residuos deriva de su producción en grandes cantidades, en lugares no siempre adecuados y generalmente de pequeña extensión superficial, con una enorme heterogeneidad en su composición, en la que suelen encontrarse concentraciones anómalas de sustancias nocivas que no siempre son controladas, contaminando aire, aguas, suelos y biota e incluso afectando a la salud humana con la consiguiente pérdida de recursos económicos. Esto ha condicionado que tradicionalmente en lugar de considerar al residuo como un recurso se procede como si fuesen algo inevitable y desagradable que aparece en nuestras actividades y que debemos deshacernos de ellos lo antes posible evitando así el pensar en una posible valorización (López Mosquera & Sainz Osés, 2011).

No obstante, en reconocimiento de la incompatibilidad del tradicional sistema económico de producción y consumo lineal con el paradigma de desarrollo sostenible gradualmente se ha concebido un modelo de producción circular donde la gestión de residuos esté integralmente articulada a las actividades humanas. Con este enfoque los efectos negativos que se han producido en el pasado y siguen produciéndose a causa de la gestión de residuos han generado unas pautas sociales preventivas e incluso una legislación que, aplicada adecuadamente favorece la rentabilidad del reciclaje, la valorización del residuo y la consecución de una mejor calidad ambiental y económica (López Mosquera & Sainz Osés, 2011).

Ante el número oportunidades para recuperación de materiales a partir de los residuos dada la tecnología contemporánea y como base para la gestión integral de los residuos se ha establecido una jerarquía (**Figura 1.2**) para fomentar un examen individual de cada alternativa previo a la consideración de otra alternativa menos preferida en orden de importancia por su beneficio para el medioambiente. Las prácticas que disminuyen, evitan o eliminan la generación de residuos son consideradas preferibles y pueden incluir

la implementación de procedimientos tan simples como buenas prácticas (Valdés López et al., 2019).

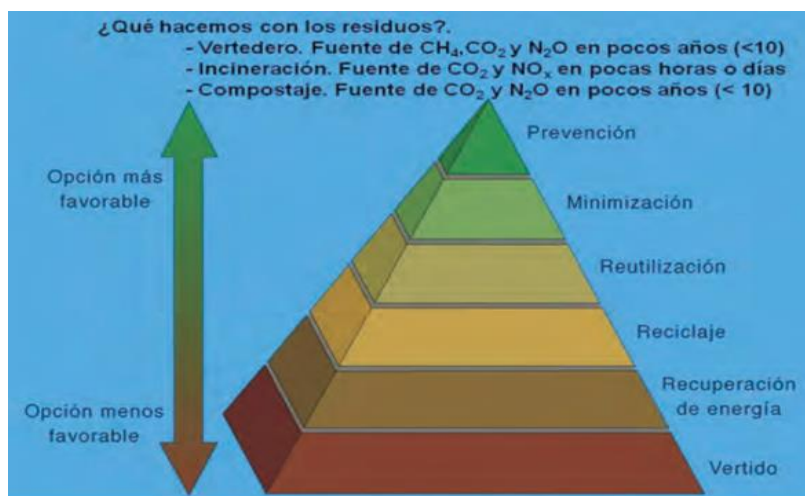


Figura. 1.2. Jerarquía para el uso de residuos. **Fuente.** (López Mosquera & Sainz Osés, 2011).

Con la jerarquía se reduce la generación de residuos y se optimiza la utilización de recursos. Sin embargo, en el caso particular de los residuos generados por las actividades productivas, con frecuencia es más simple y económico deshacerse de ellos, antes de ver cómo gestionarlos o evitar su generación. En otros casos existe una conciencia y la voluntad de hacer algo productivo con los residuos, pero a la hora de ponerlo en práctica la cantidad de ese material no resulta económicamente viable ni para quien lo produce ni para quien lo demanda, o no existe un mercado donde ofrecerlo ni la tecnología para tratarlos (Gudewort, 2016).

Es decir, ante el miedo al residuo se han fomentado, de forma excesiva, mecanismos de exclusión o de no actuación sobre ellos que conducen a la continuación y el incremento de la agresión y el expolio de los sistemas naturales a través de la demanda continua de nuevas materias primas y a la contaminación y degradación del suelo, agua y biota por medio del abandono o la mala gestión de eliminación de los residuos no o escasamente valorizados (López Mosquera & Sainz Osés, 2011).

Por ello, la gestión de los residuos se ha convertido en un tema prioritario para el país dentro de una amplia gama de temas que guardan relación con la problemática ambiental. La gestión integrada de los residuos es el término aplicado a todas las actividades asociadas con el manejo de los diversos flujos de residuos dentro de la sociedad, y su meta básica es administrarlos de tal forma que sean compatibles con el medio ambiente y la salud pública (Montoya Rendón, 2012).

1.2.1 Residuos orgánicos y su potencial como fertilizantes.

Debe ser reconocido que un residuo puede ser algo de lo que debe deshacerse su productor, pero, al mismo tiempo, puede ser una materia prima o un subproducto para otros, de modo que pueda ser reutilizado o reciclado, siempre con garantía sanitaria y de protección de los ecosistemas, hasta que cuando se acaben las posibilidades de valorización y se complete su ciclo de vida se integre en los ciclos biogeoquímicos de la superficie terrestre pasando a formar parte del ciclo de la materia y la energía del planeta (López Mosquera & Sainz Osés, 2011).

Como idea fundamental, debemos insistir en que todos los materiales orgánicos siguen siendo susceptibles de ser aplicados a los suelos, ya que pueden ser fuente de vida nueva, aportando energía y renovación de materia orgánica y nutrientes. El estudio de los sistemas agrícolas modernos y de su impacto en el medio ambiente ha abierto otra polémica que puede resultar beneficiosa para la recuperación del abonado orgánico de los suelos: los problemas de contaminación derivados del uso abusivo de fertilizantes minerales. Sin duda, dado que actualmente la producción de materiales orgánicos es importante y tiende a crecer en un futuro, debemos plantearnos esta última posibilidad muy seriamente, buscando el mejor destino para los variados residuos orgánicos que se producen (Navarro Pedreño et al., 1995).

Luego, las aportaciones de materia orgánica tienen un efecto muy positivo sobre las propiedades del suelo y la nutrición vegetal. Su descomposición da lugar al "humus" o materia orgánica estable del suelo. Estas sustancias incrementan la capacidad de retención de agua y de nutrientes del suelo y favorecen su estructuración, que es la responsable de una correcta aireación y circulación de agua en el suelo; y, por otra parte, el humus constituye un almacén de nutrientes de liberación lenta y favorece la asimilación de nutrientes presentes en el suelo o aportados con los abonos (López Sánchez et al., 2011). Por lo anterior el uso de los residuos orgánicos como abonos o biofertilizantes constituye una estrategia de especial interés para la gestión de este tipo de residuos como para el desarrollo de una agricultura más sostenible.

1.3 Abonos Orgánicos (Biofertilizantes).

Se entiende por “abono orgánico” o “biofertilizante” (en su significado más amplio) cualquier tipo de producto que se utilice para el manejo de los suelos (como enmienda, o como aportador de nutrientes) cuyo origen sea principalmente orgánico, esto es, que sea producto de la actividad de otro organismo vivo (Meléndez & Molina, 2003). Por otra parte Álvarez & Rimski-Korsakov (2016) aseguran que los abonos orgánicos son aquellos

productos orgánicos desde el punto de vista químico, de origen vegetal o animal, que son adicionados al suelo para mejorar su calidad física y su fertilidad. Así, en general se considera un abono aquel material que se aplica al suelo y estimula el crecimiento de las plantas de manera indirecta, a través de mejorar las propiedades físicas del suelo (Salazar Sosa et al., 2003).

El abono orgánico es el material resultante de la descomposición natural de la materia orgánica por acción de los microorganismos presentes en el medio, los cuales digieren los materiales, transformándolos en otros benéficos que aportan nutrimentos al suelo y, por tanto, a las plantas que crecen en él. Es un proceso controlado y acelerado de descomposición de los residuos, que puede ser aeróbico o anaerobio, dando lugar a un producto estable de alto valor como mejorador del suelo (Ramos Agüero & Terry Alfonso, 2014).

Algunos subproductos de origen animal y vegetal también son utilizados como biofertilizantes, específicamente los derivados del proceso industrial de cualquiera de estas fuentes. Los de origen animal abarcan tejidos duros, como huesos, cuernos, uñas, pelo, y otros ricos en proteínas fibrosas derivadas del colágeno y la queratina, ya que son una buena alternativa como fertilizantes y enmiendas. Entre sus ventajas cabe destacar que son biodegradables.

En cuanto a los subproductos de origen vegetal, los biofertilizantes se obtienen a través del procesamiento de fibras; los residuos vegetales, además, se pueden usar aplicándolos directamente al suelo o después de su procesamiento (por ejemplo, a través de compostaje). Su uso y resultados han demostrado que pueden reemplazar la aplicación de fertilizantes minerales. Los biofertilizantes vegetales se caracterizan por sus notables aportes de nitrógeno, fósforo, potasio y materia orgánica. El resultado final de su uso en los cultivos no dista del que se obtiene con fertilizantes de origen mineral (Cruz Camacho, 2014).

Los abonos orgánicos tienen altos contenidos de nitrógeno mineral y cantidades significativas de otros elementos nutritivos para las plantas. Dependiendo del nivel aplicado, originan un aumento en los contenidos de materia orgánica del suelo, en la capacidad de retención de humedad y en el pH, también aumentan el potasio disponible, y el calcio y el magnesio (Ramos Agüero & Terry Alfonso, 2014).

Por eso, el procedimiento que más se ha empleado para caracterizar los abonos orgánicos es la determinación de contenidos totales de nutrientes. En el (**Anexo 3**) se representa la

composición química aproximada de algunos de estos abonos como de origen natural por totales.

El uso y aplicación de los abonos orgánicos es imprescindible para los sectores agrícolas, tal es el caso de la gran importancia que rigen estos abonos en el desarrollo de cultivos varios. Señala Arévalo de Gauggel & Castellano (2009) que, la necesidad de disminuir la dependencia de productos químicos artificiales en los distintos cultivos, está obligando a la búsqueda de alternativas fiables y sostenibles. En la agricultura ecológica, se le da gran importancia a este tipo de abonos, y cada vez más se están utilizando en cultivos intensivos. No podemos olvidar la importancia que tiene el mejorar algunas características físicas, químicas y biológicas del suelo y, en este sentido, este tipo de abonos juega un papel fundamental.

1.3.1 Clasificación de los abonos orgánicos.

En la definición del concepto de abono orgánico se incluyen desde los desechos directos de cualquier organismo sea vegetal, animal o “humano”, hasta todos aquellos productos originados por algún proceso que involucre actividad biológica. En este sentido Meléndez & Molina (2003) aseguran que, según su procedencia se pueden clasificar en naturales y fabricados.

Naturales: Dentro de los naturales destacan cualquier tipo de residuo vegetal, las excreciones y subproductos de origen animal y los residuos urbanos. En este último grupo es posible identificar gran diversidad de tipos: basura residencial, de mercados, del comercio, de hospitales, de calles, etc., cada una con características particulares.

Fabricados: Cuando se habla de abonos orgánicos fabricados se hace referencia a: Los diferentes tipos de compost que se pueden producir, incluyendo aquellos que son reforzados con productos químicos con el afán de mejorar su calidad, el bocashi, el lombri o vermicompost, los biofertilizantes propiamente dichos que involucran la inoculación de un organismo vivo, los extractos de ácidos húmicos y fúlvicos, los extractos de algas u otros organismos, los biofermentos, el efluente del biodigestor durante la producción de biogás, otros.

Por otra parte Moreno Pérez et al. (2011) clasifica a los abonos orgánicos como “abonos orgánicos de granja” y “abonos orgánicos comerciales”. Los abonos orgánicos de granja se conocen como “fertilizantes propios de la explotación” y su importancia radica en el contenido en materia orgánica. Aportan energía degradable y alimento para la fauna bacteriana propia del suelo. Por otra parte, los abonos orgánicos comerciales se valoran fundamentalmente en cuanto al contenido en materia orgánica.

- *Abonos orgánicos de granja*: Como se observa en el (**Anexo 4**), se han clasificado cuatro grupos de abonos orgánicos de granja: estiércol sólido, estiércol líquido o purín, estiércol semilíquido y abono verde, paja o compost.
- *Abonos orgánicos comerciales*: Estos abonos se clasifican en “abonos orgánicos” y “abonos orgánico-minerales”. En el (**Anexo 5**) se recogen algunos abonos orgánicos comerciales bajo la denominación de “orgánicos” y “orgánico-minerales”.

La importancia de la utilización de este tipo de abonos radica en su gran contenido en humus. La materia orgánica contiene “humus nutritivo” y “humus estable”. El primero aporta nutrientes y energía a los microorganismos del suelo y el segundo mantiene los agregados del suelo durante más tiempo mejorando la fertilidad del suelo. Los abonos enriquecidos con nutrientes además de aportar humus al suelo, contienen nutrientes esenciales para las plantas como se observa en el (**Anexo 6**). La principal diferencia entre los abonos orgánicos y los orgánico-minerales comerciales es su concentración o riqueza. Esto es lógico puesto que se trata de productos preparados a bajo condiciones específicas de uso. Por ejemplo, los abonos N orgánicos se fabrican con riquezas hasta del 14 % en N mientras que los abonos N orgánico minerales presentan riquezas hasta del 19 %.

1.3.2 El estiércol como abono orgánico.

Estiércol es el nombre que se le da a los excrementos de los animales y son utilizados para fertilizar los cultivos (Arévalo de Gauggel & Castellano, 2009). El estiércol está constituido por los excrementos sólidos y líquidos de los animales y por los materiales vegetales que se emplean como cama, los cuales, al mismo tiempo que le proporcionan lecho al ganado, retienen sus deyecciones. El estiércol puede variar ampliamente en composición atendiendo a la especie de animal de que provenga (Pérez Iglesias et al., 2016).

Según Navarro Pedreño et al. (1995) la clasificación de los estiércoles se puede realizar en función de su origen y temperatura de fermentación:

- Estiércoles calientes: caballo, oveja, cabra y aves de corral.
- Estiércoles fríos: vaca, cerdo.

En la **Tabla 1.1** figuran algunas características agronómicas de estos materiales, prestando atención a la materia seca y contenido en los nutrientes mayoritarios. Estos dependiendo de su procedencia, poseen diversos nutrientes y por lo general tienen altos contenidos de nitrógeno, entre ellos se encuentran los producidos por la ganadería, la

avicultura, la porcicultura, cunicultura, capricultura y la ovicultura (boñiga, gallinaza, cerdaza, ovejaza, conejaza y cabraza) entre otros (Garro Alfaro, 2016).

Tabla 1.1. Composición nutritiva de estiércoles en materia fresca.

Origen del estiércol	m.s. (%)	N (kg/t)	P ₂ O ₅ (kg/t)	K ₂ O (kg/t)	MgO (kg/t)	S (kg/t)
<i>Vacuno</i>	32	7	6	8	4	-
<i>Oveja</i>	35	14	5	12	3	0,9
<i>Cerdo</i>	25	5	3	5	1,3	1,4
<i>Gallinaza</i>	28	15	16	9	4,5	-
<i>Purines</i>	8	2	0,5	3	0,4	-

Fuente. (Navarro Pedreño et al., 1995).

El estiércol siempre ha sido el fertilizante más importante en la granja y, antiguamente se pensaba que tenía multitud de funciones por lo que se consideraba como el “abono universal”. Es una mezcla de excrementos, una pequeña parte de orina y paja, por lo que fundamentalmente contiene materia orgánica. También presenta nitrógeno en forma nítrica (NO₃⁻) y amoniacal (NH₄⁺) pero su mayor aportación al suelo es de humus. Los purines son suspensiones formadas por orina (en una proporción de 50 % aproximadamente) fermentada biológicamente y mezclada con partículas de excrementos, líquidos que percolan del estiércol y agua de lluvia. Es considerado como “abono NK” y su efecto es rápido ya que los nutrientes que contiene están en su forma asimilable: K⁺ y NO₃⁻. Por otra parte, el estiércol semilíquido se diferencia del purín porque contiene mayor cantidad de partículas sólidas de excrementos; tiene las mismas funciones y efectos que el purín (Moreno Pérez et al., 2011).

Navarro Pedreño et al. (1995) plantean que, la aplicación de estiércol constituye un aporte importante de fósforo a los suelos, con la peculiaridad de su carácter predominantemente lábil, lo que contribuye a una buena asimilabilidad por la planta. Estos estiércoles posibilitan una riqueza cuantificada en nutrientes que el suelo asimila progresivamente con la degradación de la materia orgánica cuando son aplicados en cultivos, por otra parte Arévalo de Gauggel & Castellano (2009) aseguran que, para usarlos estos materiales deben estar descompuestos. La manera de acelerar la descomposición de los mismos es haciendo bultos, los cuales se guardan por un periodo no menor de tres meses, antes de distribuirlos en el campo. Al usarlos, es conveniente incorporarlos al suelo lo más pronto posible para reducir su desecación.

1.4 Generalidades sobre la producción de biogás y biofertilizantes.

Como se ha visto anteriormente existen diferentes opciones para la degradación de la materia orgánica con el propósito de producir biofertilizantes. En este sentido la producción de biogás resulta de especial interés pues brinda además la posibilidad de obtener un recurso energético con valor agregado.

1.4.1 El proceso de digestión anaerobia.

La digestión anaerobia es un proceso biológico degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos. Agrega Santana Acea (2014) que este proceso lo llevan a cabo microorganismos anaerobios que actúan en el interior de un biodigestor. Este biodigestor o reactor es una cámara hermética al aire, en la que se dispone la materia orgánica sin oxígeno para que pueda llevarse a cabo la fermentación. La digestión anaerobia se presenta entonces como una posibilidad de tratamiento de residuos orgánicos.

Utilizando el proceso de digestión anaerobia es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90 % de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10 % de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50 % consumido en un sistema aerobio (Sarmiento García, 2014).

Los residuos que podremos digerir son variados: excretas de animales, residuos de vegetales y plantas, residuos o aguas residuales agroindustriales. Aunque la mayoría de sustratos orgánicos serán adecuados, la madera o los residuos leñosos son desaconsejables.

A partir de la degradación de la materia orgánica se obtienen tres productos básicos: un fertilizante orgánico líquido, un fertilizante orgánico lodoso (del vaciado por mantenimiento de la planta) y el biogás.

Una aplicación ampliamente desarrollada de la digestión anaerobia es la que usa excretas porcinas. Éstas son una mezcla compleja que puede ser considerada como un fango líquido con una concentración media en materia seca en el entorno del 6 %, con una DQO de alrededor de 75 000 mg/l y una DBO₅ de aproximadamente 26 000 mg/l.

1.4.2 Productos finales de la digestión anaerobia.

Como habíamos hecho mención anteriormente, la digestión anaeróbica consiste en la descomposición de material biodegradable en ausencia de oxígeno para dar como resultado dos productos principales: Biogás (compuesto mayoritariamente por metano) y los llamados digestatos (Biol y Lodo), los cuales son los efluentes estabilizandos del proceso degradativo.

➤ *Biogás*

Es una mezcla gaseosa formada, principalmente, por metano y dióxido de carbono y pequeñas proporciones de otros gases, como H_2S , H_2 , NH_3 , etc. La composición o riqueza del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso.

➤ *Efluente*

Las características del efluente dependen mucho del tipo de sistema, pero tratando con sistemas de mezcla completa y con residuos orgánicos, se puede decir que el efluente es la mezcla del influente estabilizado y la biomasa microbiana producida. Durante el proceso anaerobio parte de la materia orgánica se transforma en metano, por lo que el contenido en materia orgánica es menor que en el influente. Se trata, además, de un producto más mineralizado que el influente, con lo que normalmente aumenta el contenido de nitrógeno amoniacal y disminuye el nitrógeno orgánico.

1.4.3 Composición química del biogás.

La composición de Biogás depende del tipo de materia prima y en cierta medida de la técnica utilizada en el proceso de la digestión anaerobia. La materia prima utilizada para la digestión anaerobia varía considerablemente en la composición, la homogeneidad y la biodegradabilidad (Daniel, 2009).

Aunque la composición del biogás varía de acuerdo a la biomasa utilizada, su composición aproximada se presenta a continuación:

- ✓ Metano, (CH_4): 54 - 70 % volumen
- ✓ Dióxido de Carbono, (CO_2): 27 - 45 %
- ✓ Hidrógeno, (H_2): 1 - 10 %
- ✓ Nitrógeno, (N_2): 0,5 - 3 %
- ✓ Ácido Sulfhídrico, (H_2S): 0,1 %

1.4.4 Codigestión de residuos orgánicos.

El tratamiento de dos o más residuos mediante digestión anaerobia se denomina codigestión anaerobia (Flotats, 2001). La principal ventaja de la codigestión está en aprovechar la sinergia de las mezclas y compensar carencias de cada uno de los sustratos

por separado. La codigestión anaerobia permite aprovechar la complementariedad de la composición de los residuos.

La codigestión permite integrar la valorización de los residuos orgánicos de una zona geográfica determinada. De este modo conseguimos obtener por un lado una fuente de energía de carácter renovable en forma de biogás, y por otro un subproducto resultante de la digestión denominado digestato con características de fertilizante orgánico y aplicable en agricultura bajo condiciones controladas. Se trata por tanto de un reciclaje integral que reduce el impacto ambiental de estos residuos (contaminación suelo, agua, olores, etc.) (Casals Pérez, 2015).

Muchas experiencias de codigestión han sido llevadas a cabo, mezclando diferentes tipos de residuos. Los residuos ganaderos, especialmente el purín de cerdo, puede ser una buena base para la codigestión, porque generalmente presentan un contenido de agua mayor al de los residuos industriales, una mayor capacidad tampón y aportan una extensa variedad de nutrientes necesarios para el crecimiento de los microorganismos anaerobios (Angelidaki & Ahring, 2001).

A nivel económico, el incremento en la producción de biogás se traduce en mayores ingresos por la venta de la electricidad y/o uso del calor producido. Además, la gestión de algunos residuos empleados como cosustratos puede generar también ingresos. Por otro lado, el hecho de integrar en una sola instalación el tratamiento de todos los residuos de una zona permite ahorrar costes de inversión y operación si lo comparamos con el tratamiento por separado de cada uno de los residuos gestionados.

1.4.5 El biogás por descomposición anaerobia.

La producción de biogás por descomposición anaeróbica es un modo considerado útil para tratar residuos biodegradables, ya que produce un combustible de valor, además de generar un efluente que puede aplicarse como acondicionador de suelo o abono genérico. Aunque la digestión anaerobia es un proceso ampliamente conocido en la práctica, se posee en la actualidad una información muy limitada sobre su química y su microbiología. Sin embargo, se puede afirmar en líneas generales que la digestión anaerobia se desarrolla en tres etapas: (hidrólisis, fase ácida y fase hidrogenada), (ver **Anexo 6**) durante las cuáles la biomasa se descompone en moléculas más pequeñas para dar biogás como producto final, por la acción de diferentes tipos de bacterias.

Este gas se puede utilizar para producir energía eléctrica mediante turbinas o plantas generadoras a gas, en hornos, estufas, secadores, calderas u otros sistemas de combustión a gas, debidamente adaptados para tal efecto.

1.4.6 Conceptos básicos sobre plantas de biogás.

La instalación destinada a la producción y captación del biogás recibe el nombre de planta de biogás. Existen múltiples diseños y formas, en función de su tamaño, materia prima (residual) que se emplea, materiales de construcción con que se construye, etc. Su variedad es tal que los modelos existentes se adaptan prácticamente a todas las necesidades y variantes que se deseen, en cuanto a volumen, materiales empleados y residuales orgánicos que se deben tratar.

Por lo general se puede obtener biogás a partir de cualquier material orgánico. Comúnmente se emplean las excretas de cualquier índole, la cachaza, los desechos de destilerías, los componentes orgánicos de los desechos sólidos municipales, los residuos orgánicos de mataderos, el lodo de las plantas de tratamiento residuales, los residuales agropecuarios, los desechos orgánicos de las industrias de producción de alimentos, etc. Todos los materiales orgánicos que pueden ser empleados están compuestos, en su mayor parte, por carbono (C) y nitrógeno (N). La relación entre ambos tiene gran influencia sobre la producción de biogás.

Una planta de biogás, consiste básicamente de un tanque o pozo llamado digestor donde ocurre la fermentación y un contenedor hermético que tiene como función almacenar biogás producido; las dos partes pueden estar juntas o separadas y el tanque de almacenamiento puede ser rígido o flotante. La carga y descarga del sistema puede ser por gravedad o por bombeo.

1.4.7 Descripción de tipo de plantas de biogás.

En general, las plantas de biogás simples que se conocen pueden ser divididas en tres tipos. El diseño y dimensionamiento de un biodigestor depende, en lo fundamental, de los factores siguientes:

- Tipo y composición del material orgánico que se debe emplear para la biodigestión.
- Demanda de biogás y de biofertilizante.
- Materiales de construcción que se deben emplear.
- Tecnologías constructivas apropiadas.
- Facilidad de explotación y mantenimiento.
- Posibilidad económica del usuario.

Estos seis factores pueden ser resumidos en dos:

- Factibilidad de la inversión (necesidad y condiciones creadas).
- Características y situación económica del usuario.

Las plantas de tecnología simple, según el régimen de carga o llenado, se clasifican en dos tipos fundamentales: de flujo continuo, mayormente empleadas para la obtención de volúmenes considerables de gas; y las de flujo discontinuo o Batch, para pequeñas producciones de biogás.

La gran ventaja de las primeras es que las bacterias metanogénicas reciben un suministro estable del material orgánico, por lo que producen biogás de manera más uniforme.

1.4.8 Aplicaciones del biogás.

La producción de biogás constituye un eslabón importante, con este se puede aprovechar la materia considerada como desperdicio, y origina como subproducto un fertilizante de calidad excelente (bioabonos), y fertirriego, además se puede utilizar en el sector eléctrico como fuente para producir energía renovable. Este producto está aumentando la atención para combustible para intentar reducir la dependencia actual del petróleo. El biogás se obtiene de la elevada producción de residuos sólidos orgánicos que son recursos naturales no aprovechados, por tanto, no existe suficiente espacio para su acomodo final desde el punto de vista ecológico, y afectan a las personas por la cantidad de vectores que generan y afectan el ornato público. Las ventajas que propicia el uso del biogás son: aumentar el valor agregado de las materias recuperadas, generación de empleos, prolongación de la vida útil del relleno sanitario, posibilidades de mejoramiento continuo del proceso, generación de biocombustible y electricidad.

1.5 Sistemas de tratamiento de residuales.

El objetivo principal de todo sistema de tratamiento de aguas residuales es la disminución de microorganismos patógenos, con la finalidad de prevenir la transmisión de enfermedades y reducir los indicadores de contaminación ambiental como son la demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), sólidos sedimentables totales (SST), pH y los microorganismos (huevos de helmintos y coliformes fecales). Estos indicadores deben ser monitoreados con frecuencia semestral.

1.5.1 Tratamiento de los residuales porcinos.

Los residuos porcinos se componen fundamentalmente de excretas, orina, agua de limpieza de los corrales y en menor cuantía de desechos de alimentos, pelos y restos de metabolismo. Comparativamente, su agresividad es 10 veces superior a la de los residuos humanos. Según Antúnez & Sáez (2015) el empleo de una determinada tecnología en el tratamiento de estos desechos está en dependencia de los factores siguientes:

- Cantidad de animales en granja y los que se pretenden incorporar en un futuro inmediato.
- Caracterización del cuerpo receptor de agua según establece la NC 27:2012, a fin de seleccionar el correcto sistema de tratamiento de residuales, capaz de cumplir con los límites permisibles de vertimiento establecidos en dicha norma.
- Disponibilidad de terreno para realizar la construcción del sistema de tratamiento de los residuos.
- Recursos financieros y materiales que se disponga.
- Tiempo de recuperación de la inversión.
- Disposición final de los efluentes o residuos de los sistemas de tratamiento.

De acuerdo con las concentraciones de animales las tecnologías de tratamiento de residuos porcinos que se recomiendan son las siguientes:

- Plantas de tratamiento de residuos.
- Biodigestores y sistemas de lagunas de estabilización.

1.5.2 Plantas de tratamiento de residuos.

Estas plantas son instalaciones relativamente complejas donde tiene lugar los procesos biológicos, físicos y químicos de una forma acelerada. Predominan generalmente en las unidades especializadas, y muchas de estas se componen de varios elementos que seguidamente se mencionan al igual que sus funciones:

- Cámara de rejillas: su función es la de separar los sólidos grandes o gruesos que flotan o que están suspendidos, consisten principalmente de papel y desechos sólidos de basura.
- Desarenador: separan los sólidos inorgánicos pesados, como la arena y la grava de las aguas residuales a la entrada de las plantas de tratamiento.
- Digestores: pueden ser aerobios o anaerobios y sus objetivos son los de reducir la materia orgánica de los residuales.
- Filtros percoladores: disminuyen la concentración de la materia orgánica de forma más eficiente y rápida.
- Lechos de secado: separan la fracción sólida de la líquida en los residuales digeridos.
- Estaciones de bombeo: sirven para el transporte de los residuales de un elemento a otro.

- **Lagunas:** son utilizadas generalmente como elemento final en la reducción de microorganismos patógenos y de materia orgánica. También almacenan los residuales.

1.5.3 Sistemas de lagunas de estabilización.

Los sistemas de lagunas de estabilización son excavaciones de tierra que se impermeabilizan y son diseñadas para el tratamiento de aguas residuales por medio de interacción de la biomasa principalmente con bacterias y algas. Las lagunas se clasifican en anaerobias, facultativas y de maduración, o aerobias.

- **Lagunas anaerobias:** tienen una profundidad de 3 a 5 m con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 1 a 5 días. Su propósito es disminuir la carga orgánica y la mayoría de los sólidos suspendidos y por tanto disminuir el área requerida para el sistema total de lagunas. (ver **Anexo 7**).
- **Lagunas facultativas:** tienen una profundidad útil (que no incluye la acumulación de lodos) de 1,5 a 2 m. La profundidad más utilizada es de 1,8 m con un TRH de 1 a 5 días. (ver **Anexo 8**).
- **Lagunas de maduración:** mantienen un ambiente aerobio en todo su volumen y su misión es la de eliminar microorganismos patógenos y disminuir la DBO₅ mediante un TRH adicional. (ver **Anexo 9**).
- **Lagunas de tratamiento intensivo:**

Son excavaciones en tierra, impermeabilizadas con mantos de plástico, clasificadas como lagunas anaerobias, con una profundidad de 5 m y un TRH menor de dos días. La alimentación es ascendente atravesando un manto de lodo (fundamentalmente bacterias) donde ocurre la degradación de la materia orgánica, equipos separadores se encargan de apartar las tres fases, la fase sólida va al fondo, la parte gaseosa se recoge en bolsas y la líquida sale como efluente.

1.5.4 Biodigestores anaerobios.

Los biodigestores anaerobios son instalaciones herméticas al aire, diseñados con un volumen dado para retener los residuos durante un tiempo necesario para que las bacterias degraden la materia orgánica (Antúnez & Sáez, 2015). Los biodigestores más usados en la agricultura son los de: cúpula fija, campana flotante, los tubulares o de geomembrana (PVC) y del tipo túnel.

1.5.4.1 Tipos de biodigestores más utilizados.

- *Biodigestor de cúpula fija o tipo chino:*

El biodigestor chino (**Figura 1.3**) funciona con presión variable ya que el objetivo no es producir gas sino el abono orgánico (biofertilizante) ya procesado.

El gas se almacena en la parte superior debido al desplazamiento gaseoso. El funcionamiento desde el punto de vista físico del biodigestor de cúpula fija está estrechamente relacionado con el equilibrio entre las presiones hidrostáticas creadas en su interior debidas a la acumulación del biogás generado en el domo o cúpula superior del cuerpo del biodigestor. El residual utilizado como materia prima para la generación del Biogás, previamente mezclado con agua, en las proporciones adecuadas en correspondencia con el tipo de que se trate, se adiciona por el registro de carga y cae dentro del biodigestor por gravedad (Parra Montoya, 2015).

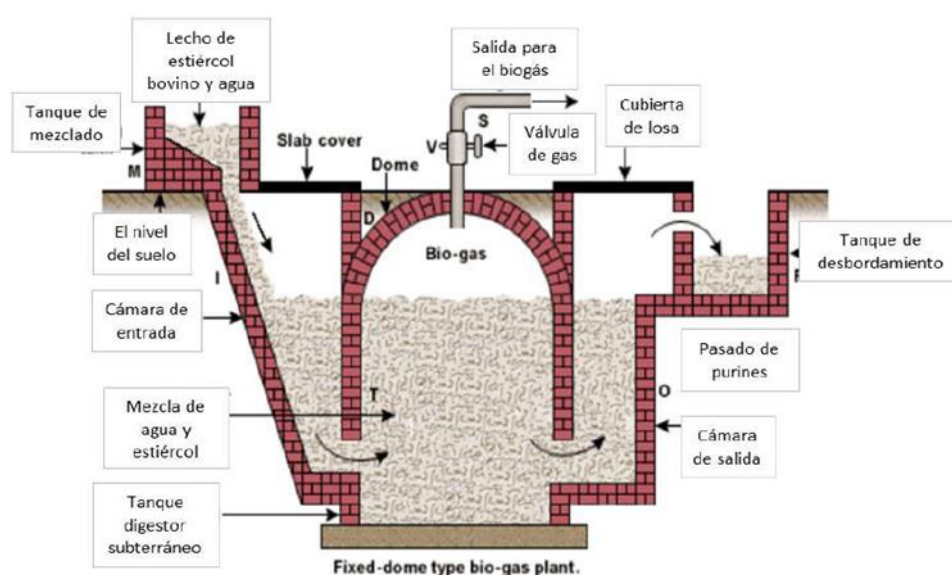


Figura 1.3. Estructura de un biodigestor chino. **Fuente.** (Perdigón, 2014).

El material ya digerido es expulsado hacia la laguna de compensación donde puede recogerse ya como abono orgánico de un buen poder nutritivo para mejorar las condiciones de los suelos donde se realizan los cultivos. Este proceso ocasiona que dentro del biodigestor exista una regulación de la presión del Biogás que no permita que pueda ocurrir una explosión, precisamente por esto es que esta parte recibe el nombre de laguna de compensación, porque compensa las presiones interiores (León & Santana, 2003).

➤ *Biodigestor de campana flotante o tipo hindú:*

Este digestor (**Figura 1.4**) trabaja a presión constante y es muy fácil su operación ya que fue ideado para ser manejado por campesinos de muy poca preparación (Santiago Raffo, 2014).

Este biodigestor consiste en un tanque reactor vertical que tiene instalado una campana flotante recolectora de biogás, que sube y baja dirigida por una guía central. De esta

forma, la presión del gas sobre la superficie de la mezcla es muy baja, de alrededor de 30 cm de columna de agua. El reactor se alimenta en forma semi-continua a través de una tubería de entrada.

Estos reactores están compuestos principalmente por una campana de acero que flota sobre el digestor a medida que el biogás ejerce presión y dispone además de un registro para la recepción de las aguas residuales y una tubería para la salida de los efluentes (Antúnez & Sáez, 2015).

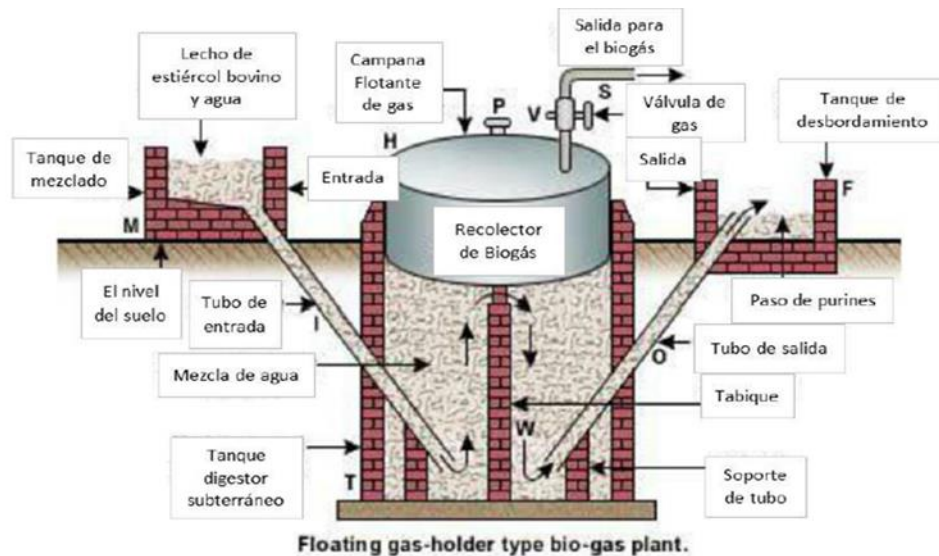


Figura 1.4. Estructura de un biodigestor de domo flotante o hindú. **Fuente.** (Perdigón, 2014).

Este modelo, cuando no se le construye tanque de compensación, que es lo más frecuente, funcionan de forma irregular, por lo cual es necesario abrirlo, limpiarlo y volverlo a cargar (Padrón & Wilfredo, 2009).

➤ *Biodigestores tubulares o de geomembrana (PVC):*

Estos sistemas son los más sencillos y económicos y los más apropiados para las pequeñas granjas que disponen de pocos números en animales. Poseen tuberías de entrada, de salida de los residuales y algunos fabricantes le añaden una salida para la extracción de los sólidos sedimentados en el fondo del biodigestor, como elemento fundamental una bolsa de polietileno, (PVC) u otros materiales de 0,5 a 1 mm de espesor que sirve de digestor, como se puede apreciar en la (Figura 1.5).

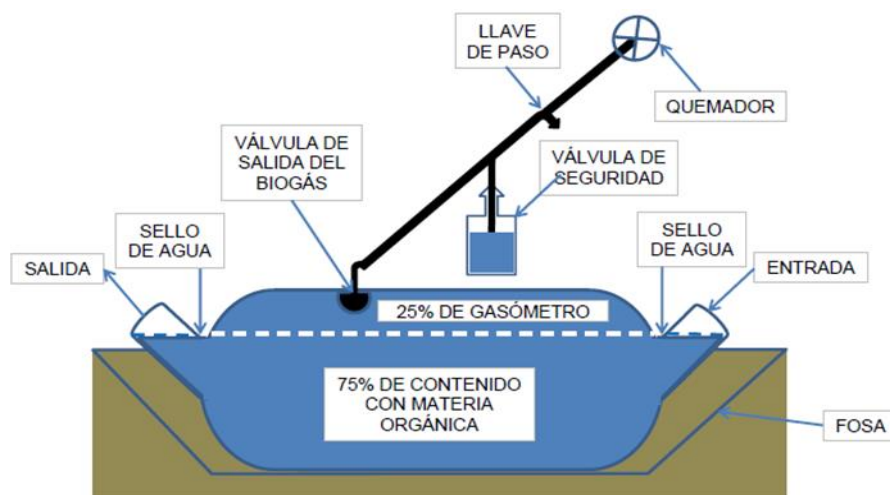


Figura 1.5. Partes del biodigestor de geomembrana (PVC). **Fuente.** (Perdigón, 2014).

El plástico con el que están fabricados los biodigestores es de forma tubular, de calibre 8, protegido con filtro contra luz ultravioleta (LUV) de 1,25 m de diámetro. Dentro de este plástico se descompone o degrada estiércol de diferentes especies de animales o de otro tipo de desechos orgánicos como: de mataderos, heces humanas y desperdicios agrícolas entre otros (León & Santana, 2003).

➤ *Biodigestor para climas tropicales:*

En los países tropicales no es recomendable construir el mismo tipo de biodigestores que se construyen en países de clima frío. AQUALIMPIA ENGINEERING ha desarrollado un tipo de biodigestor tropicalizado apropiado para las condiciones climáticas, de espacio y materiales de construcción existentes en países de clima caliente.

Los biodigestores tropicalizados (**Figura 1.6**) se diseñan de acuerdo a normas alemanas de dimensionamiento y seguridad.



Figura 1.6. Biodigestor tropicalizado. **Fuente.** (Moncayo Romero, 2017).

El biodigestor tropicalizado tiene los siguientes componentes básicos:

- Biodigestor tipo laguna semienterrada o enterrado.
- Sistema de agitación para evitar la formación de costras y maximizar la producción de biogás.
- Sistema de extracción de lodos para evitar que el biodigestor se llene de lodos y se reduzca el volumen útil.
- Control de proceso para la medición y monitoreo de parámetros operativos como redox, pH, temperatura, ácidos orgánicos volátiles (FOS), carbonato inorgánico total (TAC).

1.6 Lechos de Secado.

Los lechos de secado son una de las tecnologías para deshidratación de lodos, más comúnmente usada en pequeñas plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) donde hay disponibilidad de tierra y el clima local es favorable (He et al., 2021). En los casos donde las comunidades tengan poblaciones mayores a 20 000 habitantes deben considerarse otras alternativas de deshidratación de lodos (Alzate Leal, 2021). Son una tecnología aplicable a lodos previamente estabilizados o con alto grado de mineralización, pueden conseguir ahorros significativos en costos energéticos y operativos, además de producir una torta con mayor cantidad de sólidos que los sistemas de deshidratación mecánicos (Metcalf & Eddy, 1995). Si están bien diseñados y se operan correctamente, suelen ser menos sensibles a altas concentraciones de sólidos en los lixiviados y pueden

producir un producto más seco que la mayoría de los dispositivos mecánicos (WEF, 2018).

Si bien existen cuatro tipos de los lechos de secado: convencionales de arena, pavimentados, de medio artificial y asistidos por vacío. En los lechos de secado se utilizan medios porosos como capa de soporte para retener los sólidos, que son separados del exceso de lodo, mientras el agua es removida de los lodos por evaporación y percolación. Una vez estabilizados, los lodos son depositados sobre los lechos de secado con alturas que pueden oscilar entre 20 a 30 cm, dejándose secar hasta alcanzar un contenido de sólidos que puede variar entre 30 a 50 %, posteriormente son retirados manual o mecánicamente para que, de acuerdo con sus características y uso final, se realicen tratamientos adicionales, o sean llevados directamente a disposición final; el filtrado normalmente suele retornar a cabeza de planta (Bassan et al., 2014; Foladori et al., 2013; Lawrence K. et al., 2007).

1.6.1 Mecanismos de deshidratación de lechos.

Los mecanismos responsables de la deshidratación y secado de los lodos en los lechos de secado consisten en la percolación por gravedad a través del medio poroso, y evaporación por radiación-convección, tal como se ilustra en la (Figura 1.7).

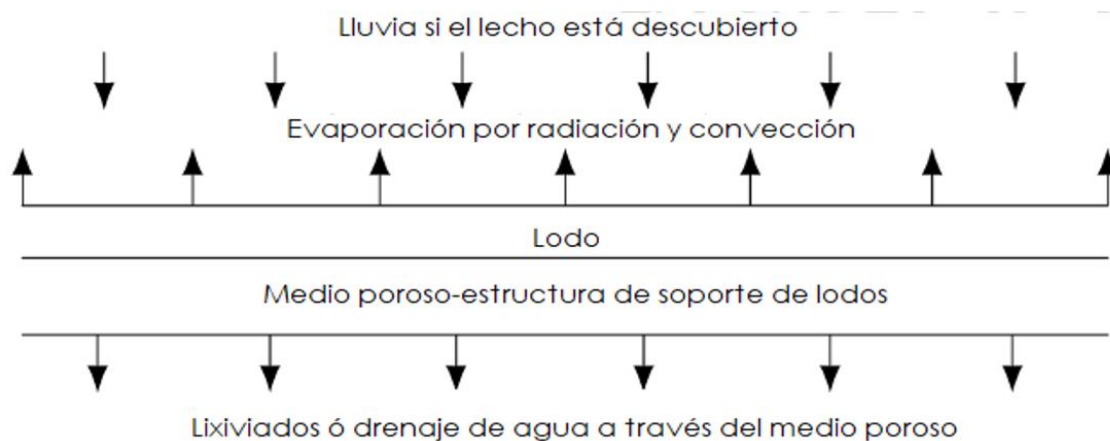


Figura 1.7. Representación esquemática del mecanismo de deshidratación de lodos en lechos de secado. **Fuente.** (Lawrence K. et al., 2007).

En una primera etapa, gracias a que los lodos tienen un gran porcentaje de agua libre, esta percola a través del medio poroso; dependiendo de las características del lodo este proceso puede tardar entre 12 y 18 horas, dando como resultado una suspensión pantanosa que puede tener hasta un 20 % de contenido de sólidos (Ortega et al., 2010). Luego el agua que no percola ha de evaporarse gracias a los fenómenos de radiación y convección. Esta fase es más lenta y genera una disminución de la capa de lodos, llegando a agrietar la

superficie de la torta de lodos, de manera que se favorece la evaporación del agua de las capas inferiores, al ser las grietas cada vez más profundas. Al final de esta etapa, el lodo adquiere una consistencia que permite ser retirado de manera manual mediante palas. Dependiendo de las condiciones climáticas este proceso puede durar semanas e incluso meses.

Heinss et al. (1998) presentaron un informe donde mencionan que la proporción de agua extraída de los lodos por el mecanismo de percolación varía del 50 al 80 %, dependiendo del contenido inicial de sólidos en el lodo y de las características de estos, y en un 20 a 50 % por evaporación, dependiendo de la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire.

1.6.2 Factores que afectan el rendimiento.

Los mecanismos de eliminación de agua imponen una serie de factores y variables operativas que afectan el rendimiento y diseño de los lechos de secado, como lo son de manera abreviada: los factores climáticos, el periodo de secado, la operación a cielo abierto o con cubierta, la tasa de carga de lodos, el grosor de la capa de lodos aplicada y el área requerida, siendo este el parámetro de diseño crítico para la construcción de los lechos de secado para lograr el contenido final de sólidos en el lodo dentro de un tiempo específico (Bassan et al., 2014; McFarland, 2001).

- *Factores climáticos:*

Los factores climáticos regionales influyen en gran medida sobre el rendimiento y la operación de los lechos de secado. Generalmente, el tiempo de secado es más corto en regiones con abundante sol, poca pluviosidad y poca humedad (WEF, 2018). Los valores altos de pluviosidad pueden disminuir la factibilidad de la implementación de los lechos. En lugares con épocas lluviosas marcadas, se podría abstener de operar los lechos de secado en esa época o simplemente se podría instalar un techo (Dodane & Ronteltap, 2014).

- *Período de secado:*

El periodo de secado requerido depende de la naturaleza del lodo, las condiciones climáticas, la cobertura o no de los lechos, el contenido final de humedad deseado y el método de eliminación de sólidos o el uso final de los biosólidos (WEF, 2018). Este periodo oscila entre 20 y 75 días, siendo posible reducirlo si se realiza el volteo de los lodos (Villaseñor Gándara, 1995).

CAPÍTULO II

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente capítulo se realiza una caracterización general de la Empresa Porcina Cienfuegos y específicamente de la Unidad Integral N°1 describiéndose el proceso que se desarrolla en la unidad y el tratamiento de los residuales. Se elabora además la metodología de cálculo y dimensionamiento de los principales elementos del biodigestor de laguna cubierta tropicalizado propuesto para el tratamiento de los residuales porcinos. Mediante ecuaciones y tablas se destaca el procedimiento a seguir, así como se puntualiza las consideraciones realizadas y/o limitaciones.

2.1 Descripción de la Empresa Porcina de la provincia de Cienfuegos.

Esta empresa está conformada por 10 unidades de producción, de ellas: siete productoras porcinas, dos productoras de pienso y una de inseminación artificial, ubicadas en los municipios de Lajas, Palmira, Cienfuegos, Cumanayagua y Abreus.

La Empresa Porcina Cienfuegos es productora de carne de cerdo, superando estrictos controles de calidad antes de su salida al mercado nacional y al turismo. Además, es productora de piensos, que destina a satisfacer las necesidades de sus unidades de crías y multiplicación y los convenios con productores individuales.

2.1.1 Macrolocalización de la Empresa Porcino Cienfuegos.



Figura 2.1. Vista aérea de la Empresa Porcina de Cienfuegos. Fuente. Elaboración propia.

La Empresa Porcino de Cienfuegos se encuentra ubicada en la finca “La Julia”, el Consejo Popular Paraíso, municipio de Cienfuegos, provincia de Cienfuegos, con personalidad jurídica independiente y patrimonio propio, creada por la Resolución N°. 213 - 76 firmada por el Ministerio de la Agricultura el 30 de noviembre de 1976, con carácter nacional mediante.

La misma está conformada por la infraestructura administrativa y de aseguramiento a la producción, con una distancia media a sus unidades productivas de 20 km.

2.1.2 Estructura organizativa de la Empresa Porcina Cienfuegos y sus Unidades Empresariales de Base.

La Empresa Porcina Cienfuegos está conformada por 17 UEB de ellas 6 UEB de Crías Estatales, 1 UEB Multiplicadora, 1 UEB Productora de Pienso, 1 UEB de Aseguramiento y 8 UEB Porcinas Municipales encargadas de la concertación de Convenios Porcinos.

2.1.3 Unidad Empresarial de Base Integral N°1 Porcino Cienfuegos.

El Centro Integral Porcino N°1, perteneciente a la Empresa Porcina de Cienfuegos, se encuentra situado en la Finca “La Caridad”, km 2, Carretera Central (tramo de Cienfuegos a Palmira). Limita por el norte con el Centro de Crías Multiplicador y la Planta Pienso Líquido Terminado, así como áreas del sector privado; por el sur se encuentra el Centro Integral Porcino N°2, al este la carretera de acceso y viviendas de algunos trabajadores y al oeste limita con ríos y áreas del sector privado y cooperativas. Se encuentra situada en el cuadrante 046 127-49 perteneciendo al municipio de Palmira.

El objeto social del centro es la producción de precebas para conveniar con empresas Estatales, Cooperativas y Campesinos Privados.

Misión: Producir 16 112 precebas, entregar 654 atas terminadas con un peso promedio de más de 100 kg para el cumplimiento de la política de auto reemplazo.

Visión: Sobre cumplir los indicadores económicos productivos. Alcanzar y mantener la categoría de excelencia. Tener a los trabajadores motivados para un mayor rendimiento en la producción.

2.1.4 Distribución de la Unidad Integral N°1.

Sus instalaciones ocupan un área de 15 ha y cuenta con:

- Naves de reproducción: 8
- Naves de maternidad: 6
- Naves de Precebas: 12
- Almacén Central: 2 (piensos, medicamentos, víveres)
- Planta de Tratamiento de Residuales.

2.1.5 Descripción del proceso productivo de la Unidad Integral N°1.

En la Unidad Integral N°I la producción porcina se desarrolla en naves acondicionadas con los requisitos de producciones epizooticas y zootécnicas lo que permite asegurar el mayor control de la masa desde la gestación hasta la preceba. La alimentación de la masa

porcina se recibe de la planta de pienso líquido, planta de pienso seco, piensos nacionales y piensos importados.

El sistema de producción de la unidad se organiza en las siguientes áreas:

- Área de Reproducción
- Área de Maternidad
- Área de Preceba

2.1.6 Manejo de Portadores.

2.1.6.1 Manejo del agua.

El estimado de consumo de agua por animal es de 25 litros de agua. La limpieza se realiza en 1 hora de trabajo con mangueras a presión. Las fuentes de agua se encuentran alejadas de las áreas de eliminación de desecho. En la Unidad se realiza el análisis de agua cada tres meses con el objetivo de valorar la calidad de la misma.

2.1.6.2 Manejo de la energía.

La energía es suministrada por la Red de Distribución Nacional. El centro tiene un metro contador que es para las cuatro Unidades del Porcino con una tarifa de 56 000 kW y 10 000 kW es asignado a la Unidad Integral N°1, esta distribución se realiza de acuerdo a la cantidad a consumir según plan de producción.

2.1.7 Caracterización de los residuales de la Unidad Integral N°1.

El residual porcino crudo es arrastrado por gravedad durante la limpieza húmeda diaria, por las atarjeas de las naves, con 1 % de pendiente hasta su entrada al sistema de tratamiento.

Después de la remodelación de que fue objeto esta entidad, tendrá capacidad para 10 460 animales, distribuidos en las siguientes categorías:

- 1 000 reproductoras
- 60 verracos
- 1 800 crías
- 2 300 pre-cebas
- 5 300 cebas

El gasto del agua que se produce diariamente puede ascender hasta 125 m³/día cuando el centro esté a máxima capacidad. El consumo del mismo será de 156 m³/día, y se utilizará como fuente de abasto, 2 pozos de agua potable existente en el área de los integrales.

2.1.7.1 Residuos sólidos.

Durante todo el proceso productivo desarrollado en esta unidad en todas sus etapas se generan residuos los cuales están constituidos por las excretas de los cerdos, son el conjunto de orina y heces que produce el animal. La orina representa aproximadamente el 45 % y las heces el 55 % del contenido volumétrico total de excretas. Otros residuos que se pueden considerar son los generados por los comederos y bebederos, desechados por su mal estado, así como las jeringas y material veterinario utilizado durante la crianza. La excreta porcina contiene sólidos que flotan y sólidos que sedimentan, además de sólidos en suspensión. Diariamente, se generan alrededor de 0,968 kg de demanda biológica de oxígeno (DBO_5) y 0,75 kg de demanda química de oxígeno (DQO) por cada 100 kilos de peso vivo.

2.1.7.2 Residuos líquidos.

En la Unidad Integral 1 la mayor producción de residuos líquidos se genera por la orina de los cerdos y por el agua de lavado de los corrales. Estos residuos requieren de un tratamiento previo ya sea a través de lagunas de oxidación o plantas de tratamiento que remuevan los contaminantes presentes en el efluente, hasta llevarlo a los parámetros establecidos en la Norma Técnica para el Vertido de Aguas Residuales en Cuerpos Receptores.

2.1.7.3 Emisiones atmosféricas.

En la Unidad Integral I se producen malos olores que afectan a las poblaciones aledañas. Esto se debe a la generación de los siguientes gases:

Dióxido de carbono y metano (CO_2 y CH_4).

El amoníaco (NH_3).

El sulfuro de hidrógeno (H_2S).

El dióxido de carbono proviene principalmente de la respiración de los animales. El amoníaco, el metano y el sulfuro de hidrógeno de la acción de determinadas bacterias sobre las deposiciones de los animales.

En el municipio de Palmira se encuentran tres de las instalaciones porcinas más importantes de la provincia, con el mayor número de animales: Integral 1, Integral 2 y el Multiplicador. El Multiplicador cuenta con 13 naves de ellas 4 son de reproducción, 3 de maternidad y 6 de preceba, con un total de 1 933 animales como promedio en el mes, siendo esta la unidad más pequeña. La Integral 1 y 2 tienen 26 naves cada una, de ellas 8 son de reproducción, 6 de maternidad y 12 de preceba, con un promedio mensual de 4 948 y 3 966 animales respectivamente. Cada unidad tiene su sistema de tratamiento de

residuales líquidos constituido por lagunas de oxidación, y en el caso de la Integral 2 tiene además 8 lechos de secado y dos trampas de sólidos.

El ciclo de vida de la producción porcina genera como promedio a la atmósfera:

- 25 L de residual líquido diario para un animal de 90 kg.
- 2,25 kg de excreta sólida por día para un animal de 50 kg.
- 0,968 kg de DBO₅ para un animal de 100 kg.

Debido a su alta concentración de materia orgánica y los grandes volúmenes de agua que se manipulan, estas instalaciones son un foco contaminante que afecta las aguas terrestres y marinas; siendo los mayores contaminadores por materia orgánica de la cuenca del río Salado, que desemboca en la bahía cienfueguera. Este impacto ambiental no está cuantificado ni están identificadas las categorías de impacto y de daño que están siendo afectadas.

La densidad de la excreta fresca es ligeramente menor de 1,0 kg/l (aunque son comunes los valores ligeramente superiores a 1,0). El total de los sólidos tiene una densidad baja, de 0,84 kg/l. La excreta porcina contiene sólidos que flotan y sólidos que se sedimentan, además de sólidos en suspensión.

La caracterización resulta fundamental para la planificación del manejo de purines, su importancia radica en ser uno de los criterios principales en la selección del sistema de tratamiento y en su posterior diseño de ingeniería.

Los principales parámetros, que caracterizan al purín desde el punto de vista de sus constituyentes y el volumen producido, que se necesitan para el diseño de un sistema de tratamiento de purines son:

- Flujo medio total diario (m³/día).
- Demanda biológica de oxígeno DBO₅ (mg/L).
- Sólidos volátiles (mg/L).
- Nitrógeno total (mg/L).
- Fósforo (mg/L).

2.1.8 Sistema de recolección de residuales de la Unidad Integral N°1.

En la UEB Integral N°1 se aplica el sistema de tratamiento natural, específicamente es utilizado el método o sistema acuático (sistema de lagunas). En este Integral no se aplica el método o sistema terrestre dado que no se reutiliza las excretas como abono orgánico, ni existe un biodigestor.

El sistema de tratamiento de la UEB Integral N°1 está conformado por:

Tabla 2.1. Sistemas de Tratamientos de Residuales de la UEB Integral N°1.

Sistemas de Tratamientos y/o	Cantidad
Recolección de Residuales Porcinos	
Trampa de sólidos	1
Laguna anaeróbica	2
Laguna facultativa	2
Laguna aeróbica	1
Micro Presa	1

Fuente. Elaboración propia.

Una vez realizada la limpieza húmeda diaria, el agua residual cruda es conducida mediante un canal trapezoidal revestido con lajas de hormigón hasta la batería de lagunas de estabilización

Las lagunas trabajaran por gravedad y en serie para garantizar la eficiente calidad del efluente resultante. Esta combinación de lagunas en serie es muy práctica para facilitar la remoción de los lodos sobre todo en residuales agropecuarios y mejorar la calidad del efluente.

2.1.9 Estudio del módulo para 5 300 cebras.

Este proyecto se basa en la creación de un módulo para 5 300 animales en ceba, ya que es el animal en la etapa adulta, con condiciones de mayor peso por lo que genera mayor cantidad de materia orgánica por día, aunque el centro no posee instalaciones que permitan el tratado del estiércol producido, por lo que se realizará la caracterización de la producción de excretas de los animales y posteriormente se realizará el diseño de un biodigestor de laguna cubierta para el tratamiento de dichos residuos.

Guardado Chacón (2007) y Varnero Moreno (2011) establecen un promedio de excreta por ceba de 2,25 kg al día de acuerdo a la cantidad de animales en relación a un peso promedio de 50 kg, por lo que se llevó a realizar la siguiente tabla de acuerdo a la cantidad de animales estimados de la Unidad Integral 1, para este caso solo se analizarán las cebras. En la (**Tabla 2.2**) se aprecia que el mayor número de animales y la mayor disposición de excretas corresponde a los cerdos en ceba, con un valor cercano a las 12 t/día.

Al seleccionarse un valor promedio de producción de excretas de 2,25 kg para el lote de 5 300 cebras, se obtiene un total de 11 925 kg/día.

Tabla 2.2. Cantidad de excretas generadas por animal (kg/día).

Tipo de animal	Excretas diarias/animal (kg)	Cantidad de Animales (Nº)	Cantidad de excretas/día (kg/día)
Reproductoras	1,90	1 000	1 900
Verracos	2,05	60	123
Crías	0,9	1 800	1 620
Pre-cebas	2,17	2 300	4 991
Cebas	2,25	5 300	11 925

Fuente. Elaboración propia

2.2 Diagrama heurístico de la metodología propuesta.

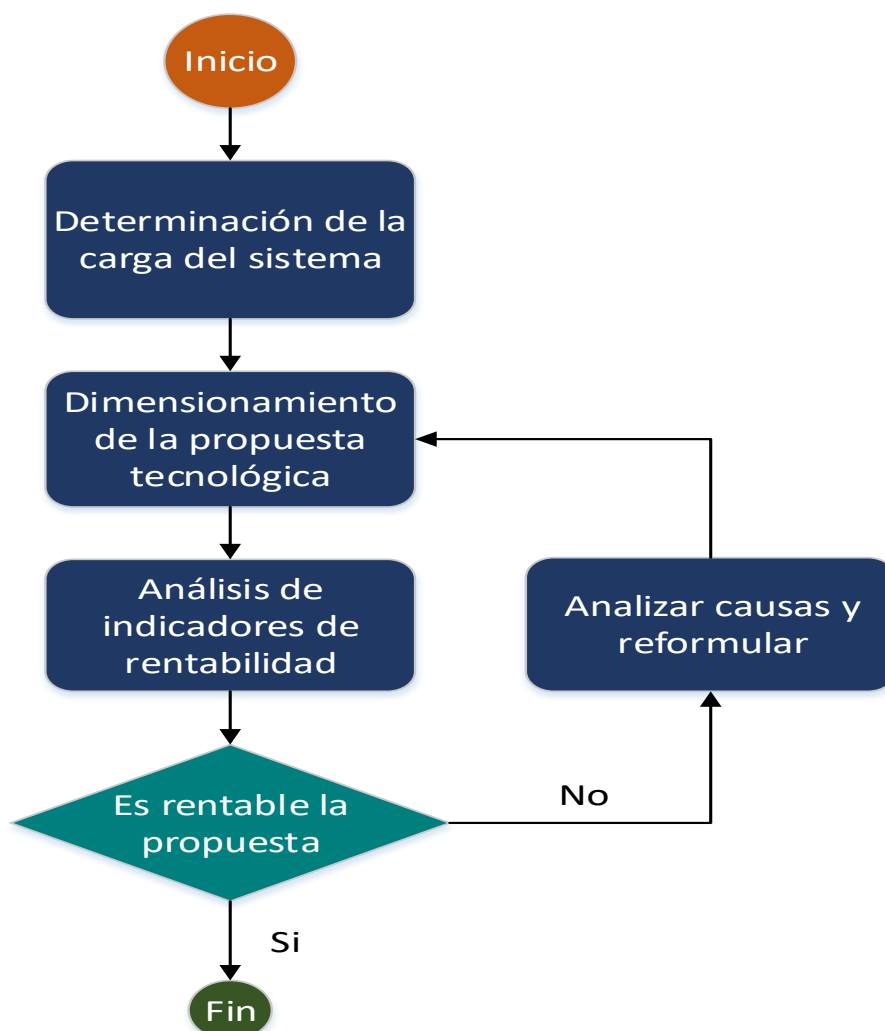


Figura 2.2. Esquema del diagrama heurístico. **Fuente.** Elaboración propia.

2.3 Desarrollo de la metodología de diseño de biodigestor tropicalizado y sistema de aprovechamiento de residuales en la empresa porcina UEB Integral N°1.

2.3.1 Especificaciones del tanque de alimentación.

Los tanques de alimentación, se dimensionan para el volumen diario de alimentación del biodigestor. Este tanque servirá para hacer la mezcla (estiércol de las cebas y agua de dilución).

Este tanque de alimentación sirve además para sedimentar los materiales pesados (piedra, tierra, etc.) y materiales sobrenadantes, para proporcionar un fluido libre de materiales extraños.

El volumen del tanque depende de la continuidad en la alimentación. En algunos casos se prefiere dimensionar el tanque de alimentación para que almacene la mezcla de estiércol de las cebas con agua requerida en un período de 1 a 2 horas. Para este proyecto se dimensionará el tanque de alimentación para que almacene el flujo de una hora.

Se dimensionó el tanque de alimentación con la cantidad de mezcla (estiércol y agua) de entrada por día, ($\text{m}^3/\text{día}$) mediante la siguiente ecuación.

$$Sd = (1 + N) * Md \quad (1)$$

Con:

Sd (Cantidad de mezcla (estiércol + agua) de entrada por día, $\text{m}^3/\text{día}$).

N (Tasa de disolución de la mezcla de alimentación, L/kg).

Md (Cantidad de estiércol de entrada diario, kg/día).

Según Blanco Betancourt (2012) el valor recomendado de N para estiércol porcino es de 2, ya que por cada litro de excreta se deben adicionar dos litros de agua, para garantizar menos del 8 % de sólidos.

Al tener el estiércol, con una densidad aproximada a uno, su volumen se puede estimar igual que su peso, es decir, (1 L de estiércol = 1 kg). Otros autores como (Guardado Chacón, 2007) considera que la relación (1:1-3) que aparece en la tabla 2 del manual de diseño y construcción de plantas de biogás sencillas, manteniendo lo anteriormente dicho establece para N un valor de 3 a tomar en cuanto a la proporción de la cantidad de agua por excreta por la cantidad de excreta que produce el animal por día.

2.3.2 Caudal de diseño.

Según Moncayo Romero (2017) se recomienda que al caudal definido se le añada un 20 % adicional, para soportar picos de cargas orgánicas. Aunque señala Guardado Chacón

(2007) que el factor de corrección (Fc) de 1,3 se aplica para el cálculo del volumen necesario de digestión en cuanto al caudal de diseño del biodigestor. Para este caso de se tomará un valor de 1,3 para (Fc).

$$Cd = Sd * Fc \quad (2)$$

Cd (Caudal de diseño, m³/día).

Fc (Factor de corrección) = 1,3

Sd (Cantidad de mezcla (estiércol + agua) de entrada por día) = 47,7 m³/día.

2.3.3 Volumen útil del tanque de alimentación.

Para el cálculo del volumen útil es necesario tener en cuenta la limpieza de los pisos de las áreas productivas de la granja, esta se realiza en un máximo de 6 horas. A continuación, se muestra la fórmula para el cálculo:

$$Vu = \frac{Cd}{Tl} \quad (3)$$

Donde:

Vu (Volumen útil, m³).

Cd (Caudal de diseño) = 62,01 m³/día.

Tl (Tiempo de limpieza) = 6 h/día.

2.3.4 Volumen total del tanque de alimentación.

No existe una regla definida para dimensionar estos tanques de alimentación. Pueden ser de forma cilíndrica, cuadrangular o rectangular. En este caso se optó por dimensionar este tanque de forma rectangular, asumiendo que el largo sería igual que el ancho (2,5 m).

Tendrá una altura de 2 metros y se le añadirá un borde o altura libre de 0,30 metros, para evitar derramamientos (Moncayo Romero, 2014).

Para el cálculo del volumen total del tanque de mezcla se utiliza la fórmula del volumen del cubo rectangular:

$$Vt = l * a * h \quad (4)$$

Donde:

l (largo) = 2,5 m.

a (ancho) = 2,5 m.

h (altura) = 2 m.

Vt (Volumen total del tanque de alimentación, m³).

2.4 Especificaciones del biodigestor tropicalizado tipo laguna de lecho tapado.

2.4.1 Selección del tiempo de retención hidráulico.

En digestores continuos y semicontinuos el tiempo de retención hidráulico (TRH) se define como el valor en días del cociente entre el volumen de biodigestor y el volumen de carga diaria. De acuerdo al diseño del digestor, el mezclado y la forma de extracción de los efluentes pueden existir variables diferencias entre los tiempos de retención de líquidos y sólidos debido a lo cual suelen determinarse ambos valores.

La fracción de materia orgánica degradada aumenta al aumentarse el TRH, sin embargo, la producción volumétrica de metano (producción por unidad de digestor) disminuye, una vez superado el óptimo. Por eso para determinar el TRH que optimiza el proceso de digestión, se tuvo en cuenta referencias de plantas de biogás existentes que trabajan con este tipo de sustrato.

El TRH está íntimamente ligado con dos factores: el tipo de sustrato y la temperatura del mismo. El TRH se determina en base a la temperatura de la biomasa y la temperatura promedio ambiental de la zona. En la (Tabla 2.3) se muestran las temperaturas ambientales que alcanza la materia orgánica en cuanto a su TRH en el biodigestor.

Tabla 2.3 Tiempo de retención hidráulica en relación a la temperatura ambiental.

Temperatura ambiente (°C)	TRH (días)
15	56
27	30
37	24
49	16

Fuente. (Paiva Periche, 2016).

La temperatura media anual en el municipio de Palmira es de 29 °C según International Standard Atmosphere (2018) por lo que se seleccionó 30 días como el tiempo de retención hidráulica.

2.4.2 Carga diaria para alimentar al biodigestor.

La carga (Sd) con la que se alimenta diariamente al biodigestor es de 47,7 m³/día.

2.4.3 Construcción de la laguna para el biodigestor.

La laguna es la parte más importante de un biodigestor de laguna cubierta. La excavación para el biodigestor se realizará con medios manuales y maquinaria.

El fondo y taludes, serán revestidos de una capa delgada de 4 cm de hormigón para igualar las irregularidades del suelo. La capa de hormigón servirá para estabilizar el talud.

2.4.3.1 Volumen de diseño del biodigestor.

Según Moncayo Romero (2014) al volumen calculado se le debe dar un 20 % de volumen adicional (volumen de seguridad) para soportar picos de carga orgánica. Entonces se realizará el cálculo de la manera siguiente:

$$V_{DB} = V_{UB} * Fc \quad (5)$$

V_{DB} (Volumen de diseño del biodigestor, m³).

V_{UB} (Volumen útil del biodigestor, m³) = 1 431 m³.

Fc (Factor de corrección) = 1,2.

2.4.3.2 Volumen útil del biodigestor.

Se calcula el volumen útil del biodigestor multiplicando la carga diaria de alimentación (caudal máximo) por el tiempo de retención hidráulico dado para este sistema, mediante la siguiente fórmula.

$$V_{UB} = Sd * TRH \quad (6)$$

Sd (Cantidad de mezcla (estiércol + agua) de entrada por día) = 47,7 m³/día.

TRH (Tiempo de retención hidráulica) = 30 días.

V_{UB} (Volumen útil del biodigestor, m³)

2.4.3.3 Dimensiones del biodigestor:

El dimensionamiento geométrico del sistema se calcula a partir del volumen total del biodigestor, utilizando la ecuación con la que se estima un cuerpo geométrico de forma trapezoidal, cuadrangular o rectangular (pirámide invertida truncada).

$$V_{DB} = \frac{h_1}{3} * (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 * A_2}) \quad (7)$$

Donde:

V_{DB} (Volumen de diseño del biodigestor, m³).

h_1 (Altura del biodigestor, m).

A_1 (Área del piso, m²).

A_2 (Área del nivel máximo de agua o de la corona, m²).

Según Moncayo Romero (2017) la altura debe estar entre 3 a 4 metros. Para este proyecto se eligió una altura de 4 metros, que es el más recomendable para biodigestor de gran volumen.

El talud de las paredes del biodigestor deberá ser superior de 1:3 y no mayor de 1:1 (**Figura 2.3**) para la colocación de la geomembrana. Si los taludes son superiores de 1:1 las paredes se volverán inestables. Se utilizó para este biodigestor un talud de 1:1, ya que es el recomendado (Moreno, 2019).

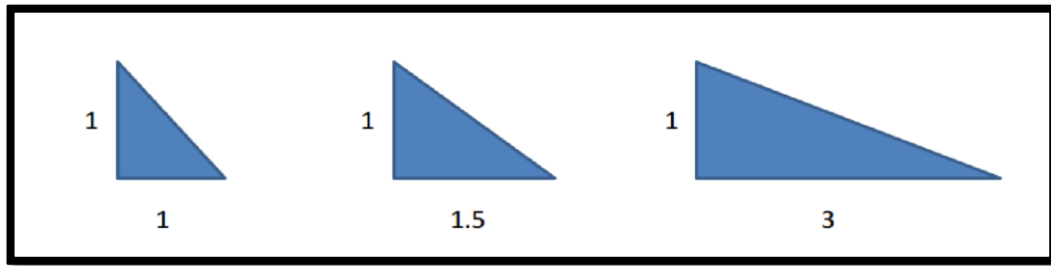


Figura 2.3. Medidas de los taludes para biodigestores de laguna cubierta. **Fuente.** Elaboración propia.

Por lo tanto, una vez conociendo la altura (4 metros), el volumen de diseño del biodigestor, y sabiendo que tiene forma de pirámide truncada rectangular se hallan las medidas del área del piso (A_1) y las medidas de la corona (A_2) del biodigestor (**Figura 2.4**).

El largo del piso debe ser 3 veces el ancho del mismo (Paiva Periche, 2016). Es decir:

$$\text{Largo (l)} = 3x$$

$$\text{Ancho (a)} = x$$

El largo y el ancho de la corona de la laguna del biodigestor será el valor del ancho y largo del piso adicionándole 8 m a cada uno.

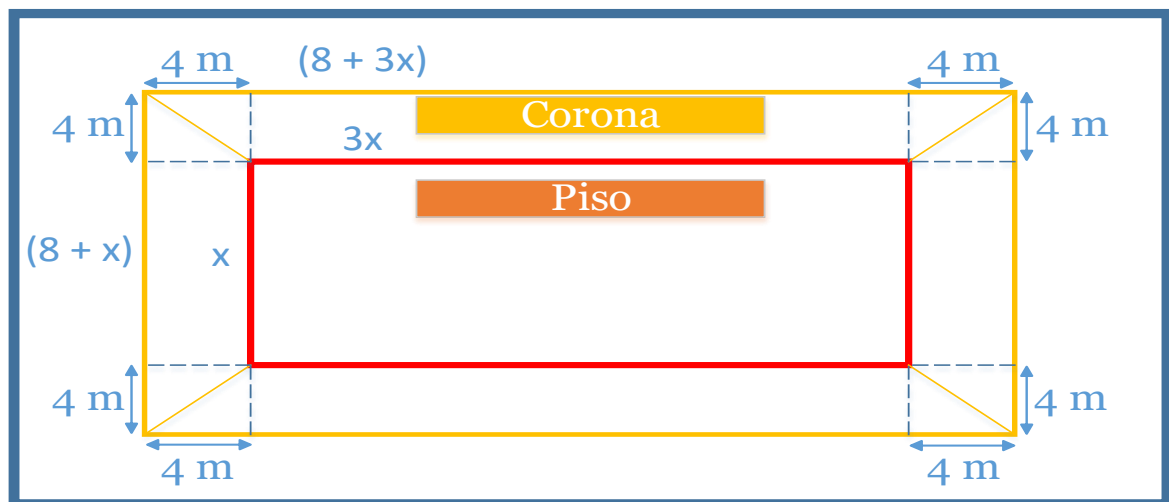


Figura 2.4. Vista superior de la pirámide truncada rectangular. **Fuente:** Elaboración propia.

Donde:

A_1 (Área base inferior o del piso, m^2)

A_2 (Área base superior o de la corona, m^2)

Área base inferior o del piso.

Donde:

$$l_1 = 3x$$

$$a_1 = x$$

$$A_1 = l_1 * a_1 \quad (8)$$

Por tanto:

$$A_1 = 3x * x = 3x^2 \quad (8)$$

Área base superior o de la corona, (m²).

Donde:

$$l_2 = (8 + 3x)$$

$$a_2 = (8 + x)$$

$$A_2 = l_2 * a_2 = (8 + 3x)(8 + x) \quad (9)$$

Por tanto:

$$A_2 = 3x^2 + 32x + 64 \quad (9)$$

Entonces se sustituye (8) y (9) en (7), y realizando esta operación matemática podemos hallar el valor de (x).

2.4.4 Muro perimetral para sujetar la membrana de cubierta.

La membrana de cubierta del biodigestor se sujeta en un muro perimetral de hormigón armado, ladrillo o bloque de hormigón reforzado con varillas de acero y sobre ella se realiza la unión por medio de las platinas y de los pernos de anclaje (**Figura 2.7**). Dependiendo del tamaño del biodigestor y de la altura del muro se requiere de una cimentación en forma de zapata corrida sencilla.

Existen varias alternativas para la construcción del muro perimetral. No hay una receta válida para todos los casos. Para cada proyecto se debe analizar cuál es la opción más favorable.

Se usará un muro perimetral de bloque reforzado con varillas de acero, levantado sobre cimentación en forma de zapata corrida. Las especificaciones son las siguientes:

- El ancho de la pared será de 0,40 m.
- La altura es de 1 m.
- Bloques de 0,20*0,20*0,40 m reforzadas con varillas de acero.

Según Paiva Periche (2016) se recomienda las siguientes especificaciones para la zanja de anclaje, las cuales fueron tomadas para el desarrollo de este proyecto:

- A 1 m de distancia del inicio del talud.
- Ancho de 0,50 m.

- Profundidad de 0,90 m.

2.4.5 Material para la cubierta del biodigestor.

En la cubierta del biodigestor es donde se almacenará el biogás, será recubierto con geomembrana de caucho EPDM (etileno, propileno, dieno, monómero) ya que la membrana debe ser de un material flexible como lo es el caucho. A continuación, se detallan las características que deben tener las membranas de cubierta para biodigestores:

1. Altamente elongable.
2. Resistencia a los rayos UV.
3. Resistente a la rasgadura y los punzonamientos.
4. Resistentes a ácidos y sustratos agresivos.
5. Baja permeabilidad al biogás.
6. Resistente a las inclemencias del tiempo.
7. Alta vida útil.

Las membranas de EPDM, tienen larga vida útil debido a sus características físico químicas, como la resistencia a aguas agresivas, biogás, humedad, elongación, rasgado, etc. La vida útil de estas membranas es de 15 a 20 años. Las membranas de este material pueden estirarse hasta el 400 % de su tamaño sin sufrir daños.

Por lo tanto, las dimensiones de la geomembrana EPDM, para cubrir el biodigestor y captar el biogás producido, se detalla en la (Tabla 2.4).

Tabla 2.4. Dimensiones de la geomembrana EPDM para la cubierta del biodigestor.

Características de la geomembrana para la cubierta del biodigestor.	Largo (m)	Ancho (m)
<i>Corona del biodigestor</i>	35,96	17,32
<i>Espesor del muro perimetral</i>	0,5	0,5
<i>Vereda antes del muro perimetral</i>	1	1
<i>Dimensiones de la geomembrana para la cubierta</i>	37,46	18,82
<i>Sobredimensionamiento</i>	1	1
<i>Dimensión total de la geomembrana para la cubierta</i>	38,46	19,82
<i>Área total de la geomembrana para la cubierta</i>	762,27 m ²	

Fuente. Elaboración propia.

2.5 Especificaciones de los lechos de secado.

Como tal la laguna de descarga, se utiliza de acuerdo a las condiciones actuales de la empresa para que almacene el efluente del biodigestor, pero en este caso utilizaremos los lechos de secado como método o propuesta para la obtención de biofertilizantes a partir del efluente del biodigestor. Teóricamente el 75 % de DQO se degrada en el biodigestor, por lo que el 25 % debe degradarse en los demás sistemas de tratamiento para cumplir con la normativa del Límite Máximo Permisible (L.M.P) para plantas agroindustriales.

El efluente de los lechos de secado, dependerán del volumen del afluente al biodigestor y, del aprovechamiento del efluente, como fertilizante en la agricultura o de su comercialización, y de la normativa de descarga que se tenga que cumplir.

Los lechos de secados se ubicarán en una zona cercana al biodigestor donde estos lechos se comunicarán con las lagunas de oxidación, en dependencia de las condiciones del clima o del modo de operación de la empresa, se le da la opción de llevar las excretas a las lagunas de oxidación o a los lechos de secado. En la (**Figura 2.5**) se aprecian los lechos de secado en cuanto al efluente del biodigestor y la obtención de los biofertilizantes. Estos flujos diarios de materia orgánica por día producida por las cebas se llevarán a los lechos de secado para su conversión en biofertilizantes.

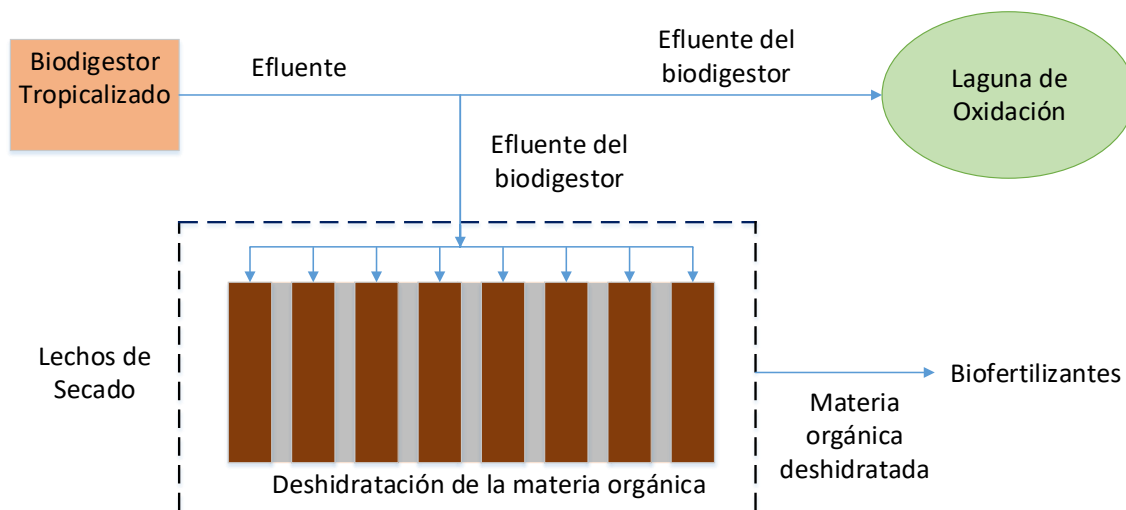


Figura 2.5. Esquema de los lechos de secado. **Fuente.** Elaboración propia.

2.6 Indicadores de producción de biogás del sistema de biodigestión.

Los criterios de producción estimada de biogás por kg de excreta de cerdo difieren en valor dependiendo de los autores consultados, según Guardado Chacón (2007) los índices de producción de biogás (m^3/kg de excreta) es de 0,04 mientras que Moreno (2019) plantea que el índice es de 0,025.

Para el cálculo estimado de la producción de biogás se utilizará como índice de producción de biogás 0,03 como valor promedio. A continuación se muestra la fórmula:

$$Bgp = Md * Id \quad (10)$$

Donde:

Bgp (Biogás producido)

Md (Cantidad de estiércol de entrada diario, kg/día) = 11 925 kg de excreta/día.

Id (Índice de producción) = 0,03.

2.7 Estructuras auxiliares.

2.7.1 Tuberías de alimentación y descarga.

Los biodigestores, deben tener un sistema de alimentación y uno de descarga. Dependiendo del tipo de sustrato y del grado de seguridad que se desea obtener se deben instalar solamente una tubería de captación y una de descarga. Pero para este proyecto debido al volumen del biodigestor y de la laguna de descarga se utilizarán 2 tuberías de alimentación y dos tuberías de descarga.

Se utilizarán tuberías que se utilizan para agua potable. A pesar de las bajas presiones con las que trabajan las tuberías de alimentación, es recomendable, utilizar este tipo de tuberías debido al espesor de la pared del tubo y su alta resistencia y durabilidad.

A. Tuberías de alimentación.

Las tuberías de alimentación conducen la biomasa desde el tanque de alimentación de control hacia el fondo del biodigestor. Estas tuberías descargan a 1 metro del fondo del biodigestor. Por lo menos deben descargar más abajo del 50 % de la profundidad del biodigestor. Son rectas y no se añadieron codos para facilitar la limpieza en caso de taponamientos.

El diámetro de la tubería será de 200 mm (el más recomendable). Se utilizarán dos tuberías de alimentación.

B. Tuberías de descarga.

Las tuberías de descarga extraerán el biol (componente líquido) o digestato degradado del biodigestor. Se instalarán la misma cantidad de tuberías (PVC) que en el tanque de alimentación (2 tuberías) con un diámetro de 200 mm.

2.7.2 Pozo de control del efluente del biodigestor.

Las tuberías de descarga, siempre deben descargar en un pozo de control del biol (**Figura 2.6**), que sirve para acceder a la tubería en caso de obstrucciones.

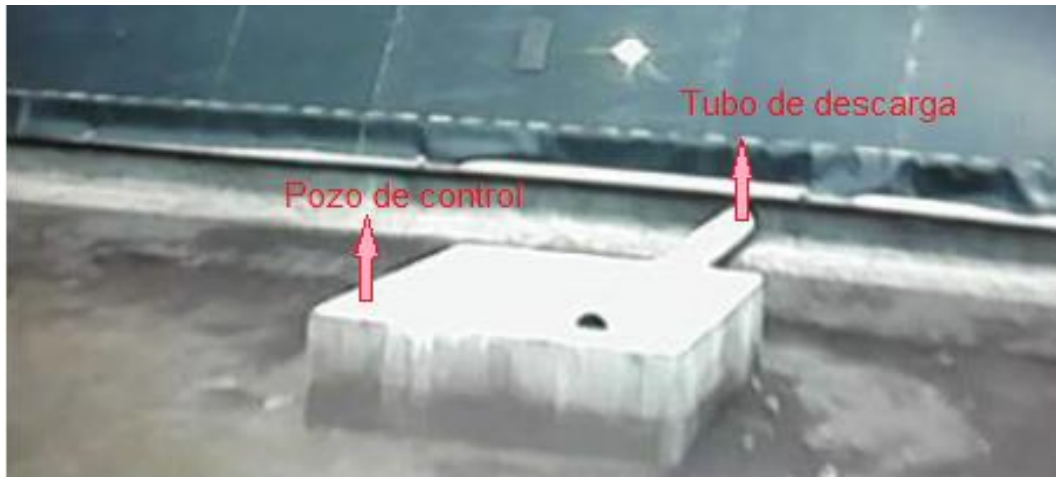


Figura 2.6. Pozo de control para la descarga del efluente del biodigestor. **Fuente.**
Elaboración propia.

Los pozos de control deben tener dimensiones adecuadas para que una persona entre al pozo y pueda introducir una varilla o manguera para la limpieza de las tuberías, uno por cada tubería.

Las dimensiones del pozo de control se muestran en la (Tabla 2.5).

Tabla 2.5. Dimensiones del pozo de control.

Dimensiones	
<i>Altura</i>	1 m
<i>Ancho</i>	1 m
<i>Largo</i>	1 m
<i>Espesor</i>	0,15 m

Fuente. (Moreno, 2019).

2.7.3 Tuberías de captación de biogás.

La captación del biogás que se produce en el biodigestor se realiza por medio de tuberías. El material seleccionado para las tuberías es de PVC, para evitar corrosiones y reemplazos constantes de las mismas, evitando paras en el proceso, pues este tiene como inconveniente adicional del biogás la saturación de un 100 % de vapor de agua y contiene ácido sulfhídrico.

Se ha previsto de al menos dos puntos de captación de biogás ubicados en lados opuestos. Para biodigestores con un volumen mayor a 1 000 m³, se deben instalar tuberías con un diámetro de 100 mm.

Se ubicarán las tuberías de captación de biogás en el tramo del muro perimetral que sella la membrana.

Se usará la siguiente alternativa para la captación de biogás a través del muro perimetral (**Figura 2.7**). Se pondrá mucha atención para que la tubería quede bien sellada y no haya fugas de biogás. La distancia mínima de la captación de biogás debe ser de 0,3 metros sobre el nivel máximo de llenado del biodigestor.



Figura 2.7. Diagrama esquemático de captación de biogás. **Fuente.** (Paiva Periche, 2016).

2.8.4 Sistema de agitación.

Se seleccionaron agitadores de acero inoxidable, diseñados expresamente para biodigestores.

El pozo de los motores del agitador, deben ubicarse a los costados del biodigestor. Debido al ancho del biodigestor, se deberá instalar un agitador a cada lado (**Figura 2.8**).

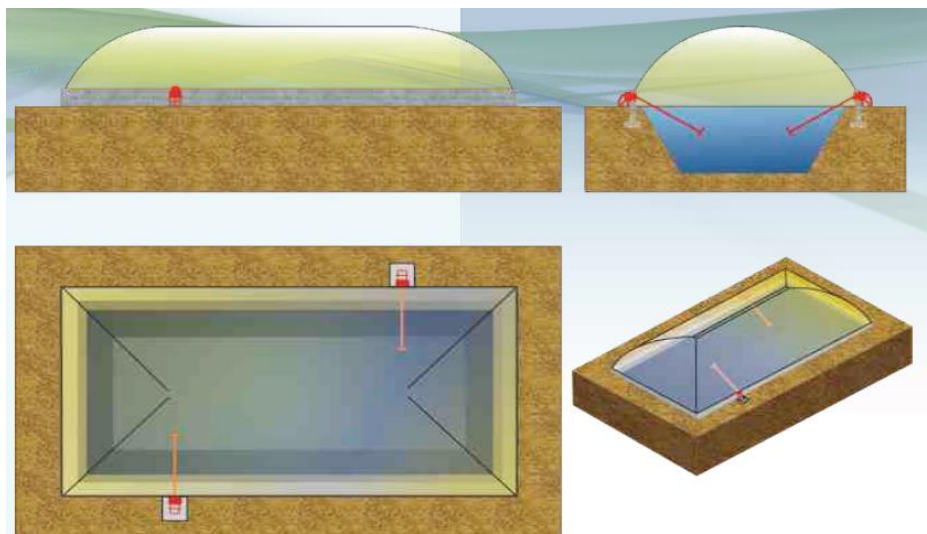


Figura 2.8. Ubicación de los agitadores en el biodigestor. **Fuente.** (Moncayo Romero, 2017).

Por razones mecánicas y estructurales, se debe limitar la longitud del eje del agitador a un máximo de 6 m, longitudes mayores requieren de una mayor fuerza de torsión para el giro del agitador. La velocidad de giro a la que trabajan estos agitadores es bastante baja llegando a un máximo de 60 RPM y opera un tiempo de 10 minutos dependiendo del tipo de biomasa y de las condiciones operativas a las que funcione el biodigestor, lo cual implica que se conectan de 6 a 12 veces por día (Salamanca, 2009).

Generalmente, se calcula de 1 a 3 kW de potencia por cada 100 m³ de biodigestor (Moncayo Romero, 2014). Se usó para este caso una potencia media de 2 kW por cada 100 m³ de biodigestor. O sea, para el cálculo de la potencia del motor de los agitadores es necesario establecer una regla de tres a partir de la ecuación siguiente:

$$P_m = \frac{V_{DB} * p_{med}}{v} \quad (11)$$

Donde:

V_{DB} (Volumen de diseño del biodigestor, m³) = 1 717,2

p_{med} (potencia media, kW) = 2

v (volumen estimado a la potencia media, m³) = 100

P_m (Potencia del motor, kW)

2.7.4 Antorcha o quemador de biogás.

La antorcha o quemador de gases se utiliza para eliminar los gases en exceso del sistema de digestión. Va provisto de una llama piloto de quemado continuo, para que cualquier exceso de gas que pase por el regulador se queme (Varnero Moreno, 2011).

Es necesario que siempre se instale una antorcha (**Figura 2.9**) para quemar el biogás en exceso de acuerdo a las decisiones que tome de la unidad empresarial. Este quemador es de máxima prioridad para la empresa para así evitar combustiones, daños materiales o pérdidas humanas en caso de no efectuarse la liberación del gas mediante la quema. Es de suma importancia que se instale un quemador ya que pueden existir fallos técnicos, deterioro de los equipos de almacenamiento, condiciones climáticas desfavorables, mantenimiento o reparación de los equipos de almacenamiento de biogás, etc.



Figura 2.9. Antorcha o quemador de biogás. **Fuente.** (Paiva Periche, 2016).

La antorcha se dimensionó para abarcar el caudal máximo diario de biogás en m³/h, sabiendo que se genera 357,75 m³ de biogás al día. El volumen de la antorcha se podrá calcular a través de la siguiente ecuación:

$$Cea = Bgp * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} \quad (12)$$

Donde:

Bgp (Biogás producido, m³ biogás/día) = 357,75

Cea (Caudal de biogás entrante a la antorcha, m³ biogás/h)

2.7.5 Medidor de caudal de biogás.

Es importante, conocer la producción de biogás del biodigestor. La producción de biogás, debe ser estable y constante una vez que el biodigestor se ha puesto en marcha y ha entrado en su etapa normal de operación. Si la alimentación del biodigestor se mantiene en el mismo régimen de cantidad y calidad y, las condiciones climáticas se mantienen en forma regular con pequeñas variaciones de temperatura, la producción de biogás no debe variar. Cualquier disminución drástica de la producción de biogás en porcentajes mayores al 10 %, son una señal que el proceso de biodigestión esta alterado. La ubicación conceptual del medidor del caudal se refleja en la (**Figura 2.10**).



Figura 2.10. Ubicación del medidor de caudal de biogás. Fuente. (Moreno, 2019).

2.8 Estado de la instalación del biodigestor tropicalizado.

El biodigestor tropicalizado de tipo laguna y lecho tapado es como tal un biodigestor de mezcla completa (agitado) adaptado a las características climatológicas y de espacio que rigen en los países Latino Americanos y del Caribe. Dependiendo del clima se pueden construir también con sistemas de calefacción aprovechando parte del biogás producido. Son instalaciones de bajo costo, eficientes, con alta producción de biogás y fáciles de operar. Se construyen mayormente con materiales existentes en cada país.

El dimensionamiento de los biodigestores tropicalizados se realiza en base a normas técnicas y de seguridad industrial vigentes en el país de procedencia del que sea adquirida la tecnología, en este caso Alemania.

Los biodigestores tropicalizados se pueden construir tipo laguna (covered lagoon digester) o sobre tierra en base a tanques de acero vidriado. Los biodigestores tienen una cubierta de membrana de caucho de 2 mm de espesor, sistema mecánico de agitación, extracción de lodos, control de procesos aprovechamiento de biogás, laguna de descarga y lechos de secado de lodos para la producción de fertilizante orgánico.

2.8.1 Diagrama de flujo de la planta.

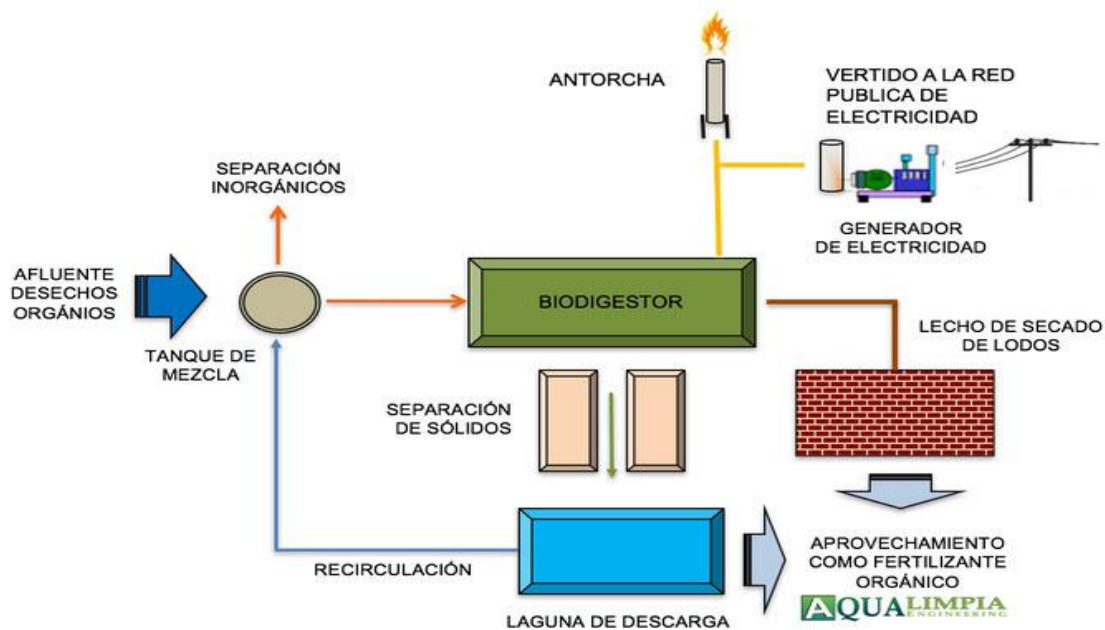


Figura 2.11. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento de residuales con biodigestor. **Fuente.** (Aqualimpia.com, 2021).

2.8.2 Descripción de la instalación.

La planta de tratamiento de efluentes quedaría conformada por las siguientes estructuras:

- Tanque de alimentación: mezcla de la alimentación (residuo de estiércol porcino) que recibirá el digestor.
- Sistema de alimentación por gravedad: la carga orgánica mezclada al digestor.
- Digestor: el tanque fermentador será construido mediante una cava, lo que comúnmente se denomina digestor bajo tierra. Este tanque rectangular recibirá la descarga del tanque de alimentación. Un volumen mayor al de alimentación permitirá tener mayor flexibilidad, dado que se utilizará el sustrato como biofertilizante en el propio establecimiento.
- Lecho de secado de lodos: los lodos y parte del biofertilizante enviados a este sector son secado por acción del viento y el sol.
- Tuberías de captación y conducción de biogás: se instalarán puntos de captación de biogás ubicados en lados opuestos en la pared del sello hidráulico. Se deberán instalar válvulas antideflagrantes de sobrepresión y vacío, además de la trampa de condensados en cada cambio de pendiente.
- Sistema de cogeneración para energía eléctrica: la generación de energía eléctrica se realizará mediante una microturbina con recuperador de calor.
- Antorcha de biogás.

- Lagunas de estabilización para plan de contingencia.

2.9 Evaluación Económica de la propuesta tecnológica.

2.9.1 Evaluación económica de la solución propuesta.

En esta etapa se realiza una valoración económica de la propuesta realizada para el módulo de 5 300 cerdos en ceba.

2.9.2 Ingreso por venta biofertilizante sólido.

El menor precio ofertado en la red internacional por suministradores de abono NPK oscila entre 200.00 y 450.00 \$USD/t (Alibaba.com, 2021). Para la realización del presente estudio económico y dado que no existe un precio oficial vigente en Cuba para el biol, se llegó al conceso, en consulta con productores y agricultores en la zona agrícola de la empresa porcina, que un valor de 250.00 \$CUP/t, equivalente a 10.00 \$USD/t, resulta adecuado y debe estimular la producción y venta del digestato (Negrín Ransoli et al., 2021).

Para el cálculo de los biofertilizantes a partir de los lechos de secado es necesario tener en cuenta la cantidad de excreta que se produce diariamente (Md) en la UEB Integral N°I y el porcentaje de composición de la materia seca (MS) sin humedad de las excretas producidas por 5 300 cebas de la UEB Integral N°1. Según Dido et al. (2013) el porcentaje de masa seca es de 8 %, para este caso se tomó como valor estimado para la masa seca (MS) un valor del 10 %, conociendo que como la tasa de dilución es del 10 %, lo cual para este residuo no es necesario agregar agua, se crean las condiciones ideales para obtener biofertilizantes en los lechos de secado.

Resaltando que:

Md (Cantidad de estiércol porcino que se produce, kg/día) = 11 925, y

MS (por ciento estimado de masa seca en estiércol porcino, %) = 10

Entonces se puede calcular la cantidad de biofertilizante sólido (Bs) en materia seca.

A continuación, se muestra la ecuación que permite el cálculo de biofertilizantes sólido en base seca:

$$Bs = Md * MS \quad (13)$$

Y conociendo la cantidad de biofertilizante en base seca que se produce se estima el costo por venta de biofertilizante a través de la siguiente ecuación:

$$Ivb = Bs * 350 \frac{\text{día}}{\text{año}} * \$CUP/t \quad (14)$$

Planteando que:

Ivb (Ingresos por venta de biofertilizantes, \$CUP/año).

Bs (Cantidad de biofertilizante sólido en base seca, t/día).

\$CUP/t (Precio según mercado cubano e internacional de la venta de biofertilizante por tonelada, \$CUP/t).

Y que en el año se estima como período de trabajo unos 350 días/año en que se obtienen biofertilizantes.

2.9.3 Ingresos por producción de electricidad.

Este biodigestor se construyó para cubrir la necesidad de tratar las aguas residuales de los 5 300 cerdos de ceba que se encuentran en proyecto, aplicando tecnologías que permitan aprovechar el biogás producido por la biodegradación de la materia orgánica. El biogás se utilizará como combustible para la generación de energía eléctrica, satisfaciendo la demanda del nuevo módulo de ceba y la del sistema de biodigestión. La energía restante será vendida a la Unión Eléctrica.

La Unión Eléctrica tiene como obligación comprar toda la energía eléctrica generada a partir de fuentes renovables de energía producida por los productores independientes siempre que cumpla las normas técnicas establecidas (Banco Nacional de Cuba, 2019).

Según la bibliografía se presentan diferentes rangos de valores para la producción de energía que se puede generar por cada m³ de biogás, según Moreno (2019) se puede generar hasta 2,2 kWh, según Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2019) la equivalencia de 1 m³ de biogás se encuentra en el intervalo de 1,72-2,2 kWh mientras que Ponce (2016) plantea que puede llegar hasta 2,4 kWh. Para el cálculo de la producción de energía se utilizará un valor promedio, 2 kWh/m³ de biogás producido.

Por lo tanto, se puede calcular la energía generada mediante la fórmula siguiente:

$$Eg = Bgp * Ice \quad (15)$$

Donde:

Bgp (Biogás producido, m³ de biogás/ día) = 375,75

Ice (Índice de consumo de electricidad como valor promedio estimado, kWh/m³ de biogás) = 2

Eg (Energía generada, kWh/día)

Para el cálculo de los ingresos por producción de electricidad es necesario conocer la cantidad de energía que genera el biodigestor. A su vez este cálculo se estima para un período de un año en que se verán las ganancias, asumiendo que en el año se trabajan solo

350 días y que el precio de venta de 1 kWh a la Unión Eléctrica es de \$0,24 según CEEMA (2020) entonces se calculan los ingresos de la siguiente manera:

$$Ive = Eg * 350 \frac{\text{día}}{\text{año}} * \$CUP/kWh \quad (16)$$

Donde:

Eg (Energía generada, kWh/día).

\$CUP/kWh = 0,24

Ive (Ingresos por venta de electricidad, \$CUP/año).

2.9.4 Metodología para la evaluación económica de la solución propuesta.

Existen muchos métodos para la evaluación de proyectos, aunque los más difundidos en la actualidad, y los más confiables, son aquellos que toman en consideración la variación del valor del dinero en el tiempo al analizar los beneficios y costos esperados durante la vida útil del equipamiento. Se tomó como metodología para la evaluación económica la planteada en (Borroto & Monteagudo, 2006).

2.9.4.1 Evaluación del valor del dinero a través del tiempo.

El valor del dinero en el tiempo significa que un determinado capital que se tiene en la actualidad va incrementando su valor en el futuro a determinada tasa de interés fijada. Dicho de otra forma, una cantidad de dinero en la actualidad tiene más valor que otra a recibir en el futuro, debido a que la primera ganará cierto interés o rendimiento al ser invertida. Estos elementos se reflejan en la siguiente expresión:

$$F = P * (1 + r)^i \quad (17)$$

Donde:

F - Valor futuro de una cantidad presente (P) de dinero, (\$).

r - Tasa de interés fijada, fracción.

i - Año para el cual se desea determinar el valor futuro de la cantidad presente.

2.9.4.2 Interés nominal anual, interés efectivo del período e interés equivalente anual.

En el análisis financiero de proyectos de inversión de larga vida útil los flujos de efectivo se manejan anualmente, por lo que, para realizar un análisis financiero adecuado, es necesario transformar las tasas nominales expresadas considerando 365 días (interés nominal anual), en tasas efectivas del período en caso de que se requiera, o en tasas anuales equivalentes

2.9.4.3 Interés real (en moneda constante).

Es el interés que tiene en cuenta los efectos de la inflación. La inflación o devaluación del dinero, reflejada por un aumento de los precios en el mercado, puede incluirse en los análisis de inversiones calculando una tasa de interés real (tasa en moneda constante) mediante la relación de Fisher:

$$R = \left(\frac{1 + r}{1 + f} \right) - 1 \quad (18)$$

Donde:

R - Tasa de interés real.

r - Tasa de interés bancaria.

f - Tasa de inflación, fracción.

Se pueden tener tres casos:

- $r > f$ - La tasa de interés real (R) es positiva pero menor que la tasa de interés sin tener en cuenta la inflación (r), esto origina una influencia negativa sobre el valor futuro del dinero, aunque existe una ganancia neta.
- $r < f$ - La tasa de interés real (R) es negativa, lo cual quiere decir que existe pérdida.
- $r = f$ - La tasa de interés compuesta es cero. No existe ni pérdida ni ganancia.

2.9.5 Métodos para la evaluación financiera de proyectos de inversión:

Existen diversas técnicas de valor descontado, aunque todas ellas, como ya se mencionó, se basan en el descuento a valor presente de las cantidades futuras o flujos de caja. Los flujos de caja son la diferencia neta entre beneficios y costos en cada uno de los años, refleja el dinero real en caja. Para su determinación se toma como convenio que las entradas a caja (ingresos) son positivas, y las salidas (gastos) son negativas, lo cual quiere decir que los signos de los flujos de caja resultan del balance anual entre costos y beneficios.

2.9.5.1 Valor Presente Neto (VPN o VAN).

Esta técnica se basa en calcular el valor presente neto de los flujos de caja proyectados para todos los años durante el período de evaluación del proyecto. Es una medida de las ganancias que puede reportar el proyecto, siendo positivo si el saldo entre beneficios y gastos es favorable, y negativo en caso contrario. Se determina como:

$$VPN = -K_0 + \sum_{i=1}^n \frac{Fc_i}{(1 + D)^i} \quad (19)$$

Donde:

K_0 - Inversión o capital inicial.

FC_i - Flujo de caja en el año i .

D - Tasa de descuento real utilizada.

De forma general, el flujo de caja se puede calcular como:

$$FC_i = (I_i - G_i - Dep) * \left(1 - \frac{T}{100}\right) + Dep \quad (20)$$

Donde:

I - Ingresos en el año i , (\$).

G - Gastos en el año i , (\$).

T - Tasa de impuestos sobre ganancia, (%).

Dep - Depreciación del equipamiento o amortización de la inversión, (\$).

Existen varios métodos para determinar la depreciación, aunque la más común es considerarla lineal:

$$Dep = \frac{K_0}{n} \quad (21)$$

n - Número de años.

2.9.5.2 Tasa Interna de Retorno (TIR).

Se define como aquella tasa de descuento que reduce a cero el Valor Presente Neto. En términos económicos, la TIR representa el porcentaje o tasa de interés que se gana sobre el saldo no recuperado de una inversión, de forma tal que, al finalizar el período de evaluación o vida útil, el saldo no recuperado sea igual a cero. El saldo no recuperado de la inversión en cualquier punto del tiempo de la vida del proyecto es la fracción de la inversión original que aún permanece sin recuperar en ese momento.

Analíticamente la TIR se determina como:

$$0 = -K_0 + \sum_{i=1}^n \frac{FC_i}{(1 + TIR)^i} \quad (22)$$

Como se puede observar, esta ecuación no se puede resolver directamente, sino que se requiere de un análisis iterativo para obtener el valor de la TIR.

2.9.5.3 Período de Recuperación de la Inversión (PRI).

Es el tiempo en que se recupera la inversión inicial para una tasa de descuento D considerada. Se calcula como el momento para el cual el VPN se hace cero.

$$0 = -K_0 + \sum_{i=1}^{PRI} \frac{FC_i}{(1 + D)^i} \quad (23)$$

Esta ecuación no puede resolverse directamente, por lo que para obtener el valor del PRI se le van adicionando gradualmente a la inversión inicial los flujos de caja anuales hasta que el resultado sea cero, en ese momento se ha recuperado la inversión.

Tradicionalmente el período de recuperación se calcula como la inversión inicial entre los ingresos esperados por año, sin tener en cuenta el valor del dinero en el tiempo, o costo del uso del capital inicial, por lo que por esta vía el valor que se obtiene es inferior al real, y generalmente se denomina como Período Simple de Recuperación de la Inversión.

CAPÍTULO III

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se aplicó la metodología expuesta en el capítulo anterior para el dimensionamiento de la propuesta tecnológica a la Unidad Integral N°1 de la Empresa Porcino Cienfuegos.

3.1 Especificaciones del tanque de alimentación.

Anteriormente se realizó la estimación de producción de excretas para 5 300 cerdos de tipo cebras dando un valor de 11 925 kg/día en cuanto a la cantidad de animales de tipo cebra por en valor estimado de producción de excretas por día. Se tomó además como valor para la tasa de disolución (N) un valor de 3.

Sabiendo que:

$$N = 3,$$

$$Md = 11\,925 \text{ kg/día, y}$$

$$Sd = ?$$

Entonces se sustituye el valor de N y Md en (1) para hallar el valor de Sd, donde se obtiene:

$$Sd = (1 + N) * Md \quad (1)$$

$$Sd = (1 + 3) * 11\,925 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

Como la $\rho_{mezcla} \approx \rho_{Agua} \approx 1 \text{ kg/l}$, por tanto:

$$Sd = 47\,700 \frac{\text{L}}{\text{día}} = 47,7 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

3.2 Cálculo del caudal de diseño.

Conociendo que:

$$Fc = 1,3$$

$$Sd = 47,7 \text{ m}^3/\text{día, y}$$

$$Cd = ?$$

Se sustituyen estos valores en (2) obteniéndose un valor para el caudal de diseño de:

$$Cd = Sd * Fc \quad (2)$$

$$Cd = 47,7 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * 1,3$$

Por tanto:

$$Cd = 62,01 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

3.3 Cálculo del volumen útil.

Conociendo que:

Cd (Caudal de diseño) = 62,01 m³/día,

Tl (Tiempo de limpieza) = 6 h/día, y

Vu (Volumen útil, m³) =?

Se calcula (Vu) sustituyendo (Cd) y (Tl) en (3) y como se dimensionará el tanque de alimentación para que almacena el flujo de una hora se multiplica por 1h.

$$V_u = \frac{Cd}{Tl} \quad (3)$$
$$V_u = \frac{62,01 \text{ m}^3/\text{día}}{6 \text{ h/ día}} * 1\text{h}$$

Por tanto:

$$V_u = 10,33 \text{ m}^3$$

El volumen útil (Vu) del tanque de alimentación será de 10,33 m³.

3.4 Cálculo del volumen total del tanque de mezclado.

Como el volumen total del tanque de alimentación se calcula por la fórmula del volumen del cubo rectangular:

$$Vt = l * a * h \quad (4)$$

Y se conoce que:

l (largo) = 2,5 m,

a (ancho) = 2,5 m,

h (altura) = 2 m, y

Vt (Volumen total del tanque de alimentación, m³) =?

Entonces se procede al cálculo:

$$Vt = 2,5 \text{ m} * 2,5 \text{ m} * 2 \text{ m}$$

Por tanto:

$$Vt = 12,5 \text{ m}^3$$

En la (**Tabla 3.1**) se muestran los requerimientos usados en cuanto a las dimensiones para el cálculo del tanque de alimentación.

Tabla 3.1. Dimensiones del tanque de alimentación.

Requerimientos	Dimensiones
Volumen total (Vt)	12,5 m ³
Volumen útil (Vu)	10,33 m ³

<i>Altura (h)</i>	2 m
<i>Borde libre</i>	0,30 m
<i>Largo (l)</i>	2,5 m
<i>Ancho (a)</i>	2,5 m

Fuente. Elaboración propia.

3.5 Construcción de la laguna para el biodigestor.

Para hallar el volumen de diseño del biodigestor se utiliza la ecuación 5 donde

V_{UB} (Volumen útil del biodigestor, m^3)

F_c (Factor de corrección) = 1,2,

V_{DB} (Volumen de diseño del biodigestor, m^3) =?

$$V_{DB} = V_{UB} * F_c \quad (5)$$

Para calcular el volumen útil se utiliza la ecuación 6

$$V_{UB} = S_d * TRH \quad (6)$$

Donde:

S_d (Cantidad de mezcla (estiércol + agua) de entrada por día) = 47,7 m^3 /día,

TRH (Tiempo de retención hidráulica) = 30 días

V_{UB} (Volumen útil del biodigestor, m^3) =?

Sustituyendo los valores en la ecuación (6), queda que:

$$V_{UB} = 47,7 \frac{m^3}{día} * 30 \text{ días}$$

Por tanto:

$$V_{UB} = 1\,431 \text{ } m^3$$

Luego, una vez conocido el volumen útil del biodigestor (V_{UB}) se sustituyó en la ecuación (5) para determinar el volumen de diseño del biodigestor.

$$V_{DB} = 1\,431 \text{ } m^3 * 1,2 = 1\,717,2 \text{ } m^3$$

3.5.1 Cálculo de las dimensiones del biodigestor.

El dimensionamiento geométrico del sistema se calculó a partir del volumen de diseño del biodigestor, utilizando la ecuación con la que se estima un cuerpo geométrico de forma trapezoidal, cuadrangular o rectangular (pirámide invertida truncada), la cual se muestra a continuación y permite hallar el valor de (x).

$$V_{DB} = \frac{h_1}{3} * (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 * A_2}) \quad (7)$$

Donde:

A_1 (Área base inferior o del piso, m^2),

A_2 (Área base superior o de la corona, m^2),

$h_1 = 4$ m,

$V_{DB} = 1\,717,2$ m^3 , y

$x = ?$

Este cálculo es efectuado sustituyendo las ecuaciones de las áreas superior e inferior del cuerpo del biodigestor, o sea la sustitución de (8) y (9) en (5).

$$V_{DB} = \frac{h_1}{3} * (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 * A_2}) \quad (7)$$

$$1\,717,2 \text{ m}^3 = \frac{4}{3} * (3x^2 + 3x^2 + 32x + 64 + \sqrt{3x^2 * (3x^2 + 32x + 64)})$$

$$1\,287,9 = (6x^2 + 32x + 64 + \sqrt{9x^4 + 96x^3 + 192x^2})$$

Por tanto:

$$x = 9,32 \text{ m}$$

3.5.1.1 Cálculo de las áreas del biodigestor.

Se sustituye el valor de x calculado en la ecuación (7) y se obtiene el cálculo de las áreas correspondientes de la laguna del biodigestor.

Área base inferior o del piso (A_1).

Donde:

$$l_1 = 3x,$$

$$a_1 = x,$$

$$x = 9,32 \text{ m, y}$$

$$A_1 = ?$$

$$A_1 = l_1 * a_1 \quad (8)$$

$$A_1 = 3x * x = 3x^2 \quad (8)$$

$$A_1 = 3(9,32 \text{ m})^2$$

Por tanto:

$$A_1 = 260,58 \text{ m}^2$$

Área base superior o de la corona (A_2).

Donde:

$$l_2 = (8 + 3x),$$

$$a_2 = (8 + x),$$

$$x = 9,32 \text{ m, y}$$

$$A_2 = ?$$

$$A_2 = l_2 * a_2 = (8 + 3x)(8 + x) \quad (9)$$

$$A_2 = 3x^2 + 32x + 64 \quad (9)$$

$$A_2 = A_1 + 32(9,32 \text{ m}) + 64$$

$$A_2 = 260,58 \text{ m}^2 + 32(9,32 \text{ m}) + 64$$

Por tanto:

$$A_2 = 622,82 \text{ m}^2$$

En la (Tabla 3.2) quedan representados las dimensiones del biodigestor tropicalizado tipo laguna.

Tabla 3.2. Dimensiones del biodigestor.

Partes del biodigestor	Medidas	
	Volumen	1 717,2 m ³
	Altura	4 m
Piso de la laguna del biodigestor	Largo	27,96 m
	Ancho	9,32 m
Corona del biodigestor	Largo	43,32 m
	Ancho	17,32 m

Fuente. Elaboración propia.

3.6 Cálculo de los indicadores de producción de biogás del sistema de biodigestión.

Conociendo que:

$$Id = 0,03 \text{ m}^3 \text{ de biogás/kg excreta;}$$

$$Md = 11\,925 \text{ kg excreta/día; y}$$

$$Bgp = ?$$

Entonces se procede al cálculo a través de la fórmula (10):

$$Bgp = Md * Id \quad (10)$$

$$Bgp = 11\,925 \frac{\text{kg excreta}}{\text{día}} * 0,03 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{kg excreta}}$$

Por tanto:

$$Bgp = 357,75 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{día}}$$

3.7 Cálculo de la potencia del motor de los agitadores en los sistemas de agitación.

Mediante una regla de tres, se calculó la potencia del motor de los agitadores para poder remover todo el agua residual o purín de cerdo en el biodigestor propuesto de 1 717,2 m³. Aplicando la ecuación (11):

$$P_m = \frac{V_{DB} * p_{med}}{v} \quad (11)$$

Se sustituyen los valores siguientes y se efectúa el cálculo para hallar la potencia del motor:

V_{DB} (Volumen de diseño del biodigestor, m³) = 1 717,2

p_{med} (potencia media, kW) = 2

v (volumen estimado a la potencia media, m³) = 100

$$P_m = \frac{(1\,717,2\, \text{m}^3 * 2\, \text{kW})}{100\, \text{m}^3} = 34,34\, \text{kW}$$

Dando como resultado:

$$P_m = 34,34\, \text{kW}$$

Entonces se necesita 34,34 kW para poder remover los 1 717,2 m³ de agua residual en el biodigestor, aunque según Paiva Periche (2016) sugiere que se deben instalar por lo menos 2 agitadores en biodigestores mayores o iguales a 1 000 m³, por tanto se colocarán dos agitadores con una potencia de 40 kW o 4 agitadores de 20 kW . Se recomienda utilizar 4 agitadores de 20 kW porque permite un mejor desplazamiento del digerido de la región de entrada hasta la salida del biodigestor; y además presentan menores exigencias en la etapa de explotación que las necesitadas por dos motores de 40 kW.

3.8 Cálculo del volumen de la antorcha o quemador de biogás.

Aplicando la ecuación (12):

$$C_{ea} = B_{gp} * \frac{1\, \text{día}}{24\, \text{horas}} \quad (12)$$

Y conociendo que:

B_{gp} (Biogás producido, m³ biogás/día) = 357,75

C_{ea} (Caudal de biogás entrante a la antorcha, m³ biogás/h) =?, y

El trabajo que efectuó la antorcha fue de 1 día (24 horas), entonces se calcula el volumen sustituyendo en (12):

$$C_{ea} = 357,75 \frac{\text{m}^3 \text{biogás}}{\text{día}} * \frac{1\, \text{día}}{24\, \text{horas}}$$

Por tanto, el volumen de la antorcha sería de:

$$Cea = 14,9 \frac{\text{m}^3 \text{biogás}}{\text{hora}}$$

3.9 Evaluación económica de la propuesta tecnológica.

3.9.1 Ingreso por venta biofertilizante sólido.

A partir de la ecuación (13) se calcula la cantidad de biofertilizante en base seca generado por un módulo de 5 300 cebas.

$$Bs = Md * MS \quad (13)$$

Y conociendo que:

Md (Cantidad de estiércol porcino que se produce, kg/día) = 11 925,

MS (por ciento estimado de masa seca en estiércol porcino, %) = 10

Bs (Cantidad de biofertilizante sólido, t/día) =?

Se efectúa el cálculo:

$$Bs = 11\,925 \frac{\text{kg}}{\text{día}} * 0,1 = 1\,192 \text{ kg/día}$$

Por tanto:

$$Bs = \frac{1\,192 \text{ kg/día}}{1\,000} = 1,19 \text{ t/día}$$

Para efectuar la venta según el costo de la tonelada de biofertilizante estimado en el mercado cubano según Antúnez & Sáez (2015) que estiman un precio de 70.00 \$CUP/t y en el mercado internacional conociendo anteriormente para un valor de 250.00 \$CUP/t; es necesario establecer la cantidad de días que se mantienen secando la materia orgánica en los lechos de secado para poder entonces efectuar la venta en \$CUP/año de biofertilizantes.

Haciendo una estimación de los días del año se sacó como promedio de secado unos 350 días en los que se mantienen funcionando los lechos de secado.

Por tanto, a través la ecuación (14) se calcula el ingreso por venta de biofertilizante:

$$Ivb = Bs * 350 \frac{\text{día}}{\text{año}} * \$CUP/t \quad (14)$$

Conociendo que:

Bs (Cantidad de biofertilizante sólido en base seca, t/día) = 1,19;

\$CUP/t (Precio de la tonelada de biofertilizante, \$CUP/t); y

Ivb (Ingresos por venta de biofertilizante, \$CUP/año) =?

Para este caso se calculará según el costo en \$CUP/t del valor del mercado cubano y del internacional con el mismo período de tiempo de secado, donde se estableció una comparación entre los ingresos generados al año.

Caso Cuba:

Precio por venta de biofertilizante = 70.00 \$/t

$$I_{vb} = B_s * 350 \frac{\text{día}}{\text{año}} * \$CUP/t \quad (14)$$

$$I_{vb} = 1,19 \frac{t}{\text{día}} * 350 \frac{\text{día}}{\text{año}} * 70.00 \$CUP/t$$

Por tanto:

$$I_{vb} = 29\,204.00 \$CUP/año$$

Caso Internacional:

Precio por venta de biofertilizante = 250,00 \$/t

$$I_{vb} = B_s * 350 \frac{\text{día}}{\text{año}} * \$CUP/t \quad (14)$$

$$I_{vb} = 1,19 \frac{t}{\text{día}} * 350 \frac{\text{día}}{\text{año}} * 250.00 \$CUP/t$$

Por tanto:

$$I_{vb} = 104\,125.00 \$CUP/año$$

Por lo que optamos por el valor de costo de la tonelada de biofertilizante del mercado internacional ya que genera mayores ingresos al año.

3.9.2 Cálculo de los ingresos por producción de electricidad.

La cantidad de energía generada en kWh/día según la cantidad de biogás producido por el biodigestor tropicalizado de tipo laguna y de lecho tapado se puede calcular mediante la ecuación (15), a continuación, se efectúa el cálculo de dicha fórmula:

$$E_g = B_{gp} * I_{ce} \quad (15)$$

Conociendo que cada 1 m³ biogás se le estima un valor promedio de energía generada de 2 kWh y sabiendo la cantidad de biogás que genera el biodigestor entonces se calcula la cantidad de energía que genera dicho biodigestor.

$$E_g = 357,75 \frac{\text{m}^3 \text{biogás}}{\text{día}} * 2 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{biogás}}$$

Por tanto:

$$Eg = 715,5 \frac{\text{kWh}}{\text{dia}}$$

Para el caso de los ingresos por producción de energía eléctrica se puede calcular mediante la ecuación (16).

$$Ive = Eg * 350 \frac{\text{día}}{\text{año}} * \$CUP/kWh \quad (16)$$

Donde:

Eg (Energía generada, kWh/día) = 715,5

\$CUP/kWh (precio de 1 kWh por la Unión Eléctrica, \$CUP/kWh) = 0,24

$$Ive = 715,5 \frac{\text{kWh}}{\text{dia}} * 350 \frac{\text{día}}{\text{año}} * 0,24 \$CUP/kWh$$

Por tanto:

$$Ive = 60\,102.00 \$CUP/año$$

A la Integral N°1 de la Empresa Porcina de Cienfuegos se le asigna 10 000 kWh/mes, el valor de consumo por cerdo es aproximadamente 2 kWh/año. Utilizando este criterio para estimar el gasto de electricidad del nuevo módulo de ceba de 5 300 animales, se obtiene un valor de 250 425 kWh/año por lo que serían 20 868,75 kWh/mes.

La demanda de energía del sistema de biodigestión según los períodos de utilización de los equipos auxiliares y sus consumos puede ser suplida por aproximadamente un 20 % de los 20 868,75 kWh/mes producidos por el biodigestor, por lo que 4 173,75 kWh/mes serán utilizados con este fin.

De los 20 868,75 kWh/mes restante se emplearán 16 695 kWh/mes para satisfacer las necesidades eléctricas del nuevo módulo de ceba, y los otros 6 695 serán vendidos a la Unión Eléctrica.

La energía utilizada para satisfacer las necesidades de la planta y del módulo de ceba se considera como ingresos por ser un costo evitado (Stolik, 2019), el cual es la compra de esta a la Unión Eléctrica, se tomará el valor del precio de venta de un 1 kWh a la Unión Eléctrica como el mismo para los ingresos generados por 1 kWh dejado de comprar.

El precio de venta de 1 kWh a la Unión Eléctrica es de \$0,24 (CEEMA, 2020) por lo que se obtiene un ingreso diario de \$171.72; empleando un período de producción de electricidad de 350 días al año se obtienen ingresos de 60 102.00 \$CUP/año.

3.9.2.1 Selección del Grupo Electrónico.

Para la utilización del grupo electrógeno se procedió a trabajar con una firma china vinculada al comercio cubano.

El nivel de potencia medio que debe tener es aproximadamente de 30 kW obtenida de la generación eléctrica a partir del biogás generado entre las horas del día. Se seleccionará un motor de 40 kW de potencia nominal para considerar la posibilidad de una sobre producción de biogás.

El motor generador seleccionado (**Figura 3.1**) es del tipo generador eléctrico de gas natural (biogás), de Jiangsu (China) como país de origen y de la marca Haut. El equipo seleccionado tiene un precio de 8 570.00 \$USD.



Figura 3.1. Motor generador de biogás Haut. **Fuente.** www.Alibaba.com

Los datos de chapa del grupo electrógeno se muestran en la (**Tabla 3.3**).

Tabla 3.3. Datos de chapa del motor generador de biogás Haut.

Grupo Electrógeno	
Tipo	Generador eléctrico de gas natural
Potencia nominal	40 kW
Potencia	50 kVA
Voltaje nominal	220/127 V
Frecuencia	60 Hz
Velocidad nominal	1 500/1 800 rpm
Entrada de presión	2,2-3 kPa

Marca	Haut
Poder del motor	43 kW
Marca del motor	4BTA3,9-T
Corriente clasificada	72 A
Eficiencia de poder	0,8
Sistema de gas	Biogás
Dimensiones (l*a*h)	1 800*800* 1200 mm
Valor calórico del gas natural	3,5 MJ/Nm; 3-5 % de gas natural
País de Origen	Jiangsu, China
Aprobación	ISO 9 001, ISO 14 001, CE
Certificación	ISO 9 001/CE
Peso	800 kg
Área de colocación	4 m ²
Precio	8 570.00 \$USD

Fuente. www.Alibaba.com

3.9.3 Metodología para la evaluación económica de la solución propuesta.

Evaluación del valor del dinero a través del tiempo.

Para cuantificar el cambio del valor del dinero en el tiempo, se hace necesario conocer las tasas bancarias para la evaluación de la inversión. Los valores a usar de las tasas bancarias están dados en resoluciones del Banco Nacional de Cuba (Banco Nacional de Cuba, 2019).

La tasa de interés utilizada es de un 8 %, establecida por la Dirección General de Tesorería del Banco Central de Cuba en las Circulares 5/2011 y 2/2012 como se muestra en la (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Interés bancario para préstamos (Banco Central de Cuba).

Período tiempo	Tasa de interés anual (%)	Tasa mínima (%)	Tasa máxima (%)
Hasta 36 meses	7,5	6,5	8,5
Hasta 60 meses	8	7	9

Fuente. (Banco Nacional de Cuba, 2019).

El impuesto sobre la ganancia es del 35 %, según artículo 97 de la Ley 113 publicada en la Gaceta Oficial N°. 053 Ordinaria de 21 de noviembre de 2012.

Estos valores serán utilizados en una hoja de cálculo del programa Excel que permite determinar de la ecuación (17) del capítulo 2 el valor presente del dinero (VAN). Para obtener la magnitud de este indicador es necesario conocer la tasa de interés fijada, la tasa de interés real y la tasa de inflación. Estos valores son determinados en la ecuación (18) del capítulo 2.

Valor Presente Neto.

Para determinar la magnitud del Valor Presente Neto (VAN) se hace uso de la ecuación (19) donde es necesario conocer el flujo de caja, la tasa de descuento, y la inversión inicial. Estos parámetros son determinados en las ecuaciones (20-23).

Determinación de la Inversión Inicial.

La determinación de la Inversión Inicial ($-K_0$) se estimó en función de los costos unitarios dado que no se disponen de ofertas concretas de biodigestor del tipo de laguna de lecho tapado (tropicalizado). La inversión unitaria para este tipo de biodigestor entre 5 000 y 10 000 toneladas oscila entre las tasas de costo de los biodigestores están dados entre 30 y más de 100 \$/m³. Se tomará el mayor valor para trabajar en las peores condiciones de la inversión. Se tomará el mayor valor del costo de la tonelada para buscar las condiciones más críticas del proyecto. Por consiguiente, para el caso de estudio la Inversión Inicial ($-K_0$) considerando además del precio de los biodigestores, el costo del grupo electrógeno el valor de la inversión es de \$188 570.00.

El ingreso total que debe proporcionar el uso del biodigestor está dado por la venta de biofertilizante y energía eléctrica.

El ingreso por concepto de venta de biofertilizante se determina considerando que se genera 1,19 t/día de biofertilizante sólido en forma granulada. Se considera 350 días al año efectivos de trabajo, generándose 416 t/año y se toma el costo de 250.00 \$/t (Alibaba.com, 2021) lo que genera un ingreso de 104 125.00 \$/año.

El ingreso por concepto de venta de electricidad está dado por la generación de 250 425 kWh/año que a un precio de 0,24 \$/kWh, lo que genera un ingreso por venta de electricidad de 60 102.00 \$/año.

La magnitud total del ingreso está dada por la suma de las ventas de fertilizante y energía eléctrica, ascendiendo su monto a 164 227.00 \$/año.

El valor de los gastos anuales se aprecia en el orden del 25 % de los ingresos similar a las dadas por (Linnenberg et al., 2019) dando un valor de 41 056.75 \$/año.

Los procesamientos de toda la información económica para determinar los principales indicadores de la inversión se realizan a partir de la hoja de cálculo del programa Excel (Ver **Anexo 11**).

El procesamiento de los datos contenidos en (**Anexo 11**) ofrece como resultado los valores dados en la (**Figura 3.2**).

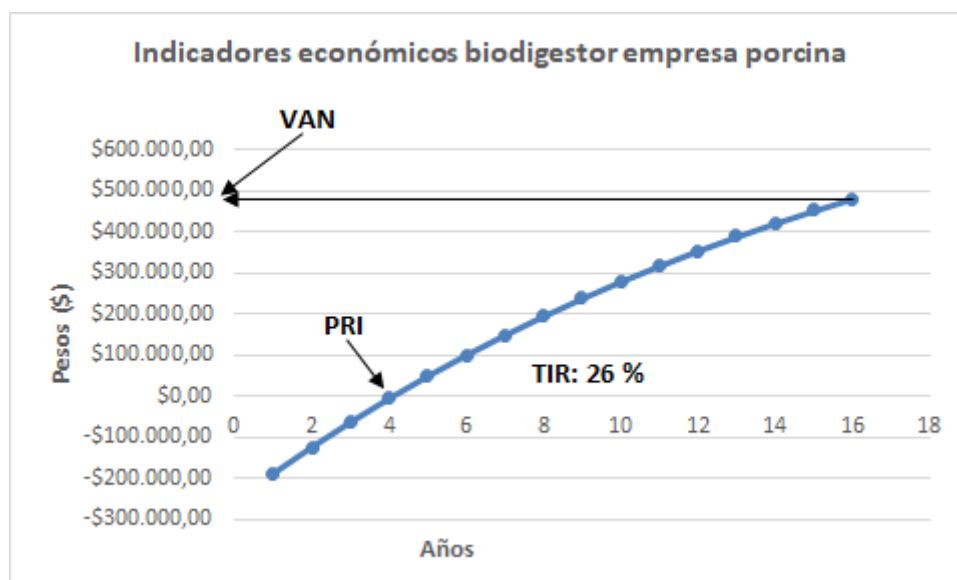


Figura 3.2. Indicadores de la evaluación económica del biodigestor de la UEB Integral N°1. **Fuente.** Elaboración propia.

En la (**Figura 3.2**) se aprecia que la inversión inicial es de \$188 570.00. La inversión tiene un período de recuperación cercano a los 4 años de una vida útil de 15 años, generando un Valor Presente Neto (VAN) de \$482 468.25 con una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 26 %.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

1. La revisión bibliográfica demostró la abundante literatura científica existente en el mundo sobre el tema analizado, destacando la factibilidad de los esquemas de biodigestión para la obtención de fertilizantes y electricidad.
2. La metodología de cálculo analizada posibilita el dimensionamiento de los equipos necesarios para la producción de biofertilizantes, electricidad en las condiciones tropicales cubanas. Su aplicación en la UEB Integral N°1 de la Empresa Porcina de Cienfuegos permitió identificar que para tratar 11 925 kg/día de excreta procedentes de la ceba de 5 300 cerdos se requiere un biodigestor tropicalizado de lecho tapado de 1 717, 2 m³ de volumen.
3. La implementación de la propuesta tecnológica permite obtener 416 t/año de biofertilizante sólido, que a los precios actuales representa un ingreso de 104 125.00 \$/año. El biogás obtenido en dicho reactor debe permitir la producción de 250 425 kWh/año con un impacto económico de 60 102.00 \$/año.
4. El motor generador seleccionado es del tipo generador eléctrico de biogás, de Jiangsu (China) como país de origen, y de la marca Haut. Opera a una potencia nominal de 40 kW, con una frecuencia de 60 Hz.
5. Considerando una vida útil de 15 años la propuesta tecnológica presenta una inversión inicial de \$188 570.00 e indicadores dinámicos de rentabilidad de un Valor Presente Neto (VAN) de \$482 468.25, una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 26 % y un Período de Recuperación de la Inversión (PRI) de cuatro años lo que la hace una inversión atractiva.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

1. Como forma de complementar el actual trabajo debe realizarse el estudio de la reducción del impacto ambiental por la construcción y puesta en funcionamiento del biodigestor propuesto.
2. Valorar las solicitudes de estas tecnologías a diferentes suministradores internacionales para evaluar los beneficios y costos de la misma para la toma de decisión de la entidad.
3. En consonancia con la COP 26 en la Cumbre del Clima del 2021 el uso de esta tecnología puede propiciar un mejoramiento de la situación del clima ante las grandes necesidades de alimento de la humanidad.

REFERENCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alibaba.com. (2021). *Precio ofertado en la red internacional por suministradores de abono NPK*.
- Álvarez, C. R., & Rimski-Korsakov, H. (2016). *Manejo de la fertilidad del suelo en planteos orgánicos*. (Universidad de Buenos Aires). Editorial Facultad de Agronomía.
- Alzate Leal, L. M. (2021). *Evaluación del dimensionamiento de los lechos de secado en diferentes plantas de tratamiento de aguas residuales del oriente antioqueño* (Tesis de grado). Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería, Escuela ambiental.
- Angelidaki, I., & Ahring, B. K. (2001). *Modelling anaerobic codigestion of manure with olive oil mill effluent*. Water science and technology. 36 p.
- Antúñez, M. Sc. E., & Sáez, M. Sc. Y. (2015). *Manual de procedimientos técnicos para la crianza porcina* (Instituto de Investigaciones Porcinas. Ministerio de la Agricultura. Grupo de Producción Porcina.). EDIPORC.
- Aqualimpia.com. (2021). *Biodigestores Industriales—Digestores*. Recuperado de: www.aqualimpia.com.
- Arévalo de Gauggel, G., & Castellano, M. (2009). *Manual Fertilizantes y Enmiendas*. Carrera de Ciencia y Producción Agropecuaria (El Zamorano).
- Banco Nacional de Cuba. (2019). *Decreto-Ley No.345 "Del desarrollo de las fuentes renovables y el uso eficiente de la energía"*. Recuperado de: www.gacetaoficial.gob.com.
- Barragán B, Téllez Y Laguna A. 2008. *Utilización de residuos agroindustriales*. Revista Sistemas Ambientales, 2(1): 44-50 pp.

- Bassan, M., Brdjanovic, D., & Dangol, B. (2014). *Faecal Sludge Management Systems Approach for Implementation and Operation* (1a ed). IWA. Recuperado de: https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/EWM/Book/FSM_Ch0_Table_of_Contents.pdf.
- Blanco Betancourt, D., Cepero Casas, L., Suárez Hernández, J., & Martín Martín, G. J. (2012). *Manual de diseño, montaje y operación de biodigestores plásticos de bajo costo. Una alternativa para Cuba*. Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey.
- Borroto, A. E., & Monteagudo, J. P. (2006). *Gestión y economía energética*. Universo Sur. Cienfuegos, Cuba.
- Carulla, D. (2016). *Valorización de amonio de aguas residuales urbanas como fertilizante líquido utilizando contactores de membrana de fibra hueca*. ETSEIB.
- Casals Pérez, E. (2015). *Estudio de factibilidad de las mezclas de residuos orgánicos para la producción de biogás*. Universidad de Cienfuegos. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química.
- CEEMA. (2020). *Potencialidades de generación fotovoltaica en cubiertas de naves de la Empresa de Tecnología de Avanzada de la Construcción, MICALUM*. Universidad de Cienfuegos. Facultad de Ingeniería.
- Collazo Rodríguez, J. E. (2015). *Estudio de mezclas de residuos industriales y purín de cerdo para la producción de biogás. Caso de estudio, UEB Glucosa de Cienfuegos*. (Tesis de Grado). Universidad de Cienfuegos. Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Química.
- Cruz Camacho, J. S. (2014). *TECNOLOGÍAS RELACIONADAS CON BIOFERTILIZANTES: Vol. Boletín tecnológico* (SUPERINTENDENCIA DE

- INDUSTRIA Y COMERCIO. Grupo Banco de Patentes, 132 p). Banco de patentes sic.
- Daniel, B. (2009). *Mini biogasplants hausehold*. Alemania.
- Dido, C., Mieres, F., & Rinaldi, G. (2013). *Evaluación técnico económica del tratamiento anaeróbico de los efluentes de un tambo de la provincia de Buenos Aires, Argentina*. Avances en Ciencias e Ingeniería, Vol.4(4), 65-74 pp.
Recuperado de: http://www.exeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/.
- Dodane, P. H., & Ronteltap, M. (2014). *Lechos de Secado sin Plantas*. Manejo de lodos fecales, Vol.1(2). Recuperado de:
http://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/EWM/FSM_Libro_low_res/manejo_fsm_cap7_120ppi.pdf.
- Elias, X. (2012). *RECICLAJE DE RESIDUOS INDUSTRIALES. Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora* (2.a Edición). Díaz de Santos, S.A. Albasanz, 28037 MADRID.
- FAO. (2002). *LOS FERTILIZANTES Y SU USO*. IFA, Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes.
- FAO. (2019). *Código Internacional de Conducta para el Uso y Manejo de Fertilizantes*.
- Flotats, X. (2001). *Digestión anaerobia de purines de cerdo y co-digestión con residuos de la industria alimentaria*. Universidad de Lleida.
- Fonseca, R., Molinet, D., Arias, F., Agüero, Y., & Torres, M. (2013). *Efecto de los hongos micorrizógenos arbusculares (cepa Glomus fasciculacum) y la materia orgánica en plántulas de tomate (Solanum lycopersicum L.)*. Revista Granma Ciencia, 17(2), 12-22 pp.
- Garro Alfaro, J. E. (2016). *El suelo y los abonos orgánicos* (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria). INTA.

- Gómez, F., Trejo, L., Velasco, J., & Lara, L. (2016). *Herramientas moleculares para estudios ambientales de actividades agroindustriales*. *Agroproductividad* 9(8), 3-9 pp.
- Guardado Chacón, J. A. (2007). *Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas*. *Cubasolar*. Recuperado de: <http://www.cubasolar.cu>.
- Gudewort, A. (2016). *El gasto de tirar el valor de los residuos. Distintos modos de reducir, reutilizar, reciclar y revalorizar residuos industriales*. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- Guzmán Flores, J. (2018). *FERTILIZANTES QUÍMICOS Y BIOFERTILIZANTES EN MÉXICO*. DIRECCIÓN DE PROPUESTAS ESTRATÉGICAS. REPORTE DE INVESTIGACIÓN, 37 p.
- He, J., Chen, Z., & Dougherty, M. (2021). *Explore the sludge stabilization process in sludge drying bed by modeling study from mesocosm experiments*. *Environmental Research*, 195 p. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110837>.
- Heinss, U., Larmie, S. A., & Strauss, M. (1998). *Solids Separation and Pond Systems for the Treatment of Faecal Sludges in the Tropics*. (EAWAG/SANDEC-Water and Sanitation in Developing Countries, Vol. 2).
- Iglesias Gómez, J. M., Ojeda García, F., Armengol López, N., Rubido González, D.; & Albelo Sánchez, L. (2016). *Memorias, Agroenergía Para El Desarrollo Agrario Sostenible, IV Convención Internacional Agrodesarrollo 2016. Innovación agropecuaria local y extensionismo sobre bases agroecológicas*. Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey, Universidad de Matanzas, Ministerio de Educación Superior. Matanzas, Cuba.
- INTAGRI. (2017). *México*, (5)10. Artículos Técnicos de INTAGRI.

International Standard Atmosphere. (2018). *Temperatura de Palmira, Cienfuegos*.

Recuperado de: <http://www.es.weatherspark.com>.

Lawrence K., W., Nazih K., S., & Yung-Tse, H. (2007). *Drying Beds*. (Biosolids

Treatment Processes, 1a ed). Humana Press. Recuperado de:

<https://doi.org/10.1007/978-1-59259-996-7>.

LBADR (2002) *Libro Blanco de la Agricultura y del Desarrollo Rural*. Ministerio de

Agricultura, Pesca y Alimentación. Recuperado de:

<http://www.libroblancoagricultura.com>.

León, & Santana. (2003). *Construcción y utilización de biodigestores en comunidades rurales en Nicaragua*.

Linnenberg, C., Malebrán, C., & Ignacio, J. (2019). *Estudio de factibilidad de un*

biodigestor anaeróbico en una planta faenadora de carne. GIZ. NAMA

Facility. Ministerio de Energía de Chile.

López Mosquera, M. E., & Sainz Osés, M. J. (2011). *Gestión de residuos orgánicos de uso agrícola*. Santiago de Compostela: Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico.

López Sánchez, M. V., Orús Pueyo, F., Betrán Aso, J., & Iguácel Soteras, F. (2011).

Fertilización con subproductos orgánicos (Hacia una gestión sostenible de los nutrientes en la agricultura) Gobierno de Aragón. Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente. Dirección General de Alimentación y Fomento Agroalimentario. Servicio de Recursos Agrícolas. 232 p.

Lorenzo, D. M. (2014). *Ejecutan acciones para la protección del medio ambiente en Cienfuegos*. En Notisur. Perlavisión.

Martínez, & Dibut, B. (2012). *Biofertilizantes bacterianos*. La Habana: Editorial Científica Técnica, 279 p.

McFarland, M. J. (2001). *Biosolids and Sludge Processing*. McGraw-Hill Education.

Recuperado de:

<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780070471788/chapter/chapter3>.

Meléndez, G., & Molina, Ing. E. M. Sc. (Eds.). (2003). *FERTILIZANTES: CARACTERÍSTICAS Y MANEJO*. 139 p.

Mesa, J. R., & García, C. (2016). *Memorias, Agroenergía Para El Desarrollo Agrario Sostenible, IV Convención Internacional Agrodesarrollo 2016: Vol. Prácticas agroecológicas para la sanidad animal y vegetal*. Universidad de Cienfuegos.

Metcalf, & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*. (Tercera). McGraw-Hill. G. Tchobanoglous.

Moncayo Romero, In. G. (2014). *Manual de dimensionamiento y diseño de biodigestores industriales para clima tropical. Biodigestores tropicalizados*. Aqua Limpia Engineering e.k.

Moncayo Romero, In. G. (2017). *Biodigestores industriales para clima tropical*. Aqua Limpia Engineering e.k. Recuperado de: www.aqualimpia.com.

Montoya Rendón, A. F. (2012). *Caracterización de Residuos Sólidos*. Tecnológico de Antioquia, Medellín (Colombia), Cuaderno ACTIVA (No. 4), 67-72 pp.

Moreno, O. (2019). *Guía de biogás y biodigestores*. Recuperado de: <http://www.aqualimpia.com>.

Moreno Pérez, R., García Martín, T., María Storch de Gracia, J., & Yáñez Conde, E. (2011). *FERTILIZACIÓN Y CORRECCIÓN EDÁFICA DE SUELOS AGRÍCOLAS CON PRODUCTOS ORGÁNICOS*. Escuela Politécnica Superior. Universidad Alfonso X el Sabio. 28691, Villanueva de la Cañada (Madrid),.

VOLUMEN IX, 34. Recuperado de:

http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECMAD11_003.pdf

Navarro Pedreño, Moral Herrero, Gómez Lucas, & Mataix Beneyto. (1995).

RESIDUOS ORGÁNICOS Y AGRICULTURA. Universidad de Alicante
(Compobell, S.L. Murcia).

Negrín Ransoli, Ing. P. J., Monteagudo Yanes, Dr. J. P., & Iturralde Carrera, Ing. L. A.

(2021). *Anteproyecto de biodigestor de bolsa para la cocina comedor de una empresa porcina*. Universidad Autónoma de Chile, Vol.1(2), 16 p.

ONUDI, S. de la O. de las N. U. (2017). *Estrategia sectorial*. DESARROLLO

INDUSTRIAL INCLUSIVO Y SOSTENIBLE, 23 p.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2019).

Guía teorico-práctica sobre el biogás y los biodigestores.

Ortega, M., Ferrer Medina, Y., & Salas Rodríguez, J. J. (2010). *Manual para la*

implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. Ministerio de

Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Recuperado de:

<https://editorial.tirant.com/es/libro/manual-para-la-implantacion-desistemas-de-depuracion-en-pequenas-poblacione-9788449110719>.

Padrón, & Wilfredo, R. (2009). *Biodigestores*.

PAE. (2006). *Perfil Ambiental de España*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural

y Marino. Recuperado de:

http://www.mma.es/portal/secciones/calidad_contaminacion/indicadores-ambientales/.

Paiva Periche, P. F. (2016). *Propuesta de aprovechamiento del biogás obtenido a partir*

del tratamiento de las aguas residuales generadas en la empresa Rico Cerdo

F&G S.A.C., para su uso como biocombustible en los sistemas de calefacción en

- las áreas de maternidad*. Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. Chiclayo, Perú.
- Parra Montoya, L. (2015). *Estudio de la factibilidad económica y evaluación del Biol para el uso en producciones agrícolas*. (Tesis de Grado). Universidad de Cienfuegos. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química.
- Peña, K., Rodríguez, J. C., & Olivera, D. (2013). *Coberturas muertas y regulación de arvenses en el cultivo del tomate (Solanum lycopersicum L.)*. Agricultura Orgánica, 19(4), 32-35 pp.
- Perdigón, L. A. (2014). *Viabilidad técnica para producción de biogás a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos – FORSU*. Universidad EAN. Bogotá, Colombia.
- Pérez, F. J., & Cerdá, O. (2011). *Biodigestor anaerobio de laboratorio*. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés.
- Pérez Iglesias, H., Rodríguez Delgado, I., & Arzola Pina, N. (2016). *Aprovechamiento Sostenible de Los Residuos de Origen Orgánico y la Zeolita en la Agricultura*. Universidad Técnica de Machala.
- Ponce, E. (2016). *Métodos sencillos en obtención de biogás rural y su conversión en electricidad*. IDESIA, 34, 75-79 pp.
- Ramírez, S. (2012). *Aprovechamiento de residuos agroindustriales, cascarilla de arroz (Oriza sativa) y residuos de papa (Solanun tuberosun) para la producción de Trichoderma spp.* (Tesis de Grado) Universidad Técnica de Ambato.
- Ramos Agüero, D., & Terry Alfonso, E. (2014). *GENERALIDADES DE LOS ABONOS ORGÁNICOS: IMPORTANCIA DEL BOCASHI COMO ALTERNATIVA NUTRICIONAL PARA SUELOS Y PLANTAS*. Cultivos Tropicales. Ministerio de

- Educación Superior. Cuba Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, 35(4), 52-59 pp.
- Reyes, D. D. O. M. e. I. I. P. (2012). *Tecnología de codigestión anaerobia: Una alternativa para Cuba*. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER).
- Ribeiro Oliveira, P. C. (2017). *Análisis y prevención de riesgos en el uso de fertilizantes en agricultura*. Facultad de Ciencias de Trabajo. (Tesis de Maestría) Universidad de La Coruña.
- Salamanca, J. A. (2009). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un Biodigestor a Escala Piloto para la generación de biogás y fertilizante orgánico*. (Tesis de grado). Universidad San Francisco de Quito.
- Salazar Sosa, E., Fortis Hernández, M., Vázquez Alarcón, A., & Vázquez Vázquez, C. (2003). *Abonos Orgánicos y Plasticultura*. Facultad de Agricultura y Zootecnia de la UJED, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (COCyTED), 233 p.
- Sánchez Navarro, D., & Lis-Gutiérrez, J. P. (2016). *Estudios Económicos Estudios Económicos Sectoriales Fertilizantes en Colombia*. Instituto Y Comercio, Superintendencia, No. 6.
- Santana Acea, L. (2014). *Principales deficiencias detectadas en la explotación del digestor y tratamiento de llos residuales de salida de la planta de biogás. Su factibilidad económico-ambiental en la empresa Genético Porcino de Cienfuegos*. (Tesis de Grado). Universidad de Cienfuegos. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química.
- Santiago Raffo, M. O. (2014). *Aplicación de la tecnología de biodigestores a un feedlot. Estudios de factibilidad en función de la cantidad de cabezas dentro del establecimiento* (Tesis de grado). Universidad de Buenos Aires.

- Sarmiento García, Y. (2014). *Optimización de la digestión anaerobia de la planta de biogás de la empresa ``Genático Porcino`` de Cienfuegos*. (Tesis de Grado). Universidad de Cienfuegos. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química.
- Siles, F. A. (2012). *Generación de energía eléctrica a partir de la producción de biogás*. Universidad de México.
- Stolik, D. (2019). *Energía fotovoltaica para Cuba*. Cubasolar. La Habana. Cuba.
- Torres, M. L., Lloréns, M. d. C. E., & Delgado, J. (2004). *Desarrollo tecnológico en la gestión integral de los residuos urbanos en Cuba*. Revista CENIC Ciencias Biológicas, Vol. 35.
- Valdés López, A., López Bastida, E. J., & Alonso Aguilera, A. (2019). *Gestión de residuos industriales y sostenibilidad. Necesidad de un enfoque de economía ecológica*. Universidad y Sociedad, 11(4), 424-435 pp. Recuperado de: <http://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus>.
- VARGAS CORREDOR, Y. A., & PÉREZ PÉREZ, L. I. (2018). *APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AMBIENTE*. Vol. 14(1), 14 p. Recuperado de: <http://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb>.
- Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile, Chile.
- Villaseñor Gándara, G. (1995). *Tratamiento y disposición de lodos producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales* (Tesis de grado) Universidad de Sonora. Recuperado de: <http://www.bidi.uson.mx/TesisIndice.aspx?tesis=4314>.
- WEF. (2018). *Drying Beds and Lagoons* (6th edition). McGraw-Hill Education. Recuperado de:

<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260031188/toc-chapter/chapter22/section/section115>.

ANEXOS

ANEXOS

Anexo 1. Importancia de los nutrientes en las plantas.

Elemento	Símbolo químico	Forma absorbida	Función en las plantas
Carbono	C	CO ₂	Componente fundamental de carbohidratos, proteínas, lípidos y 2 aminoácidos.
Hidrógeno	H	H ₂ O	Metabolismo, importante en balance iónico, agente reductor en 2 reacciones de energía a nivel celular.
Oxígeno	O	H ₂ O, O ₂	Componente de todos los compuestos orgánicos.
Nitrógeno	N	NH ₄ , NO ₃	Componente de proteínas, aminoácidos y ácidos nucleicos.
Fósforo	P	H ₂ PO ₄ , HPO ₄	Transferencia de energía y metabolismo de proteínas.
Potasio	K	K ⁺	Importante en la fotosíntesis, transporte de fotosintatos y reserva de almidones.
Calcio	Ca	Ca ⁺	División celular, mantiene la integridad de las membranas. Es importante en la formación y desarrollo uniforme del fruto.
Magnesio	Mg	Mg ⁺	Componente de la molécula de clorofila y cofactor de reacciones enzimáticas. Incrementa la producción de azúcares.
Azufre	S	SO ₄ , SO ₂	Transfiere energía a la planta.
Cobre	Cu	Cu ⁺²	Componente de varias sustancias (hormonas), que permiten el desarrollo de las plantas.
Hierro	Fe	Fe ⁺² , Fe ⁺³	Formación de proteínas. Crecimiento de la raíz y puntos aéreos y transferencia de energía.
Manganeso	Mn	Mn ⁺²	Transporte de electrones, germinación del polen y crecimiento del tubo de polen.
Zinc	Zn	Zn ⁺²	Junto con el boro cumple un papel importante en la formación de los frutos y el transporte de electrones.
Boro	B	H ₃ BO ₃	Metabolismo de carbohidratos en la síntesis de la pared celular.

Fuente. (Arévalo de Gauggel & Castellano, 2009).

Anexo 2. Algunos fertilizantes importantes.

Nombres comunes (fórmulas)		Grado o análisis en porcentaje				
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	S
Fertilizantes nitrogenados						
Sulfato amónico (NH ₄) ₂ SO ₄		21	0	0	-	23
Nitrato amónico NH ₄ NO ₃		33-34,5	0	0	-	-
Nitrato amónico-cal NH ₄ NO ₃ +CaCO ₃ (nitrato amónico-cálcico)		20,5-26	0	0	-	-
Urea CO(NH ₂) ₂		45-46	0	0	-	-
Nitrosulfato amónico NH ₄ NO ₃ · (NH ₄) ₂ SO ₄		26	0	0	-	15
Fertilizantes fosfatados						
Superfosfato simple Ca(H ₂ PO ₄) ₂ + CaSO ₄		0	16-20	0	-	12
Superfosfato triple o concentrado Ca(H ₂ PO ₄) ₂		0	46	0	-	-
Fosfato de roca molido (fosfato mineral)		0	20-40	0	-	-
Fertilizantes potásicos						
Muriato o cloruro potásico KCl		0	0	60	-	-
Sulfato potásico K ₂ SO ₄		0	0	50	-	18
Sulfato potásico - magnésico K ₂ SO ₄ · 2MgSO ₄		0	0	26-30	5-7	16-22
Fertilizantes de magnesio						
Kieserita	MgSO ₄ · 7H ₂ O	-	-	-	16	22
Kieserita calcinada	MgSO ₄ · H ₂ O	-	-	-	20	27
Fertilizantes azufrados						
Todos los fertilizantes conteniendo S como anión		-	-	-	-	según fórmula
Yeso	CaSO ₄ · 2H ₂ O	-	-	-	-	16-18
Algunos fertilizantes de importancia regional						
Nitrato sódico	NaNO ₃	16	0	0	-	-
Fosfato di-cálcico	Ca(HPO ₄)	0	35-42	0	-	-
Escoria Thomas		0	16-20	0	1-3	-

Fuente. (FAO, 2002).

Anexo 3. Composición química aproximada de algunos materiales orgánicos naturales.

	Material	N	P	K	Ca	Mg	S
ORIGEN VEGETAL	Broza de café	2,0-3,2	0,1-0,3	0,4-1,6	1,4-4,3	0,2-1,8	1,2
	Bagazo de caña	1,2	0,9	0,3	0,4	1,9	-
	Cachaza	1,3-1,9	0,7-1,4	0,2-0,4	2,0-2,6	0,2	2,7
	Vinaza	0-4-0,5	0,1	2,6-4,9	0,3-1,1	0,6-0,7	-
	Granza de arroz	0,5	0,1	1,3	0,3	0,1	-
	Fibra de coco	0,9	-	0,7	0,1	0,1	-
	Pulpa de naranja	0,84-1,0	0,1	1,0	0,5	0,1	-
	Pulpa de piña	0,8	0,1	1,2	0,4	0,2	-
	Banano de rechazo	0,7-1,0	0,1-0,6	2,4-6,5	0,1-0,5	0,2-0,5	-
	Pinzote de banano	0,9-1,5	0,1-0,3	8,2-15,5	0,4-0,6	0,2-0,3	-
	Vástago de banano	0,5-1,2	0,1-0,2	7,8-9,0	1,0-2,0	0,1-0,6	-
	Cáscaras de palmito	0,7-2,0	0,1-0,2	0,9-2,8	0,2-0,4	0,1-0,2	0,2-0,3
	Harina de cacao	4,0	0,9	2,1	0,4	0,6	-
	Gallinaza	1,0-3,0	1,4	1,4-2,5	2,6-3,6	0,6-0,8	-
	Porquinaza	1,8	1,1	1,8	1,4	1,2	-
	Estiércol vacuno	1,6	0,5	1,5	1,6	0,6	-

ORIGEN ANIMAL	Estiércol de caballo	1,2	0,3	0,7	0,1	-	-
	Estiércol de oveja	1,6	0,4	1,1	0,9	-	-
	Estiércol de cabra seco	1,5	0,7	2,5	1,4	-	-
	Harina de pescado	9,5	3,1	-	6,1	0,3	0,2
	Desechos de camarón	7,0	4,4	0,4	11,1	0,3	0,3
	Sangre seca	13,0	0,9	0,8	0,4	-	-
OTROS	Turba	2,0	-	-	0,7	0,3	0,5
	Aguas negras secas	2,0	0,9	-	1,8	-	0,5

Fuente. (Meléndez & Molina, 2003).

(*) En primer lugar, es importante notar que, para cualquier tipo de productos, difícilmente se alcanza valores superiores a 2 % para los diferentes elementos.

(**) Por otro lado, cada producto tiene sus tasas de liberación definidas con base en las fracciones internas que posea, y si las estimaciones se hacen con base en estos totales por lo general sobrestiman por mucho las posibles liberaciones de nutrientes.

Anexo 4. Clasificación de los productos considerados como abonos orgánicos de granja.

Tipo de abono	Estado	Composición	Funciones	Efectos principales
Estiércol	Sólido	Excrementos, orina y paja.	Aporte de materia orgánica y nutrientes (NO_3^- y NH_4^+)	Aumento en el contenido en humus y nitrógeno
Purín	Líquido	50 % orina, partículas sólidas de excrementos, lixiviados del estiércol sólido y agua de lluvia.	Materia seca (urea) 1-3 % Nitrógeno (ácido hipúrico) y Potasio	Aumento del contenido en N y K
Estiércol semilíquido	Pastoso	50 % orina, partículas sólidas de excrementos, lixiviados del estiércol sólido y agua de lluvia.	Aporte de materia orgánica	Aumento en el contenido en humus
Paja	Sólido	Variable	Aporte de materia orgánica y nutrientes	Aumento en el contenido en humus
Compost				
Abono Verde				

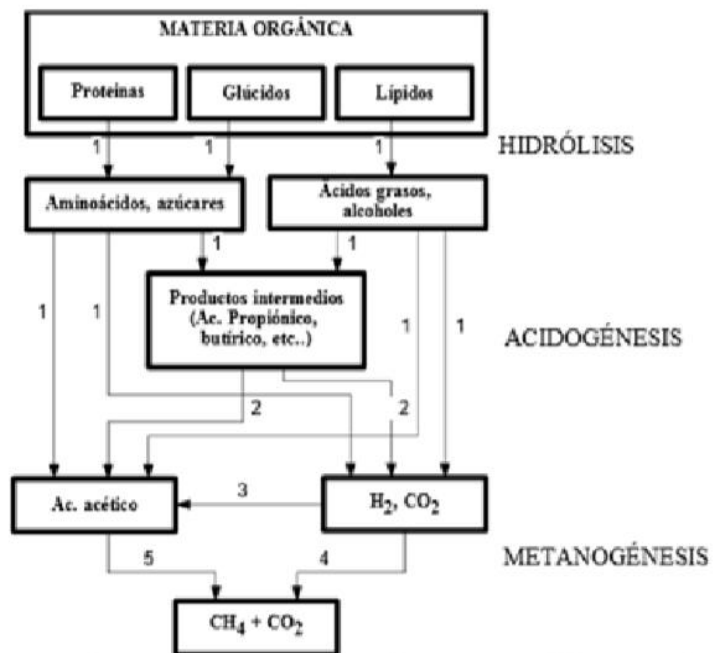
Fuente. (Moreno Pérez et al., 2011).

Anexo 5. Algunos ejemplos de abonos comerciales.

Denominación	Tipo	Materia orgánica de partida	Riqueza
ORGANICOS	Abonos orgánicos	Turba y residuos orgánicos	30-50 % de materia orgánica
	Abonos N orgánicos	Harinas de sangre, cuernos y otros	5-14 % N
	Abonos P orgánicos	Harina de huesos	13 % P
	Abonos NP orgánicos	Mezclas de harina de huesos y cuernos	4-10 % N 2-10 % P
	Abonos NPK orgánicos	Guano y residuos animales. Compost	4-6 % N 4-5 % P 2 % K
	Abonos mezclados orgánico - minerales	Basuras urbanas, lodos de decantación, residuos animales y vegetales	25-40 % Materia orgánica 1-3 % NPK
ORGANICO - MINERALES	Mezclas con turba	Turba blanca o negra	>35 % Materia orgánica 1-3 % NPK
	Abono N orgánico mineral	Lignina	15-19 % N
	Abono NP orgánico mineral		6 % N 3-4 % P
	Abono NPK orgánico mineral	Residuos animales o vegetales	4-14 % NP 3-14 % K

Fuente. (Moreno Pérez et al., 2011).

Anexo 6. Fases de la digestión anaerobia y poblaciones bacterianas.



Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones bacterianas: 1) Bacterias hidrolíticas-acidogénicas; 2) Bacterias acetogénicas; 3) Bacterias homoacetogénicas; 4) Bacterias metanogénicas hidrogenófilas; 5) Bacterias metanogénicas acetoclásticas

Fuente. (Parra Montoya, 2015).

Anexo 7. Laguna anaeróbica de la UEB Integral N°1.



Fuente. Elaboración propia.

Anexo 8. Laguna facultativa de la UEB Integral N°1.



Fuente. Elaboración propia.

Anexo 9. Laguna aeróbica o de maduración de la UEB Integral N°1.



Fuente. Elaboración propia.

Anexo 10. Ventajas y desventajas de los lechos de secado.

Ventajas	Desventajas
Bajo costo de inversión, siempre y cuando no se requieran revestimientos elaborados y haya disponibilidad de terreno	Tecnología aplicable a lodos previamente estabilizados o con alto grado de mineralización
El seguimiento y nivel de preparación por parte de los operarios no es muy alto	Gran requerimiento de terreno
Ahorros significativos en costos energéticos y operativos	Falta de un enfoque de diseño racional para un análisis económico sólido
Menos sensible a la variabilidad de las características de lodos	El clima impacta significativamente el diseño y el desempeño
Alcanza mayores concentraciones de sólidos que los métodos mecánicos	La eliminación de lodos demanda mucha mano de obra
Bajo o nulo consumo de productos químicos	Olor real o percibido y molestias visuales.

Fuente. (WEF, 2018).

Anexo 11. Tabla de resultados de la evaluación económica de la propuesta tecnológica de biodigestor tropicalizado para la UEB Integral N°1 de la empresa Porcina de Cienfuegos.

PROYECTO DE BIODIGESTOR PORCINO INTEGRAL N° 2021.																		
N°	Datos iniciales		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Ingresos (I), \$			\$164.227,00	\$164.227,00	\$164.227,00	\$164.227,00	\$164.227,00	\$164.227,00	\$164.227,00	\$164.227,00	\$164.227,00	\$164.227,00	\$164.227,00	\$164.227,00	\$164.227,00	\$164.227,00	\$164.227,00
2	Gastos (G), \$			\$65.690,80	\$65.690,80	\$65.690,80	\$65.690,80	\$65.690,80	\$65.690,80	\$65.690,80	\$65.690,80	\$65.690,80	\$65.690,80	\$65.690,80	\$65.690,80	\$65.690,80	\$65.690,80	\$65.690,80
3	Costo inversión (Ko)		-\$188.570,00															
4	Tasa de descuento (r) , %			8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
5	Tasa de inflación (f), %			5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	Margen de riego, %			3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
7	Tasa de impuesto (t), %			35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
8	Vida útil estimada, años			15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	Resultados																	
9	Año		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10	Depreciación (Dep), \$			\$12.571,30	\$12.571,30	\$12.571,30	\$12.571,30	\$12.571,30	\$12.571,30	\$12.571,30	\$12.571,30	\$12.571,30	\$12.571,30	\$12.571,30	\$12.571,30	\$12.571,30	\$12.571,30	\$12.571,30
11	Flujo de caja (Fc), \$			68448,49	68448,49	68448,49	68448,49	68448,49	68448,49	68448,49	68448,49	68448,49	68448,49	68448,49	68448,49	68448,49	68448,49	68448,49
12	Tasa de descuento real (R)			0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
13	Tasa de descuento real con margen (D)			0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
14	Factor de descuento (Fdesc.)			0,94	0,89	0,84	0,80	0,75	0,71	0,67	0,63	0,60	0,57	0,53	0,51	0,48	0,45	0,43
15	Flujo de caja descontado (Fd), \$			64661,19	61083,44	57703,66	54510,88	51494,76	48645,52	45953,93	43411,27	41009,30	38740,23	36596,71	34571,79	32658,91	30851,87	29144,82
16	Flujo descontado acumulado (Fda),VPN, \$		-\$188.570,00	-\$123.908,81	-\$62.825,37	-\$5.121,71	\$49.389,16	\$100.883,92	\$149.529,44	\$195.483,37	\$238.894,64	\$279.903,94	\$318.644,16	\$355.240,87	\$389.812,65	\$422.471,56	\$453.323,43	\$482.468,25
				TIR		26%												

Fuente. Elaboración propia.