

Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”
Facultad de Ingenierías
Departamento de Química e Ingeniería Química



OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS

Trabajo de diploma presentado en opción al título de Ingeniero Químico

Autora: Yenisleydis Almeida Fente

Tutora: Dr C. Josefina del Carmen González Hernández

Matanzas, 2012

Declaración de Autoría

Yo, Yenisleydis Almeida Fente, declaro que soy la única autora de este Trabajo de Diploma y lo pongo a disposición del Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ingenierías de la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, para hacer uso del mismo con la finalidad que se estime conveniente.

Yenisleydis Almeida Fente

Pensamiento

“La energía no se crea, siempre existe, y no se destruye, solamente se transforma por medio del pensamiento o voluntad de quien la maneja”.

Albert Einstein

Dedicatoria

- ✓ A mi madre Dora y padre Jorge Luis por cuidarme, quererme y confiar en que si podía llegar a cumplir sus sueños.
- ✓ A mis hermanos Jorgito y Michel por apoyarme tanto y ser lo más grande de mi vida.

Agradecimientos

- ✓ A mi tutora Doctora Josefina del Carmen González Henández por guiarme, apoyarme y brindarme sus consejos.
- ✓ A mi familia, especialmente mis padres, hermanos y tío Omar por quererme y ayudarme siempre.
- ✓ A mi novio por confiar en mí y por su ayuda incondicional.
- ✓ A la familia de mi novio por su ayuda desinteresada.
- ✓ A mis amistades por su comprensión y estar siempre a mi lado.
- ✓ A mis compañeros del aula por ser tan atentos conmigo.
- ✓ A mis vecinos por su apoyo.
- ✓ A los profesores por ayudar a cumplir mis sueños y por su dedicación, especialmente José Luis Laucericca Núñez, Damaris González y Mariela Almeida.
- ✓ A los trabajadores de la planta de tratamiento de residuales “Punta Hicacos” por brindarme todas las informaciones necesarias para la investigación.
- ✓ A la empresa EMPAI por su apoyo.
- ✓ A todos:

Muchas Gracias

Resumen

En la investigación se realiza un estudio sobre la producción de biogás a partir de una mezcla de lodos que provienen de la planta de tratamiento de residuales “Punta Hicacos” con otra fuente de sustrato que es el residuo de jardinería en la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Se utilizó como inóculo excretas de ganado vacuno y porcino. El trabajo se desarrolla a escala experimental, en digestores de 2L para cuantificar la producción del gas metano que se genera. Se emplea un diseño factorial 3^2 , siendo las variables a evaluar: cantidad de lodo, cantidad de residuo de jardinería, ambas a tres niveles 275, 550, 825.

A partir de la optimización de los resultados experimentales mediante el programa computacional EXCEL se realiza una propuesta tecnológica para la producción de biogás que comprende cuatro etapas: preparación del sustrato, preparación del inóculo, digestión anaerobia en la cual la materia orgánica se degrada en ausencia de oxígeno libre y se forman compuestos más simples como metano y dióxido de carbono y almacenaje.

El diseño preliminar de los equipos fundamentales permitió comprobar que el biodigestor de cúpula fija posee un volumen de 22.5 m^3 y su construcción representa una inversión de \$ 14100 en moneda nacional, la tolva propuesta es de 3 metros de altura y el tanque para preparar las suspensiones de residuo de jardinería con lodo resultó ser de 2 m de alto.

Los indicadores de evaluación de la inversión: Valor Actual Neto igual a \$ 629 904 y Tasa Interna de Rentabilidad 63%, demuestran la factibilidad económica de la propuesta.

Summary

This research is a study on the production of biogas from a mixture of sludge from the wastewater treatment plant "Punta Hicacos" with the residue of gardening at the University of Matanzas "Camilo Cienfuegos" as another source of substrate. Inoculum was used as manure from cattle and pigs. The work is developed on a pilot scale in 2L digesters to quantify the production of methane gas that is generated. It employs full factorial design, where the variables to be evaluated: amount of sludge, the amount of garden waste, both at three levels 275, 550, 825. After optimization of the experimental results using the computer program EXCEL, we make a technological proposal for biogas production that involves four steps: substrate preparation, preparation of inoculum and anaerobic digestion, in which organic matter is degraded in the absence of oxygen and form simpler compounds such as methane and carbon dioxide and storage. The preliminary design of the vital equipment allowed proving that the fixed dome digester has a volume of 22, 5 m³ and its construction represents an investment of \$ 14100 in local currency, the hopper proposal is 3 meters high and the tank to prepare the suspension of gardening with mud residue was found to be 2 m high. Evaluation of indicators of investment: net present value equal to \$ 629 904 and Internal Rate of Return 63%, demonstrate the economic feasibility of the proposal.

Tabla de contenido

Introducción	1
Capítulo 1: Análisis Bibliográfico	4
1.1. Situación energética en Cuba	4
1.1.1. Fuentes renovables de energía en Cuba	5
1.2. Tratamiento de aguas residuales	7
1.2.1. Objetivos que persigue el tratamiento de aguas residuales	7
1.2.2. Digestión anaerobia	9
1.2.2.1. Factores que inciden en el proceso de digestión anaerobia	10
1.2.2.2. Diseño de los reactores anaerobios	12
1.3. Gestión de residuos	15
1.3.1. Clasificación de los residuos sólidos	16
1.3.2. Tratamiento de los residuo sólidos	17
1.4. Biogás. Su obtención y aplicación	19
1.4.1. Aplicación de la producción de biogás en Cuba y Matanzas	20
1.5. Residuos de jardinería. Composición química y tratamientos	21
1.5.1. Composición química de las plantas	22
1.5.2. Tratamientos para los residuos de jardinería	25
1.6. Conclusiones parciales del capítulo	25
Capítulo 2: Materiales y métodos	27
2.1. Análisis documental	28
2.2. Descripción de la zona objeto de estudio	28
2.3. Descripción de la planta ‘‘Punta Hicacos’’	29
2.4. Diseño experimental	30
2.5. Análisis físico- químicos de las muestras	32
2.6. Propuesta tecnológica de la producción de biogás a partir de residuos de jardinería, lodo y utilizando como inóculo mezcla de excreta de ganado vacuno y cerdo	33
2.6.1. Diseño de la tolva	33
2.6.2. Diseño del tanque para la suspensión de los residuos	34
2.6.3. Diseño preliminar del biodigestor	35
2.6.3.1. Cálculo de las dimensiones del biodigestor cúpula fija	37
2.6.3.2. Selección de los materiales del biodigestor cúpula fija	39
2.7. Análisis económico	39
2.7.1. Determinación del costo del biodigestor cúpula fija	39
2.7.2. Evaluación de la inversión	40
Capítulo 3: Análisis de los resultados	42
3.1. Resultados del análisis documental	42

3.2. Análisis de la producción de biogás a partir del diseño experimental	42
3.3. Resultados del análisis físico- químico de las muestras	44
3.4. Resultados de la propuesta tecnológica de la planta de producción de biogás a partir de residuos de jardinería, lodo y utilizando como inóculo mezcla de ganado vacuno y porcino	47
3.4.1. Resultados del diseño de la tolva	48
3.4.2. Resultados del diseño del tanque para la suspensión de lodo y residuos de jardinería	48
3.4.3. Resultados del diseño preliminar del biodigestor anaerobio	49
3.4.3.1. Resultados de las dimensiones del biodigestor cúpula fija	51
3.4.3.2. Materiales que se emplean en la construcción del biodigestor cúpula fija	53
3.5. Resultados del análisis económico	54
3.5.1. Resultado del costo del biodigestor cúpula fija	54
3.5.2. Análisis de los resultados de la evaluación de la inversión	55
3.6. Conclusiones parciales del capítulo	58
Conclusiones	59
Recomendaciones	60
Bibliografía	61
Anexos	68

Introducción

El aumento en la generación de residuos asociado al crecimiento poblacional conlleva a la aplicación de tecnologías apropiadas para la disposición final de residuos que permitan un control racional de los impactos producidos por los mismos, sin que se ponga en alto riesgo el medio ambiente y la salud pública.

En la actualidad la gestión ambiental ocupa un lugar fundamental en los planes de desarrollo de empresas, entidades y territorios en la mayoría de los países del mundo. El diseño de la política ambiental, contempla la implantación de la gestión integrada de residuos sólidos (GIRS), ya sean no peligrosos o peligrosos, como término aplicado a todas las actividades que responden al manejo de los diversos flujos de residuos dentro de la sociedad y su meta es administrarlos de una forma compatible con el medio ambiente.

En Cuba, el Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) formula la estrategia nacional de medio ambiente y dirige las acciones encaminadas a lograr la sostenibilidad de la gestión a partir de las estrategias provinciales, locales y del control de su ejecución.

La Ley 81 estipula y regula todos los aspectos que fomentan el cuidado, protección, conservación y respeto del Medio Ambiente para lograr el uso racional de los recursos naturales y el desarrollo económico, social y ambiental.

El agua es uno de los recursos de vital importancia, por eso la política ambiental hace hincapié en su aprovechamiento y ahorro. Para eso se construyen un sin número de plantas de tratamiento de aguas residuales en todo el mundo, con el fin de generar agua de reúso y lodos que contienen elementos nutritivos para el suelo.

Tal es el caso de la planta de tratamiento de los residuales líquidos de Punta Hicacos, la cual se encuentra dentro del Esquema General del Desarrollo Turístico de Varadero y tiene como objetivos básicos los siguientes: tratar la totalidad de los residuales líquidos que se generan en las parcelas desde la número 4 a la 13, con un total de 33150 habitaciones y una capacidad total de 4335 m³/día. , evitar los efectos nocivos del vertimiento de aguas residuales no tratadas sobre el medio ambiente y la salud humana y garantizar un efluente líquido con condiciones que permitan su vertimiento a la bahía de Cárdenas y su reúso para el riego de las áreas verdes de las propias instalaciones turísticas.

En el proceso depurativo del agua residual se obtiene como producto final agua depurada y lodos. Estos últimos son enviados a los lechos de secado durante 30 días. Este método, en dependencia

de las condiciones climáticas, conlleva a una larga exposición de los lodos a la atmósfera creando problemas ambientales como: generación de olores desagradables que afectan el bienestar de turistas y pobladores, falta de espacio para disponer los lodos mientras transcurre el período de secado necesario para el traslado a su destino final, atracción de vectores, diseminación de contaminantes patógenos causantes de enfermedades y la posible contaminación de las aguas subterráneas por lixiviación. Los microorganismos patógenos constituyen un riesgo público si son transferidos a plantas alimenticias que han sido cultivadas en tierras cercanas o donde se han aplicado biosólidos sin tratamiento previo adecuado. También los vectores, como insectos, roedores y pájaros, entre otros, pueden contribuir a la contaminación por su capacidad de transporte de patógenos.

Esta problemática se considera una de las prioridades en la estrategia local de Varadero y su solución es un eslabón fundamental en las acciones de gestión ambiental previstas a desarrollar.

Según estudios realizados por Pérez, (2008) Cuba traza nuevas estrategias en la implementación de alternativas energéticas. Uno de los primeros pasos que conforman su política energética es la elevación de la eficiencia energética, eliminando esquemas de consumo irracionales y sustituyéndolos por tecnología más eficientes, aprovechando las fuentes secundarias de bajo potencial y utilizando sistemas de cogeneración. La sustitución a largo plazo de las fuentes de energía fósil, por otras de menor impacto ambiental, en particular por fuentes renovables, tales como la biomasa, la energía eólica y la hidroenergía se contemplan como vías de desarrollo.

En los últimos tiempos en Cuba la producción de biogás representa una alternativa energética que ha tomado gran auge por su factibilidad técnica- económica y su implementación ocupa un lugar fundamental en los lineamientos de la política ambiental del país.

Por lo antes expuesto se plantea como problema:

La disposición de lodos en los lechos de secado en la planta de tratamiento de residuales Punta Hicacos genera contaminación ambiental.

Hipótesis: La obtención de biogás a partir de residuos minimiza la contaminación ambiental que genera la disposición de los lodos en los lechos de secado en la planta de tratamiento de residuales Punta Hicacos.

Objetivo General: Evaluar la producción de biogás a partir de la mezcla de lodos procedentes de la planta de tratamiento de residuales Punta Hicacos y residuos de jardinería.

Para complementar el objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Desarrollar a escala de laboratorio la producción de biogás a partir de diferentes fuentes de sustrato y utilizando como inóculo la mezcla de excretas de ganado vacuno y porcino.
2. Realizar la propuesta tecnológica para la producción de biogás.

Capítulo 1: Análisis Bibliográfico

1.1. Situación energética en Cuba

En Cuba la producción total de energía asciende a 11 381 millones de toneladas equivalentes de petróleo, con un 58% cubierta por fuentes nacionales. La producción nacional de energía primaria es cubierta en un 57% con crudo nacional, un 28,5% con biomasa cañera, un 10.2% con gas, un 4.2 con biomasa forestal y un 0.2 con hidroenergía. (ONE, 2005)

Arrastría (2009) refiere que la crisis energética que enfrentó Cuba en el período 2003-2005 se agravó en el verano de 2004, y no dejó mucho margen a la búsqueda de soluciones para su solución inmediata. La introducción del modelo de Generación Distribuida resolvió la situación en un tiempo muy corto. La mayoría de las nuevas instalaciones de Generación Distribuida (GD) en el país son generadores y motores que queman combustibles fósiles (diesel y fuel oil), así como pequeños generadores de emergencia. Estas tecnologías han tenido un impacto positivo en el medio ambiente, ya que poseen menores tasas de consumo específico (234 g / kWh), frente a las plantas termoeléctricas basadas en la quema de petróleo crudo (284 g / kWh en promedio). Cuba tiene una capacidad de generación eléctrica de 2497 MW sobre la base de la generación distribuida, de la cual 1280 MW corresponden a generadores diesel y el resto son motores de fuel oil (540 MW), cogeneración (529 MW) y otras tecnologías energéticas renovables (148 MW). El país también tiene una reserva de más de 6000 pequeños generadores diesel instalados en centros clave de la economía y los servicios a la población, tales como panaderías, centros comerciales, hospitales, clínicas y centros para la producción de alimentos. La potencia combinada de todos estos generadores alcanza la cifra de 690 MW y el objetivo es interconectarlos a la red eléctrica nacional.

La Revolución Energética de Cuba también ha significado un acelerado despegue en la aplicación de las tecnologías energéticas renovables. La creación del Grupo Nacional para la atención a las Fuentes Renovables de Energía, la Eficiencia Energética y la Cogeneración, la creación de un Vice-Ministerio de Energías Renovables adjunto al Ministerio de la Industria Básica, la implementación de programas para el desarrollo de la generación de electricidad basada en la energía eólica, el uso de la energía solar para el calentamiento de agua de uso doméstico, social y con fines industriales, el desarrollo de la capacidad hidroeléctrica y el aprovechamiento de los desechos sólidos con fines de valorización energética, así como la investigación sobre la energía geotérmica, energía oceánica y otras tecnologías, demuestra todos los avances del país en favor

de una inclusión cada vez mayor de tecnologías energéticas renovables dentro del modelo de Generación Distribuida. (Arrastía, 2009)

1.1.1. Fuentes renovables de energía en Cuba.

Las fuentes renovables de energía favorecen la independencia energética porque se usa la energía del sol presente en el país sin la intervención de fuentes exteriores. (Vallée y Marc, 2008).

Las fuentes renovables de energía son parte de la solución hacia un desarrollo sostenible, es decir, un desarrollo que responde a las necesidades de hoy sin comprometer la capacidad de las próximas generaciones de responder a las suyas. Este desarrollo enfatiza tres aspectos interdependientes: el desarrollo económico, ecológico y social.

En Cuba el 5 % de los hogares ubicados en zonas alejadas no tenía energía eléctrica. Se realizaron varios proyectos en el país, como el Programa de Electrificación Fotovoltaica en las montañas y zonas rurales remotas. Mediante estos programas se electrificaron 2 364 escuelas con instalaciones funcionando, casas y consultorios del médico de la familia y hospitales con más de 400 instalaciones; círculos sociales y salas de vídeo con más de 1 800 instalaciones. Con este programa ya todas las escuelas de Cuba están electrificadas, al igual que todos los consultorios y cinco hospitales, uno en Granma, dos en Guantánamo y dos en Santiago de Cuba. (Vallée y Marc, 2008)

Se desarrollan programas de educación solar para todo el pueblo y se planifica la creación de círculos de interés y la realización de centros de estudios solares. Ya existen círculos de interés en la provincia de Ciego de Ávila y en Granma; dos centros en las provincias orientales dedicados a la energía solar: de ellos el Centro de Estudios Solares en el municipio de Bartolomé Masó en la provincia Granma y el otro es la Casa Solar en la provincia de Santiago de Cuba, ambos dedicados a educar a los estudiantes de primaria, secundaria y de nivel superior en el tema de las energías renovables.

También el municipio especial Isla de la Juventud cuenta con 209 calentadores solares para las habitaciones de los hoteles que radican en el polo turístico de Cayo Largo y 117 en viviendas particulares en el Reparto Industrial. (Torres, 2012)

Según Vallée y Marc, (2008) a partir del triunfo de la Revolución, Cuba desarrolló una voluntad hidráulica: se construyeron en todo el país más de mil presas y embalses. Existen cientos de minihidroeléctricas en funcionamiento que dan servicio a la población en zonas rurales y se pueden construir cientos más si se aprovechan los embalses ya existentes. Para Arrastía, (2009)

las dos centrales hidroeléctricas más antiguas construidas en Cuba se remontan a 1912 (Pilotos, Pinar provincia del Río, 155 kW) y 1917 (Guaso, de Guantánamo provincia, 1,75 MW).

La energía eólica puede alcanzar una importante participación en el balance energético nacional. Su uso a corto plazo resolverá la demanda local y hasta podrá complementar la generación del Sistema Energético Nacional o de sistemas eléctricos aislados. Además funciona desde el año 2007 un parque de capacidad total de 1,65 MW en el municipio especial Isla de la Juventud y está planificada la construcción de un segundo parque en Holguín que se llamará Gibara. (Vallée y Marc, 2008).

En Cuba, la industria azucarera lleva el peso fundamental en el aprovechamiento de las energías renovables, debido al alto potencial energético del bagazo y otros residuales cañeros y cubre una parte de las necesidades energéticas del país. Además, se transforman el afrecho de café, la cáscara de coco, la leña y la cáscara de arroz. (Vallée y Marc, 2008)

El tratamiento de los residuos agrícolas y pecuarios, adicionalmente a su beneficio energético por la producción de biogás, tiene un efecto inmediato en la descontaminación ambiental y además significa una producción adicional de biofertilizante rico en potasio y activo como mejorador de suelos. Cuba se propone producir biodiesel a partir de la planta *jatropha curcas*, para garantizar la producción de alimentos y el desarrollo sostenible de los pueblos. (Vallée y Marc, 2008)

La biomasa es un componente muy importante de la energía que actualmente se consume en el mundo, llegando a representar cerca del 11% del consumo total mundial (IEA citado por Macera, *et.al*, 2005). En muchos de los países en vías de desarrollo la biomasa es la más importante fuente de energía, con valores cercanos al 35 % del total (WEC citado por Masera, *et.al*, 2005). En total, se estima que 46 Exajoules (EJ) de la energía primaria global se derivan de la biomasa; con 85% por uso “tradicional” (leña, abono), y 15% en uso industrial, como combustibles, procesos Calor y Energía Combinados (CHP), y Electricidad.

Es criterio de la autora que para mejorar la situación energética en Cuba se hace necesaria la implementación de tecnologías con el uso de fuentes renovables ya que estas no son agotables, contribuyen a disminuir el calentamiento global y fomentan la protección y conservación del medio ambiente. Un ejemplo de ello es la obtención de biogás a partir de residuos, lo cual constituye un paso más para lograr una gestión ambiental eficiente.

1.2.Tratamiento de aguas residuales.

Por la importancia que representa el agua para la sociedad en general, el adecuado tratamiento de aguas residuales industriales y su posterior reutilización para múltiples usos contribuye a un consumo sostenible del agua y a la regeneración ambiental del dominio público hidráulico y marítimo y de sus ecosistemas. También es necesario para la prevención de la contaminación ambiental, al igual que para la protección de la salud pública. (Rodríguez, *et.al.*, 2003).

En la directiva 91/271 CEE, del Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas, se definen los distintos tipos de aguas residuales:

- ✓ Aguas residuales domésticas: Aquellas procedentes de zonas de vivienda y de servicios generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas.
- ✓ Aguas residuales industriales: Todas las aguas residuales vertidas desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial.
- ✓ Aguas urbanas: Las aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o aguas de escorrentía pluvial.

Todas ellas habitualmente se recogen en un sistema colector y son enviadas mediante un emisario terrestre a una planta EDARs (Estación Depuradora de Aguas Residuales). Las industrias que realicen el vertido de sus aguas residuales en esta red colectora, habrán de acondicionar previamente sus aguas.

1.2.1. Objetivos que persigue el tratamiento de aguas residuales.

Según los autores Kelly, *et. al.*, (2002); Mendonça, (2000) los tratamientos a la aguas residuales reducen el nivel de microorganismos dañinos a niveles más seguros de exposición, donde el agua es comúnmente reciclada para el riego o usos industriales. Al escoger la tecnología apropiada de tratamiento, deben considerarse cierto número de factores, incluyendo la cantidad y composición de la corriente de residuos, los estándares del efluente, opciones indicadas de uso y desecho, opciones de pretratamiento industrial y factibilidad de funcionamiento (es decir, inquietudes económicas y técnicas).

Muchas opciones de tratamiento pueden ayudar a reducir los efectos de contaminación ambiental. La eficacia del tratamiento debe ser balanceada con el costo, la aplicación práctica y el cumplimiento con los métodos que han sido escogidos para la implementación. Para algunos ambientalistas, la opción más segura para eliminar los residuos puede ser la descarga costera,

pero a mayor distancia para minimizar el impacto sobre los nadadores. Reportes recientes indican que la degradación de los arrecifes de coral en el Mar Caribe se atribuye a residuos humanos. El reúso de aguas residuales es una opción válida para el desecho, donde el medio ambiente puede filtrar efectivamente las corrientes de residuos moderadamente tratados. La minimización del ingreso de residuos peligrosos generados por procesos industriales (como, metales pesados) a las plantas municipales de tratamiento, es algo clave para reducir los efectos tóxicos de estos efluentes, muchos de los cuales no pueden ser eliminados a través de procesos convencionales de tratamiento. (Kelly, *et. al.*, 2002)

En general, las aguas residuales consisten de dos componentes, un efluente líquido y un constituyente sólido, conocido como lodo. Típicamente existen dos formas generales de tratar las aguas residuales. Una de ellas consiste en dejar que las aguas residuales se asienten en el fondo de los estanques, permitiendo que el material sólido se deposite en el fondo. Después se trata la corriente superior de residuos con sustancias químicas para reducir el número de contaminantes dañinos presentes. El segundo método más común consiste en utilizar la población bacteriana para degradar la materia orgánica. Este método, conocido como tratamiento de lodos activados, requiere el abastecimiento de oxígeno a los microbios de las aguas residuales para reactivar su metabolismo. (Kelly, *et. al.*, 2002)

Los pasos básicos para el tratamiento de aguas residuales incluyen:

1. Pretratamiento: remoción física de objetos grandes.
2. Deposición primaria: sedimentación por gravedad de las partículas sólidas y contaminantes adheridos.
3. Tratamiento secundario: digestión biológica usando lodos activados o filtros de goteo que fomentan el crecimiento de microorganismos.
4. Tratamiento terciario: tratamiento químico (por ejemplo, precipitación, desinfección). También puede utilizarse para realzar los pasos del tratamiento primario.

El tratamiento físico comprende todos aquellos equipos en los que se utilizan las fuerzas físicas. Sin embargo algunas de las operaciones son propias de la fase de pretratamiento. Algunas de las operaciones físicas (Zepeng citado por Soares, 2010) son: tamizado, cribado, homogenización, mezclado, sedimentación, evaporación, entre otras.

Los tratamientos biológicos se basan en fenómenos naturales de degradación, metabolismo y utilización de los productos contenidos en el agua residual. El tratamiento biológico del agua

residual tiene como objetivo la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica que se encuentra suspendida y disuelta, mediante la acción de microorganismos. En el proceso se produce una serie de reacciones bioquímicas mediante las cuales los microorganismos utilizan la materia presente en el agua, la sintetizan y aprovechan la energía. (Zepeng citado por Soares, 2010).

Para Weiland y RozziI, (2006) los sistemas de tratamiento biológico en general, deben separar primeramente la materia sólida que contiene el residual y deben lograr siempre la máxima producción, máxima economía.

Los tratamientos biológicos se pueden clasificar según la presencia o ausencia de oxígeno disuelto en los mismos, en aerobios y anaerobios, donde intervienen microorganismos aerobios o anaerobios.

Los tratamientos químicos son todos aquellos procesos en los que la eliminación de los contaminantes presentes en el agua residual se lleva a cabo mediante la adición de reactivos químicos, o bien mediante las propiedades químicas de diversos compuestos. Se utiliza junto con tratamientos físicos y biológicos. Algunas de las operaciones químicas (Zepeng citado por Soares, 2010) son: coagulación-floculación, precipitación química, oxidación-reducción, intercambio iónico, ósmosis inversa.

La autora refiere que dentro de los tratamientos mencionados en la investigación se tiene en cuenta la digestión anaerobia y considera que la combinación de estos tratamientos resulta eficiente a partir de las características físico química, microbiológicas y parasitológicas del agua residual y del uso o disposición final de la misma.

1.2.2. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es uno de los procesos que se llevan a cabo para el tratamiento de aguas residuales. El mismo consiste en la descomposición anaerobia que conduce a la degradación de la materia orgánica y su transformación, en ausencia de oxígeno libre, en compuestos más simples como metano y dióxido de carbono (Menéndez y Pérez, 1991).

Súchil; Jain *and* P.K. (2001) plantean que la digestión anaerobia es un proceso biológico en el cual la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en biogás (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S , otros) y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, entre otros) y compuestos de difícil degradación. Es un proceso natural que se produce en pantanos, lagos y ríos.

La fermentación bacteriana interviene en poblaciones microbianas diversas, en las que se distinguen cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (González, *et al*, 2009).

Las cuatro etapas metabólicas que ocurren en los procesos de digestión anaerobia pueden ser representadas según la figura 1.1 (Anexo 1).

Ventajas que presenta el tratamiento anaerobio sobre la digestión aerobia según Mc Farclene, (1988):

- ✓ Provee un alto grado de estabilización de la materia orgánica de un 80 a un 90 % de estabilización de sustrato.
- ✓ Baja producción de biomasa.
- ✓ Alta remoción de la DQO.
- ✓ No necesita energía secundaria
- ✓ Se produce el biogás, el cual es valorado combustible por su contenido en metano.

Desventajas:

- ✓ Baja velocidad de degradación de la materia orgánica.
- ✓ El efluente del proceso es generalmente de más pobre calidad que las del proceso aeróbico.

1.2.2.1. Factores que inciden en el proceso de la digestión anaerobia.

Para los autores Campos, *et. al.*, (2000); Conteras, (2006); ETHANOL, (2009) los factores ambientales para el control de la digestión anaerobia, deben ser tomados en cuenta para el diseño.

Entre los más importantes se destacan:

- ✓ pH
- ✓ Ácidos volátiles
- ✓ Sustancias tóxicas
- ✓ Temperatura

pH. El intervalo de pH es de 6.6 a 7.6. Los ácidos grasos volátiles (AGV) y el acetato tienden a disminuir el pH del sustrato. Si las bacterias metanogénicas no alcanzan a convertir rápidamente los AGV a medida que lo producen las bacterias acetogénicas, estos se acumulan y disminuyen el pH en el biorreactor. Sin embargo, el equilibrio CO_2 - bicarbonato opone resistencia al cambio de pH. Existen métodos prácticos para corregir los bajos niveles de pH en el biorreactor. El primero es parar la alimentación del biorreactor y dejar que las bacterias metanogénicas asimilen los AGV; de esta forma aumentará el pH hasta un nivel aceptable. Al detener la alimentación

disminuye la actividad de las bacterias fermentativas y se reduce la producción de los AGV. Una vez que se haya restablecido el pH se puede continuar la alimentación del biorreactor pero en pocas cantidades, después se puede ir aumentando gradualmente para evitar nuevos descensos. El segundo método consiste en adicionar sustancias buffer para aumentar el pH, como el agua con cal. Las cenizas de soda (carbonato de sodio) constituyen una variante más costosa, pero previenen la precipitación del carbonato de calcio. Los requerimientos de buffer varían según el residual, los sistemas y tipo de operación. (Campos, *et. al.*, 2000; Conteras, 2006; ETHANOL, 2009)

Ácidos volátiles. Los principales ácidos volátiles formados en el tratamiento anaeróbico son el acético y el propiónico; siendo los precursores de la formación de metano. La concentración de ácidos volátiles y la alcalinidad durante el tratamiento anaeróbico dependen de la concentración del residual y de su composición. El mejor criterio para conocer la estabilidad del sistema es la relación ácidos volátiles / alcalinidad, la cual debe ser $< 0,5$. (Sánchez, 2003)

Toxicidad. Los compuestos tóxicos incluso en bajas concentraciones, afectan la digestión y disminuye los niveles de metabolismo. Las bacterias metanogénicas son generalmente las más sensibles, aunque todos los grupos pueden ser afectados. Un nutriente esencial también puede ser tóxico si su concentración es muy alta, en el caso de nitrógeno, mantener un nivel óptimo para garantizar un buen funcionamiento sin efectos tóxicos es particularmente importante. (Campos, *et. al.*, 2000; Conteras, 2006; ETHANOL, 2009)

Temperatura. La formación de metano se produce en la naturaleza a diferentes temperaturas. Los niveles de reacción química y biológica normalmente aumentan con el incremento de la temperatura. En aplicaciones técnicas, tres intervalos de temperatura se distinguen: temperatura psicrófila ($10^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$), temperatura mesófila ($25^{\circ}\text{C} - 45^{\circ}\text{C}$), temperatura termófila ($49^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$). Sin embargo, la actividad enzimática de las bacterias depende profundamente de la temperatura. Las altas temperaturas causan una declinación del metabolismo, debido a la degradación de las enzimas; y esto es crítico para la vida de las células. Henze y Harremoes citado por Sánchez, (2003), resumen que el proceso termófilo tiene velocidades de producción de metano de 25 a 50 % mayores que el proceso mesófilo y plantean que el principal problema de los procesos termófilos es que a esas temperaturas existen pocas especies bacterianas capaces de crecer.

La digestión termofílica permite una permanencia menor en los tanques, pero debido a su excepcional sensibilidad a los cambios de temperatura, exige un gran control y no es aconsejable (Montes, 2008).

De acuerdo con lo expresado por los diferentes autores se plantea que para el estudio de este trabajo se tiene en cuenta la temperatura mesofílica, ya que la experimentación se realiza en condiciones medioambientales.

1.2.2.2. Diseño de los reactores anaerobios.

Para los autores como Menéndez y Pérez, (1991); Bigeriego, (2000) existen dos enfoques para el diseño de reactores anaerobios, los que se basan en métodos empíricos y los que utilizan criterios cinéticos.

Métodos empíricos.

Los métodos empíricos se utilizan fundamentalmente cuando se necesita digerir lodos producidos en alguna etapa anterior del tratamiento. Dentro de los ellos se encuentran:

✓ Método de las cargas:

El método de las cargas o tradicional para el diseño de digestores de lodo brinda buenos resultados en la medida que los criterios que se utilicen se basen en la experiencia previa, sin extrapolar resultados anteriores a una nueva situación. Este método determina el volumen requerido de reactor en función de una carga asumida. El factor de carga más utilizado es que se basa en los kg de sólidos volátiles añadidos por cada m³ de reactor por día. La carga recomendada para los reactores normales está entre 0.03 y 0.10 kg de sólidos volátiles (SV) por m³ por día, con tiempos de retención de 30 a 90 días. En el caso de reactores de alta carga es posible utilizar cargas hasta 1.6 – 6.4 kg de SV por cada m³ por día, para tiempos de retención de 10 a 20 días. (Menéndez y Pérez, 1991)

✓ Método de la reducción de volumen:

Según Menéndez y Pérez, (1991) a medida que la digestión tiene lugar, el lodo experimenta una reducción de volumen. Teniendo en cuenta esta característica, el volumen del reactor se determina como:

$$V = \left[V_f - \left(\frac{2}{3} \right) * (V_f - V_d) \right] * t \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Donde:

V: volumen del digestor, m³

Vf: volumen diario de lodo crudo, m³

Vd: volumen diario de lodo digerido, m³

t: tiempo de retención, días

Ecuaciones de diseño basadas en criterios cinéticos.

En el método de diseño basado en criterios cinéticos se tienen en cuenta los cálculos de los siguientes criterios:

- ✓ Tiempo de retención y volumen del digestor

Para un digestor anaerobio que opere con mezcla completa según Menéndez y Pérez, (1991), el tiempo de retención viene dado por:

$$\theta = \left(\frac{\Delta S}{X * k} \right) * \left(\frac{S_0}{S} \right) \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Donde:

$$\Delta S = S_0 - S \quad \text{Ecuación 1.3}$$

ΔS , mgL⁻¹

S: DBO ó DQO en el efluente, mgL⁻¹

S₀: DBO ó DQO en el afluente al reactor, mgL⁻¹

X: concentración de sólidos suspendidos volátiles en el reactor, mgL⁻¹

k: constante específica de remoción de sustrato, d⁻¹

El volumen efectivo del digestor se obtiene (m³):

$$V = \theta * Q \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Donde:

Q: flujo de entrada al digestor, m³d⁻¹

- ✓ Edad del lodo y producción de sólidos

Según Menéndez y Pérez, (1991) aunque la producción de biomasa durante la digestión anaerobia es mucho menor que en los procesos aerobios, siempre hay que considerarla, pues ella va a garantizar en cierta medida que el reactor no se lave con la consecuente detención del proceso.

$$\Delta X = Y * \Delta S_v - K_b * X \quad \text{Ecuación 1.5}$$

Donde:

ΔX : producción de sólidos, kgm⁻³d⁻¹

Y: rendimiento

ΔBv : razón de carga volumétrica, $\text{kgm}^{-3}\text{d}^{-1}$

Valores típicos de Y y kb:

Y: 0.1 – 0.2

kb: 0.015 – 0.025

Cuando la producción de biomasa es ΔX , y se desea una concentración de sólidos suspendidos volátiles en el reactor igual a X, la edad de lodo requerida es:

$$\theta_x = \frac{X}{\Delta X} \quad \text{Ecuación 1.6}$$

✓ Volumen de gas producido

La producción de gases en los procesos de digestión es muy variable y depende en alguna medida de la composición del agua residual. En términos generales, y tomando como base la DQO, puede estimarse la producción total de gas a temperatura y presión normal (TPN) como:

$$GT = 0.5 * (\Delta Bv - 1.42 * \Delta X) * V \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Donde:

$$\Delta Bv = \frac{\Delta S}{\theta} \quad \text{Ecuación 1.8}$$

✓ Para volumen de CH_4 (m^3/d)

$$G = 0.35 * (\Delta Bv - 1.42 * \Delta X) * V \quad \text{Ecuación 1.9}$$

✓ El Nitrógeno y Fósforo que se requiere en los procesos anaerobios es menor que los que exigen los aerobios (kgd^{-1}):

$$N = 0.12 * \Delta X * V \quad \text{Ecuación 1.10}$$

$$P = 0.025 * \Delta X * V \quad \text{Ecuación 1.11}$$

La autora refiere que dentro de los métodos de diseños mencionados anteriormente el que se lleva a cabo en la investigación es el método basado en criterios cinéticos.

Para la producción de biogás existen diferentes tipos de reactores que estos a su vez se clasifican en:

Reactores de primera generación. En ellos la biomasa se encuentra sedimentada y existe un mínimo contacto con el sustrato, o bien en suspensión sin recirculación de sólidos, de lo que se

deriva una relación unitaria entre el tiempo de retención celular y el tiempo de retención hidráulica (TRC /TRH). Estas condiciones de operación dan lugar a que la eficiencia en la remoción de la materia orgánica sea baja con producciones que no sobrepasan el 1,5 m³ de biogás por m³ de biodigestor. Las variantes de estos tipos de biodigestores se emplean para el tratamiento de residuos sólidos y la estabilización de lodos. Ejemplos de los mismos son los biodigestores convencionales, en particular los de cúpula fija y campana flotante, desarrollados en China y la India, respectivamente. (Pérez, *et.al*, 2000); las laguna anaerobias y reactores completamente mezclados. (Menéndez y Pérez, 1991)

Reactores de segunda y tercera generación. Los reactores de segunda generación tienen como rasgo distintivo un aumento en la retención de microorganismos dentro del reactor, lo que se logra mediante la adhesión a soportes o por su sedimentación. La primera versión de estos reactores fue el filtro anaerobio. (Súchil *and* P.K. 2001)

Los de tercera y más reciente generación son los denominados de lecho fluidizado. Al igual que los de segunda generación han sido concebidos para el tratamiento de residuales líquidos de alta carga orgánica. (Sánchez, 2003)

Los sistemas de tratamientos anaerobios de segunda generación más aplicados a escala real son: reactor o biodigestor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodo (UASB), reactor anaerobio de lecho fijo, proceso de contacto anaerobio o biodisco anaerobio, reactor anaerobio con circulación interna (IC), reactor anaerobio con lecho granular expandido (EGSB), reactor híbrido. (Novoa y López, 2008). En las figuras 1.2, 1.3 y 1.4 (Anexo 2) existen diferentes modelos de birreactores.

1.3. Gestión de residuos

Se conoce como gestión ambiental al conjunto de actividades, mecanismos, acciones e instrumentos, dirigidos a garantizar la administración y el uso racional de los recursos naturales mediante la conservación, mejoramiento, rehabilitación y monitoreo de los componentes del medio ambiente y el control de la actividad del hombre en esta esfera.

La gestión ambiental aplica la política ambiental establecida mediante un enfoque multidisciplinario, teniendo en cuenta el acervo cultural, la experiencia nacional acumulada y la participación ciudadana. (Fernández y Sánchez, 2007)

La gestión de residuos puede involucrar a sustancias sólidas, líquidas o gaseosas con diferentes métodos para cada uno.

Para Barradas, (2009), la gestión integral de los residuos sólidos tiende a enmarcarse en la filosofía del desarrollo sostenible. En Europa, Estados Unidos de Norteamérica, Canadá y Japón, entre otros, la jerarquización llevada a cabo es similar y se agrupa de la siguiente manera:

- ✓ Prevención (Minimización y reducción en la fuente)
- ✓ Valorización
 - Reutilización
 - Reciclaje y compostaje
 - Recuperación de energía (Digestión anaerobia, incineración, etc.)
- ✓ Disposición final de rechazos en rellenos sanitarios

1.3.1. Clasificación de los residuos sólidos.

Los residuos, según López, *et.al.*, (2004), se pueden clasificar en: urbanos, industriales, agropecuarios y hospitalarios, forestales, ganaderos cada uno de estos residuos se gestiona de modo distinto.

Autores como Fernández y Sánchez, (2007) plantean que los residuos sólidos se pueden clasificar de diversas formas y criterios, en dependencia de la importancia que revisten la utilidad, la peligrosidad, fuente de producción, posibilidades de tratamiento, tipo de materiales, entre otros.

Los residuos sólidos han sido clasificados de diversas maneras. Estructuralmente mantienen ciertas características desde su origen hasta su disposición final. Los diferentes usos de los materiales, su biodegradabilidad, combustibilidad, reciclabilidad, etc., juegan un papel importante en la percepción de quien los clasifica, presentándose algunas discrepancias entre una u otra clasificación. A continuación se muestran algunas clasificaciones según lo planteado por Barradas, (2009).

1. Residuos sólidos orgánicos. Son los materiales residuales que en algún momento tuvieron vida, formaron parte de un ser vivo o se derivan de los procesos de transformación de combustibles fósiles.
 - ✓ Putrescibles: Son los residuos que provienen de la producción o utilización de materiales naturales sin transformación estructural significativa. Por ello y por su grado de humedad mantienen un índice alto de biodegradabilidad: residuos forestales y de jardín, residuos animales, residuos de comida, excretas de animales, residuos agropecuarios y agroindustriales, entre otros.

- ✓ No Putrescibles: Residuos cuyas características biológicas han sido modificadas al grado que en determinadas condiciones pierden su biodegradabilidad. Comúnmente son combustibles. Estos también pueden ser naturales o sintéticos.
- 2. Residuos sólidos inertes. Residuos no biodegradables ni combustibles que provienen generalmente de la extracción, procesamiento o utilización de los recursos minerales: vidrio, metales, residuos de construcción y demolición de edificios, tierras, escombros, entre otros.
- 3. Peligrosos o no peligrosos. Quedan definidos por una o más de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológico infeccioso. Por sus características físicas, químicas o biológicas pueden o no ser acoplados a procesos de recuperación o transformación, y en casos extremos tratarse para su incineración o confinamiento controlado.

De acuerdo a la fuente generadora (Barradas, 2009), los residuos pueden ser: residuos sólidos urbanos, residuos de construcción (residuos sólidos inertes), residuos agropecuarios, residuos clínicos o sanitarios, residuos sólidos de depuradoras de agua (lodos), residuos de incineración.

Es criterio de la autora que las fuentes de sustrato que se emplean en la investigación, según la clasificación de Barradas, 2009, responden a residuos sólidos de depuradoras de agua y residuos sólidos urbanos.

1.3.2. Tratamientos de los residuos sólidos.

Para autores como López, *et.al.*, (2004) la solución más generalizada que se le ha dado a los residuos y, en especial, a los residuos sólidos urbanos ha sido muy simple: quitarlos de la vista, arrojándolos a los llamados vertederos (tiraderos), sobre todo en vertederos incontrolados u ocultando el problema enterrándolos. Ambas opciones dañan el subsuelo y las aguas subterráneas.

Según Barradas, (2009) la prevención consiste en evitar estrictamente la generación de residuos tanto cualitativamente, a través de la eliminación virtual de las sustancias peligrosas, y cuantitativamente, a través de la reducción de los materiales o la energía en la producción, consumo y distribución de los artículos.

Si los residuos constituyen un grave problema es evidente que el mejor residuo, el más deseable, es el que no existe; evitar su generación debe, pues, constituir la primera y más importante prioridad de cualquier política ambiental avanzada y ambiciosa. (Montes, 2008)

Según Esquer, (2009) los tratamientos de residuos sólidos se realizan como una alternativa de la disposición final. A continuación se muestran los métodos que se llevan a cabo para la gestión de residuos sólidos:

Procesos físicos: separación (manual, mecanizada o magnética), trituración, compactación.

Procesos químicos: hidrólisis, oxidación, vitrificación, polimerización.

Procesos biológicos: composteo, digestión anaerobia.

Procesos de destrucción térmica: incineración, pirólisis, esterilización y microondas.

Recuperación de materiales o productos para reuso o reciclaje: separación (manual o mecanizada), pirólisis, vitrificación, compostaje.

Recuperación de energía: digestión anaerobia, pirólisis, incineración.

Destrucción de agentes infectocontagiosos: incineración, microondas, esterilización.

Dentro de los diferentes tratamientos se encuentra la molienda o reducción de tamaño, también conocida como trituración. Esta puede ser gruesa, media y fina, y pulverización; que a su vez, esta última se clasifica en fina y superfina. Para dividir las sustancias sólidas se utilizan cuatro métodos los cuales son: la compresión, corte y persecución para sustancias frágiles; el aplastamiento y abrasión para sustancias viscosas. (Rosabal y Valle, 1989).

Existe un número de tecnologías puestas en práctica para la valorización de los residuos sólidos, sobre todo en los países desarrollados. En particular, la “biometanización” (como fomento de iniciativas que permite la valorización energética de la materia orgánica), tuvo gran auge principalmente en países europeos, los que se propusieron incrementar su uso en un 5 % entre el año 2001 y el 2006 (Rodríguez, 2000).

Entre estas tecnologías se destacan las siguientes:

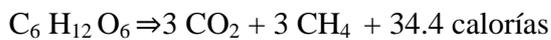
- ✓ Proceso DRANCO: se aplica a la conversión de diferentes tipos de residuos orgánicos. Se emplea para la degradación de fracción orgánica de los residuos sólidos (Brummeler, *et.al.*, 1992; Six y De Baere, 1992). La dificultad encontrada en este proceso es la aún baja conversión del material orgánico (Chamy, *et.al.* 1994; Gijzen, 1995).
- ✓ Proceso BTA: incluye el pretratamiento de los residuos por medios mecánicos, térmicos y químicos. Aplicado a residuos sólidos urbanos, desechos biológicos comerciales y residuos sólidos comerciales (Chamy, *et.al.* 1994; Verstraete, *et.al.* 1997).
- ✓ Proceso VALORGA: formado por una unidad automatizada de selección, seguida de una unidad de producción de metano (a partir de la fracción orgánica remanente) y una final de

refinado. Opera a una alta concentración de sólidos (35 %) y tiempo de residencia superior a las tres semanas (Chamy, *et.al.* 1994).

Cabe destacar que el biogás es una de las alternativas de gestión de residuos que en la actualidad se emplea en gran parte del mundo y específicamente en los países subdesarrollados se desarrolla con intensidad por los beneficios económicos, sociales y ambientales que reporta su uso.

1.4. Biogás. Su obtención y aplicación.

Según Montes, (2008) el biogás es una mezcla gaseosa que se obtiene de la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas y cuyos principales componentes son el metano (55-65%) y el anhídrido carbónico (35-45%) y en menor proporción, nitrógeno, (0-3%), hidrógeno (0-1%), oxígeno (0-1%) y sulfuro de hidrógeno (trazas) que se producen como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire por la acción de un microorganismo.



El biogás del digestor (debido al metano) posee un poder calorífico aproximado de 4.500 a 5.600 kcal/m³. El poder calorífico del biogás está determinado por la concentración de metano (8,500 kcal/m³), pudiéndose aumentar eliminando todo o parte del CO₂ presente en el biogás. La producción total de gas depende fundamentalmente de la cantidad de alimento consumido por las bacterias o, dicho de otra forma, de la cantidad de sustrato eliminado en el proceso. Dicho sustrato suele expresarse normalmente por la demanda de oxígeno (normalmente DQO), y por los sólidos volátiles. (Montes, 2008).

Según Eckenfelder citado por Montes, (2008) los valores máximos de la producción de gas por fango de la Estación Depuradora de Aguas Residuales son:

1-1.25 m³/kg SV destruidos

0.30-0.42 m³ CH₄/kg DQO destruidos

Según los autores Infante y Zárate de Lara, (1997); Hernández, (2001) la producción de gas, en condiciones normales de funcionamiento de un digestor, debe oscilar entre 0.44 y 0.75 m³ por cada kilogramo de materia volátil destruida.

También la producción del biogás puede ser estimada a partir de una base per cápita, según Metcalf, (2003), el rendimiento normal es de 15 a 22 m³/103 hab•día en depuradoras con tratamiento primario. En depuradoras con tratamiento secundario la producción se incrementa cerca de 28 m³/103 hab •día. En la tabla 1.1 (Anexo 3) muestra algunas fuentes de biogás.

1.4.1. Aplicación de la producción de biogás en Cuba y en Matanzas.

La tecnología del biogás fue introducida en Cuba a principios de 1940 en una fábrica de cerveza del Cotorro, en La Habana; y un programa para introducción de esta tecnología fue iniciado por el movimiento nacional de biogás en 1990. En el siglo XXI se cuenta con unas 500 instalaciones de biogás, principalmente con diseños chinos e hindúes (Suárez y Beatón, 2007). La mayor planta de biogás en Cuba está localizada en la destilería Heriberto Duquesne, en la ciudad de Remedios, provincia de Villa Clara (González, 2007). En la Ciudad de La Habana hay un total de 13 plantas de biogás en funcionamiento, las cuales tienen gran impacto social y ambiental. Se construyó también el primer relleno sanitario, pues los desechos sólidos urbanos constituyen también una vía de contaminación en el mundo. En la provincia de Las Tunas existen 49 digestores de biogás, de ellos 23 estaban en funcionamiento, y se piensa echar a funcionar los que están parados, además de la construcción de varios digestores más (Díaz, et.al., 2006). En la provincia de Matanzas hay un total de 181 plantas de biogás, de ellas 19 plantas pertenecen al sector estatal y 162 plantas al sector privado (ARINSEMA, 2004). En las figuras 1.5, 1.6 y 1.7 (Anexo 4) se observan diferentes biodigestores construidos en varios lugares de la provincia. En la provincia de Sancti Spíritus actualmente se cuenta con un total de 6 plantas en el sector privado y estatal con diferentes diseños (Savran, 2006). En la provincia de Santiago de Cuba en el 2006 existían 13 digestores, la mayoría particulares, y en la actualidad se trabaja en la construcción de otros, como la edificación de un biodigestor chino en El Brujo, con estiércol porcino. Además, se está llevando a cabo un proyecto de construcción de un relleno sanitario en el Distrito José Martí.

En la provincia de Pinar del Río se realizaron adaptaciones de esta fuente de energía a las lámparas para el alumbrado. Otra de las experiencias desarrolladas consiste en la soldadura de metales a partir del biogás producido en instalaciones donde la presión es baja. También en el municipio de Consolación del Sur se han completado diseños y fabricaciones de quemadores muy eficientes concebidos para trabajar con biogás. (Suárez, 2012).

En el municipio especial Isla de la Juventud proyecta la construcción de dos plantas de biogás en instalaciones estatales y fomenta su generalización entre quienes se dedican a la cría porcina. (Torres, 2012).

Otras aplicaciones

Un metro cúbico de biogás totalmente combustionado es suficiente para:

- ✓ Generar 1.25 kW/h de electricidad.
- ✓ Generar 6 horas de luz equivalente a un bombillo de 60 watt.
- ✓ Poner a funcionar un refrigerador de 1 m³ de capacidad durante 1 hora.
- ✓ Hacer funcionar una incubadora de 1 m³ de capacidad durante 30 minutos.
- ✓ Hacer funcionar un motor de 1 HP durante 2 horas.

Utilización del biogás como combustible en motogeneradores:

- ✓ Motores con combustible dual.
- ✓ Motores especiales para biogás (incluyen el pretratamiento del gas).

Utilización del biogás en pilas de combustible:

- ✓ Generación de electricidad.
- ✓ Calor generado por la pila => fermentación: Requieren un biogás con al menos 60% de metano.

1.5. Residuos de jardinería. Composición química y tratamientos

La jardinería es el arte y la práctica de cultivar los jardines. Consiste en cultivar, tanto en un espacio abierto como cerrado: flores (arriates), árboles, hortalizas o verduras (huertas), ya sea por estética, por gusto o para la alimentación y en cuya consecución el objetivo económico es algo secundario. (Espinosa, 2011)

El término "jardín" conocido desde el siglo XII, parece provenir del compuesto latino-germánico *hortus gardinus* que significa, literalmente, "jardín rodeado de una valla", del latín *hortus*, jardín *fráncico* o *gart* o *gardo* "cerrado", como si el jardín tuviera que defenderse contra los animales e incluso de los ladrones.

El término "jardinería" se conoce desde finales del siglo XIII (con él se designaba el conjunto de los jardines. Se emplea, especialmente, para el uso, goce y consumición de los particulares mientras que el término horticultura designa la actividad profesional dedicada a la producción de frutos, flores, legumbres y otros productos vegetales. Sus principales denominaciones son: la horticultura para las legumbres, arboricultura para los frutos, floricultura para las flores y el vivero para los árboles y arbustos.

La autora refiere que la jardinería se define como el arte para sembrar plantas, verduras, árboles, flores, ya sea para la atracción y disfrute de su belleza como para la alimentación.

1.5.1. Composición química de las plantas

Hay dos tipos de nutrientes: los macronutrientes, necesarios en grandes cantidad, y los micronutrientes, necesarios en cantidades pequeñas. Los tres grandes: nitrógeno, fósforo y potasio, representan juntos más del 75% de los nutrientes minerales que se encuentran en la planta. A continuación se muestra la tabla 1.2 con los elementos químicos que existen en cada tipo de nutrientes.

Tabla 1.2: Tipos de nutrientes con su composición química que existe en una planta.

Tipo de nutrientes	Composición química
Macronutrientes	Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Azufre (S)
Micronutrientes	Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Zinc (Zn) Cobre (Cu), Boro (B), Cloro (Cl), Molibdeno (Mo)

Fuente: Espinosa, 2011

Grandes volúmenes de follaje en la actualidad son considerados residuos y que contienen una gama de sustancias significativamente complejas y ricas en componentes con actividad biológica, que podrían ser utilizados en la obtención de productos para la medicina y la alimentación animal. Estos residuos que se acumulan en el bosque después del aprovechamiento forestal ocasionan un importante impacto ambiental, al crear un medio favorable para la propagación de plagas y enfermedades dañinas tanto a la flora como a la fauna, además de ser un material combustible con riesgo en la aparición y propagación de incendios; sin embargo la utilización de estos residuos para la obtención de productos con actividad biológica, proporciona beneficios económicos, sociales y ambientales.

El estudio de la caracterización química del follaje verde brinda una información de la composición química de esta materia prima con perspectiva industrial.

Para este estudio algunos autores dividen las sustancias químicas contenidas en el follaje en diferentes grupos: proteínas, carbohidratos, lípidos, compuestos fenólicos, vitaminas, ácidos orgánicos y sustancias minerales (Polis, 1986; Yagodin, 1981).

La clasificación química de las sustancias extraíbles con actividad biológica presentes en el follaje fue realizada por Yagodin y Antonov, (1989) dividiendo estas en tres grandes grupos:

sustancias solubles en solventes de baja polaridad, sustancias solubles en agua a 95°C y sustancias poco solubles en solventes de baja polaridad y agua a 95°C.

Las sustancias extraíbles en solventes de baja polaridad varían en cuanto a su cantidad y composición, según el disolvente que se utilice para su extracción. La fracción lipídica obtenida cuando se utiliza bencina como disolvente ha demostrado la presencia de aceites esenciales, pigmentos verdes (clorofila, feofitina, clorofilida, feoforbidas), carotenoides (β -caroteno, α -caroteno, luteína), vitaminas liposolubles (vitaminas D, E, K y F), lípidos neutrales (hidrocarburos, alcoholes, aldehídos, cetonas, ácidos grasos saturados y no saturados, ceras, ácidos resinosos, esterinas esenciales, glicéridos, fosfolípidos, glicolípidos (fitoglicolípidos, β -sitosterina) y sustancias minerales según Yagodin, (1989b); Voipio, (1990); Buell y Gerard, (1994); Díaz, (1998).

Las sustancias solubles en agua a 95°C están compuestas por vitaminas hidrosolubles, taninos, fenoles, flavonoides, sustancias nitrogenadas, carbohidratos y sustancias minerales (Yagodin, 1989b). Los componentes de la pared celular están representados por la celulosa, la lignina y las hemicelulosas.

Los aceites esenciales son el concentrado de compuestos orgánicos con aroma presentes en las hojas, flores, semillas, corteza y raíz de las plantas. Ellos se evaporan al contacto con el aire y son conocidos también como aceites volátiles, tienen un olor muy fuerte y generalmente, mejor olor en disolución (Ciesla, 1998). Los aceites esenciales de los árboles son obtenidos comúnmente por un proceso de destilación a vapor, aplicado a la resina, a la madera o follaje y a las ramas terminales.

Los carotenoides constituyen uno de los grupos más importantes de pigmentos naturales. Son tetraterpenos compuestos de 40 átomos de carbono, formados por la condensación de ocho unidades de isopreno. Ellos incluyen hidrocarburos (carotenos), así como sus derivados oxigenados (xantofilas) (Meller, 1967). Los más abundantes son el β -caroteno y sus productos de oxidación: luteína, violaxantina y neoxantina, los que presentan una absorción muy intensa en la región azul del espectro (Guardiola y García, 1995). Los carotenoides de las hojas se encuentran junto con los pigmentos verdes plastidios-cloroplastos, en las plantas el representante más abundante es el β -caroteno. Su contenido en el follaje de *Pinus silvestris* es de 17,5 mg/% y en abeto (*Picea abies*) 15 mg/% (Polis, 1986); valores semejantes para *P. caribaea* Morelet de 18,5 mg/% y *P. tropicalis* Morelet de 11,7mg/% fueron planteados por Díaz, (1998).

Los lípidos neutrales incluyen los hidrocarburos, éteres, ceras, glicéridos, alcoholes grasos superiores, aldehídos, cetonas, quinonas, ácidos resinosos y otros.

Las ceras del follaje de *Picea abies* (abeto) son ésteres compuestos de ácidos palmítico, oxipalmítico y esteáricos y de los alcoholes: cetílicos y cerílicos. En forma de ésteres se han encontrado los ácidos abiéticos y oleico y también esterinas (Solodki y Agranat, citados por Yagodin, 1981).

Dentro del grupo de sustancias extraíbles en agua a 95°C se encuentran: el ácido ascórbico (Vitamina C), su contenido en el follaje de pino es (150 - 250 mg/%) según Yagodin, (1981), la tiamina con un contenido de 1,9 mg/% en pino y 0,8 mg/% en *Picea abies* (abeto) (Fragina, y Chermomorsky, 1969). El follaje de pino contiene 0,5 mg y el de abeto 0,7 mg en 100 g de masa seca de riboflavina (vitamina B2)

Los compuestos fenólicos son el grupo de sustancias aromáticas que contienen hidroxifenol libre o enlazado y que se encuentran fundamentalmente en el reino vegetal. Ellos se dividen en benzoles monoxiderivados y dioxiderivados del tipo pirocatecol, hidroquinona y resorcinol. Dentro de los trioxiderivados se encuentran los compuestos del tipo pirogalol y muy escaso del tipo oxihidroquinona.

Las sustancias tánicas son fenoles que se clasifican en dos grupos en dependencia de su composición química: taninos hidrolizables y taninos no hidrolizables o condensados (Pan, 1995). Los primeros son glicósidos del ácido digálico.

Los galotaninos son ésteres del ácido gálico o de su dímero, el ácido elágico, que son los más importantes dentro de este grupo. (Marmer, 1996). Ellos pueden ser hidrolizados por ácidos, bases o enzimas.

Los taninos del segundo grupo son considerados derivados del catecol, pueden formar polímeros y estar condensados, por lo que no son hidrolizables, generalmente son compuestos de alta masa molecular y contienen un número suficientemente alto de grupos hidroxilos capaces de formar uniones efectivas entre proteínas y otras macromoléculas.

En las hojas de *E. camaldulensis*, *E. globulus* y *E. rudis* han sido estudiado los polifenoles, el aldehído fenólico, vainillina, el ácido fenólico, protocatequinas y ácido elágico, algunos glicósidos flavonoles, algunos elagitaninos, flavonoides y flavononas fueron identificados por Conde, *et.al.*, (1997).

Los contenidos de celulosa de la madera de latifolias son del 40 - 60 %, mientras que los de las coníferas son 40 – 45%. En el follaje de *Pinus caribaea* Morelet antes de ser extraído es de 21,03% y después del tratamiento con bencina es de 21,11 - 21,50% (Díaz, 1998).

1.5.2. Tratamientos para los residuos de jardinería.

En algunas ecoconstrucciones, que generan por sí mismas el agua y sus residuos, las cubiertas vegetales han sido creadas. Este principio es lo más próximo al de una máquina viviente (Espinosa, 2011), la cual descansa sobre:

- ✓ La reproducción de residuos (abono o aguas residuales).
- ✓ Su transformación (por ejemplo en un abonador, una fosa séptica o aseos secos).
- ✓ Su esparcimiento por el suelo.
- ✓ El caldo de cultivo sobre ese mismo suelo.
- ✓ La recogida de productos que, tras su consumo, generan el abono y aguas residuales.

La pared de cultivo es una variación poco habitual de una máquina viviente y convertida en un jardín vertical; el agua resbala por una superficie sobre la cual se desarrolla el musgo y otras plantas, algunos insectos y bacterias, al final de la pared se forma un charco que vuelve a reinyectarse ascendiendo por la pared. Este tipo de jardín es perfecto para el interior de las habitaciones, ayuda a reducir el estrés de la vida en las zonas urbanas o sirve para aumentar el contenido en oxígeno en la atmósfera reciclada. Otros jardines de interior forman parte de los sistemas de calefacción o de aire acondicionado. La pared de cultivo o pared viva forma parte de lo que se denomina jardinería urbana. (Espinosa, 2011)

El compostaje es otro de los tratamientos que se le realizan a los residuos de jardinería y como resultado se obtiene compost: capaz de aumentar la calidad de nuestros suelos, especialmente de aquellos que han perdido fertilidad debido a los sistemas de agricultura intensiva. (Dirección General del Medio Ambiente, 2000)

1.6. Conclusiones parciales del capítulo.

1. Las fuentes renovables constituyen un gran paso de avance en la protección y conservación del medio ambiente.
2. La digestión anaerobia constituye el fundamento teórico práctico para la obtención de biogás a partir de diferentes fuentes de sustratos, el cual resulta una opción viable como fuente para generar energía.

3. El diseño del reactor anaerobio comprende dos enfoques, los cuales se basan en métodos empíricos y cinéticos.
4. Los métodos empíricos incluye el método de la carga y el método de reducción de volumen.
5. Los métodos basados en criterios cinéticos comprende: cálculos relacionados con el tiempo de retención, volumen del biodigestor, volumen de gas producido y requerimientos de nutrientes.
6. La gestión eficiente de residuos minimiza la contaminación ambiental, recicla o reutiliza los desechos y conlleva a un efecto económico, social y ambiental considerable.
7. Los residuos de jardinería son biodegradables y su composición contribuye a la actividad biológica.

Capítulo 2: Materiales y métodos

La metodología de investigación responde al siguiente diseño metodológico.

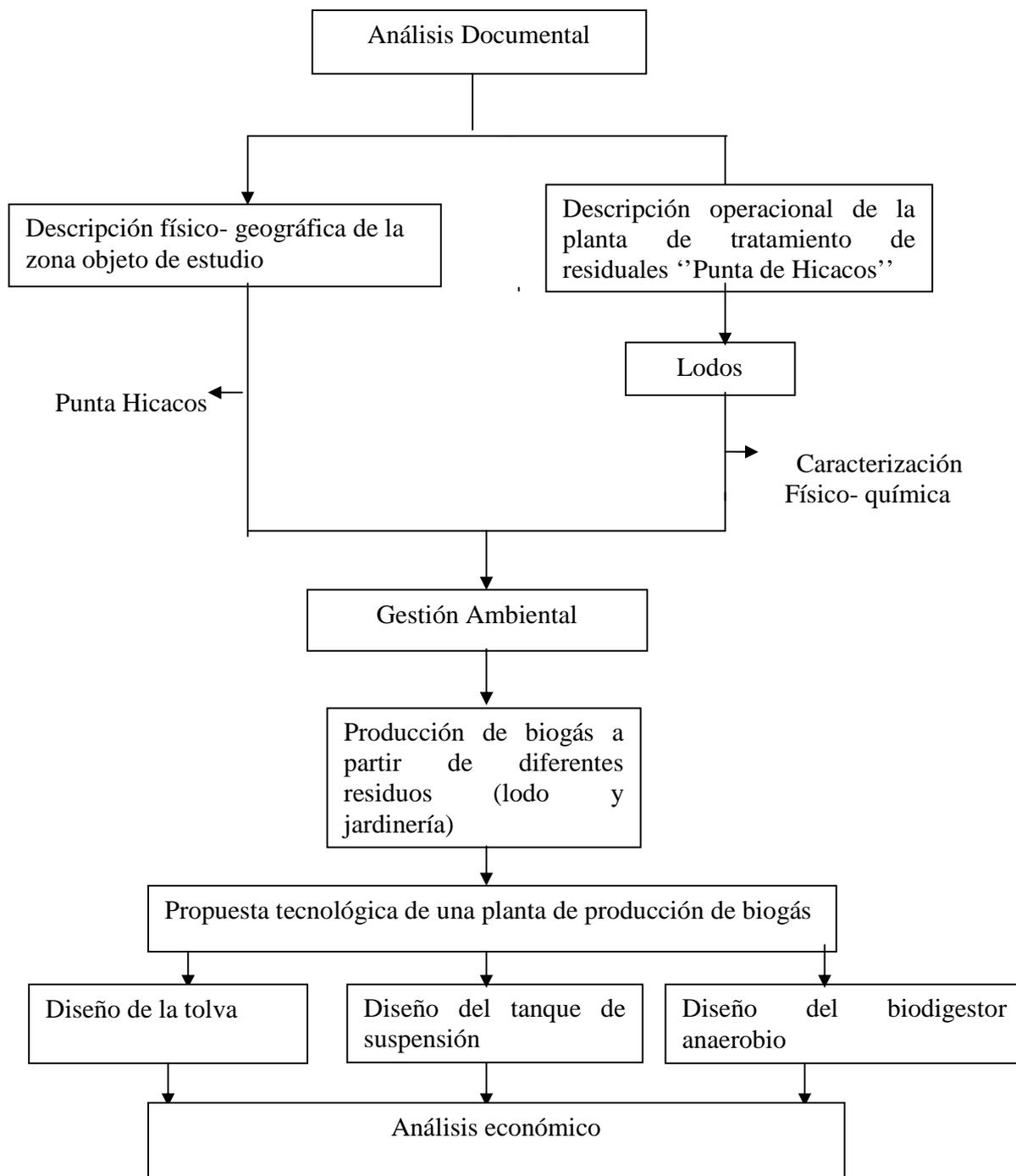


Figura 2.1. Esquema metodológico de la investigación.

Fuente: Elaboración Propia

2.1. Análisis documental

Se consultan las siguientes fuentes bibliográficas por su vínculo directo con la temática que se trata:

Tesis en opción al título académico de Máster de la Licenciada Magaly Caridad Domínguez González, (2001) con el título ‘‘Influencia de la zeolita en el período de arrancada de la digestión anaerobia’’.

Los estudios realizados por José Venancio Sánchez, (2005) con el título ‘‘ Introducción a la producción de biogás’’.

Ley 81 del Medio Ambiente, (1997).

Tesis de la Ingeniera Mariela Alfonso Sanabria, (2008), la cual se titula ‘‘ Digestión anaerobia, la tecnología del biogás.

2.2. Descripción de la zona objeto de estudio

La zona Punta de Hicacos se caracteriza por tener paisajes jóvenes, inestables, frágiles y susceptibles ante los impactos humanos. Los paisajes son:

Playa arenosa: ancho de 15- 18 m; esta a su vez se divide en dos subunidades, la primera es la granja de sol que carece de vegetación. Las arenas son de color beige crema y con una granulometría muy fina. La otra subunidad es la berma, cuya superficie contiene vegetación rastrera y herbácea, en la que se destacan el boniato de playa, arroz de playa y el guizazo.

Dunas arenosas: tienen una altitud de 3-6 m donde se desarrollan la uva cal y casuarina.

Llanuras litorales: altitud de 1.5- 2 m. Se conservan especies como Cardenal, Roble blanco, Majagua, Caoba africana y Framboyán (González, 2005).

La playa está formada por algas calcáreas, moluscos y foraminíferos, que son transportados hacia la costa por las olas y corrientes. (Díaz, 2008)

La temperatura media anual del aire que caracteriza a esta zona es de 25.6 °C, los meses de enero y febrero se destacan por ser los de menor valor (21.5 °C), julio y agosto como los más cálidos con 31.2 °C. (Díaz, 2008)

La precipitación media hiperanual entre los 800 y 1000 mm, la distribución temporal se enmarca en dos períodos, uno lluvioso de mediados de mayo a mediados de octubre (600-800 mm) y otro poco lluvioso (inferiores a 200 mm) en los meses restantes. El mes más lluvioso es junio con un promedio histórico próximo a 150 mm, seguido por septiembre, octubre y mayo y las menores precipitaciones se registran normalmente en febrero y marzo. (González, 2005)

Dadas las condiciones marítimas del territorio, el contenido de humedad del aire es elevado durante todo el año. Entre los meses de junio a diciembre, normalmente la humedad relativa es superior a 80% y en los meses de febrero a abril experimentan un ligero descenso. Esta humedad elevada, acompañada de temperatura altas efectos indeseables que afectan en ocasiones sobre todo en el verano.

La cantidad de horas de sol tanto en el horario de la mañana como en la tarde tiene poca diferencia, las mayores son de solo 42 min. En marzo y febrero es de 36 min, por lo que la disponibilidad diaria de luz solar se mantiene casi constante durante todo el día. La insolación media anual es de 8h/sol con mayor duración en marzo y abril y la más baja en diciembre (6.5h/sol). (González, 2005)

En la actualidad los hoteles ubicados en esa zona vierten el mayor volumen de aguas residuales al mar después de tratadas; pero es importante controlar si en todos los casos se alcanza la calidad requerida para evitar el deterioro de la playa. Por tanto se trabaja en la evaluación del funcionamiento de los sistemas de tratamiento ubicados en esa zona como vía para evitar la contaminación de la playa, proteger el medio ambiente y preservar los recursos humanos. Dentro de los tratamientos se encuentra lodos activados en las diferentes plantas (González, 2005):

- ✓ EDARs Sol Palmeras
- ✓ EDARs Taínos I
- ✓ EDARs Hicacos

A la planta de tratamiento de Hicacos los hoteles que tributan son: Sirenes (Mangón) con la nomenclatura de (estación seis), Barceló (estación cinco), Princesa y Playa Alameda (estación cuatro), Trip Península (estación tres).

2.3. Descripción de la planta ‘Punta Hicacos’.

Según Álvarez, (2009) la planta ‘Punta Hicacos’ está diseñada para una capacidad total de 4335 m³/d con una carga de contaminantes equivalente a la aportada por una población de 33150 habitantes y se espera que la misma tenga una eficiencia de 92%. Los lodos extraídos del decantador son conducidos hacia el espesador de lodos con el objetivo de reducir los volúmenes de líquido en el mismo, aumentando la concentración de lodos a valores del 3 %. Los lodos extraídos del espesador se conducen a los lechos de secado y el efluente líquido se recircula al sistema. El esquema se muestra en la figura 2.2 (Anexo 5).

La caracterización físico- química del lodo fue extraída de el estudio realizado por Álvarez, (2009), donde los resultados se muestran en la tabla 2.1 (Anexo 6).

2.4. Diseño experimental

La experimentación se lleva a cabo en el laboratorio del Centro de Estudios de Medio Ambiente y Energía (CEMAE) en la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”.

El montaje de los experimentos se realiza a partir del método conocido como probeta invertida elaborado por Jiménez, *et.al*, (2004); el cual consiste en varios frascos de vidrio de capacidad dos litros que realizan la función de reactores anaerobios. En ellos se adicionan varias cantidades de lodo, residuo de jardinería y 400 mL del inóculo. El Metano (CH₄) y Dióxido de Carbono (CO₂) producidos se transfieren hacia diferentes kitsatos, los cuales contienen en su interior 400 mL de disolución de Hidróxido de Sodio (Na OH). Seguidamente, el CH₄ libre de otros compuestos, se traslada a una probeta invertida ubicada en una bandeja con agua a temperatura ambiente. El desplazamiento de la columna de agua equivale a la cantidad de CH₄ producido.

Los residuos a utilizar en la investigación reciben una preparación previa.

Los residuos de jardinería responden a la vegetación conformada por diferentes plantas como Cardenal, Roble blanco, Majagua, Caoba africana y Framboyán, la cual se caracteriza por:

1. Cardenal o científicamente *Phyllocarpus Septentrionalis* Donn y Smitch. Según Betancourt, (2000) es un árbol de tamaño mediano a grande, puede alcanzar de 25 a 90 cm de diámetro. Copa irregular y abierta, corteza gris blanquecina, más bien lisa, aunque con ligeras rugosidades. Ramas finas, algo puberulentas. Hojas compuestas, paripinnadas, con anchas estípulas y de 4-6 pares de folíolos opuestos. La hojas miden entre 16 y 25 cm de largo, pecíolos de 2 a 2.5 cm, los folíolos tienen entre 5 y 8 cm de longitud y de 2.5 a 3.5 cm de ancho. Flores rojas, fragantes, inflorescencias en pequeños racimos de pocas flores. Los frutos son legumbres aplastadas y delgadas, de 10 a 18 cm de largo y aproximadamente 4 cm de ancho. Se puede encontrar en la Estación Experimental Forestal de Villa Clara, un ejemplar midió 24 m de alto y 81 cm de diámetro. Para Rankin, (2005) pertenece a la subclase Rosidae, donde en su composición química abundan taninos, aceites esenciales y existen menos alcaloides y saponinas.
2. Caoba africana (*Khaya Senegalensis* Juss): en Cuba se denomina Caoba africana y Caoba de Senegal. Para Betancourt, (2000) es un árbol deciduo o semideciduo, de tamaño mediano o grande. Puede tener hasta 40 m de altura y 1.5 m de diámetro. Crece espaciado en lugares

secos, los fustes son cortos y ramificados a pocos metros del suelo, pero en suelos fértiles y con competencia lateral, son bastantes rectos y libres de ramas hasta considerable altura. Tienen contrafuertes en la base del tronco, ramas gruesas y copa irregular; corteza lisa en la parte inferior del tronco. Hojas compuestas, paripinnadas, de 20 a 50 cm de longitud. Inflorescencia en panículas cimosas, grandes; flores unisexuales, pero con algunos vestigios de sexo opuesto y pequeña diferencia externa entre los sexos, Los frutos son cápsulas globosas, leñosas. La semillas son romboideas y estrechamente aladas, cada fruto contiene 24 o más semillas. Se puede hacer uso de su presencia en la Estación Forestal de Artemisa, en el Vivero Simón Bolívar, de Rancho Boyeros, Ciudad de la Habana, en la Estación Experimental Forestal de Camagüey. También según Rankin, (2005) pertenece a la subclase Rosidae, donde en su composición química abundan taninos, aceites esenciales y existen menos alcaloides y saponinas.

3. Framboyán (*Delonix Regia*): es un árbol de grandes legumbres negras semejantes a vainas de machete; de 4 a 6 dm de largo y 5 a 7 cm de ancho, es ramoso que alcanza hasta 12 m de altura y un diámetro de 9 dm; corteza delgada de color pardo grisáceo. Hojas bipennadas de 3 a 5 cm de largo. Flores grandes, vistosas en racimos. Su madera es casi blanca, floja y ligera. (Tomás, 1965). Es una de las plantas que se encuentra en la subclase Rosidae, donde en su composición química abundan taninos, aceites esenciales y existen menos alcaloides y saponinas.
4. Roble blanco o *T. angustata*: árbol de hasta 12 m, ramitas lepidotas, pecíolo delgado, de 5-13 cm. Flores en grupos terminales, pedicelos cortos; cáliz 2- labiado; de 12-16 mm, pardo. Se ubican en bosques y ríos, principalmente en La Habana, Pinar del Río. Según Rankin, (2005) pertenece a la subclase Asteridae, donde abundan aceites esenciales y alcaloides (no isoquinolínicos), pocas betalaínas y glucósidos.
5. Majagua o *Talipariti elatum*: árbol menor de 25 cm de alto, con tronco menor a 1 m de diámetro. Corteza agrietada, grisácea. Ramas jóvenes pubérulas por diminutos tricomas estrellados. Hojas con pecíolo de 5-18 cm de largo. Inflorescencias axilares unifloras, comúnmente agrupadas cerca del ápice de las ramas. Pétalos recurvados, de 6-12 x 1.8-3.5 cm, amarillos a rojos con mancha basal rojo púrpuras. Columna estaminal de 4-10 cm de largo. Se distribuyen en la zona Occidental (Pinar del Río, San Antonio de los Baños, Lomas de Canoa); zona Central (Cayo Coco, Ciego de Ávila; la Gloria, Navarro, Monte de

California) y en la zona Oriental (entre los Altos de Naranjo y Pico Palma Mocha, Santiago de Cuba, Guantánamo). (Areces y Fryxell, 2007). Dentro de los compuestos químicos contiene aceites mostazas, taninos y alcoloides en el tallo y trazas en las hojas. (Rankin, 2005; Areces y Fryxell, 2007).

Estas plantas forman parte de los residuos de jardinería en Varadero y de zonas aledañas como Santa Marta y Matanzas.

Las muestras de residuos de jardinería fueron sometidas a un proceso de molienda hasta un tamaño de partícula de 2 mm.

Se utiliza el diseño factorial 3^2 , siendo las variables a evaluar: cantidad de lodo, cantidad de residuo de jardinería, ambas a tres niveles 275, 550, 825 y se prepara el inóculo, el cual consta de 400 mL de mezcla de excreta de cerdo con la de ganado vacuno para dos proporciones: 75% de excreta de ganado vacuno (GV) y 25% de cerdo (C) y 25% de excreta de ganado vacuno y 75% de cerdo. Se obtiene un total de 9 corridas experimentales por cada condición.

Los resultados de la experimentación se someten a un análisis de optimización mediante el uso del programa computacional (Excel, 2007).

Además de estos niveles se realizaron las pruebas sin adición de residuo de jardinería.

2.5. Análisis físico- químicos de las muestras.

El análisis físico- químico de las muestras para cada experimentos fue realizado según el Standard Methods of Examination of Water and Wastewater.

Las determinaciones analíticas y los métodos empleados son los siguientes:

- ✓ Demanda química de Oxígeno: Método Volumétrico Redox. Oxidación de la muestra con Dicromato de Potasio en medio ácido, valoración por retroceso con sal de Mohr.
- ✓ Sólidos Totales: Gravimetría por volatilización. La muestra se mantiene en baño María a 100 °C y posteriormente en la estufa durante una hora a temperatura de 103-105 °C. Se determinó la masa resultante después del tratamiento térmico en balanza analítica Sartorius BP 615, Alemania.
- ✓ Sólidos Totales Fijos: La muestra resultante de la determinación anterior se somete a tratamiento térmico en mufla por 15 minutos a una temperatura de 550 °C y se determina la masa en balanza analítica Sartorius BP 615, Alemania.
- ✓ Sólidos Totales Volátiles: se determinó mediante la diferencia entre sólidos totales y sólidos totales fijos.

- ✓ pH: se determina por método Potenciométrico, donde se utilizó un pHmetro HANNA, para lecturas de 0.1 unidades, con electrodo de vidrio e intervalo de temperatura hasta 80 °C.

2.6. Propuesta tecnológica de la planta de producción de biogás a partir de residuos de jardinería, lodo y utilizando como inóculo mezcla de excreta de ganado vacuno y cerdo.

El proceso será discontinuo. El montaje de la planta será en la planta de tratamiento de residuales ‘Punta Hicacos’ en Varadero Matanzas.

Para la realización de la propuesta tecnológica de los equipos que conforman la planta se utiliza las heurísticas referidas por Walas, (2000), también se tienen en cuenta aspectos para la selección de un biodigestor según Sánchez, (2005) y criterios de otros autores como Rosabal, (1989) y MC. Cabe, (1986). El proceso conlleva diferentes etapas:

- ✓ preparación del sustrato,
- ✓ preparación del inóculo,
- ✓ digestión anaerobia en la cual la materia orgánica se degrada en ausencia de oxígeno libre y se forman compuestos más simples como metano y dióxido de carbono,
- ✓ almacenaje

2.6.1. Diseño de la tolva

Para el cálculo de la tolva (m³) se llevó a cabo la metodología propuesta por Rosabal, (1989); donde su volumen se determina por:

$$V_t = \frac{m}{\rho} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Donde:

m: masa del residuo, kg

ρ : densidad aparente del residuo, kg/m³

Consideraciones para desarrollar los cálculos:

- ✓ En el volumen de la tolva se considera un sobrediseño de 15%
- ✓ Altura del cilindro igual a su diámetro
- ✓ Altura del cono igual a su radio
- ✓ El diámetro inferior del cono se fija a 1 m.

Para determinar el volumen de la parte cónica se le resta al cono completo el cono del extremo.

$$V_t = V_{\text{cilindro}} + V_{\text{cono}} \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

$$V_t = \left(\frac{\pi * D^2 * H}{4} \right) + \left(\frac{\pi * (R^3 - r^3)}{3} \right) \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

Donde:

R: radio exterior, m

H: altura, m

r: radio inferior del cono, m

2.6.2. Diseño del tanque para la suspensión de los residuos.

La metodología aplicada para calcular las dimensiones del tanque es la propuesta por Mc Cabe, (1986). En este método se necesita determinar si se puede mantener la suspensión en el tanque para lo cual se sigue el criterio donde se plantea que la velocidad de sedimentación libre debe ser inferior a 3 m/min y la fracción en volumen de sólidos menor que un 30%.

$$K = D_{pRJ} * \left[\frac{g * DEN_a * (DEN_{RJ} - DEN_a)}{\mu_a^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Donde:

D_{pRJ} : diámetro de partícula del residuo de jardinería, m

g: gravedad, m/s^2

DEN_a : densidad del agua residual (lodo), kg/m^3

DEN_{RJ} : densidad del residuo de jardinería, kg/m^3

μ_a : viscosidad del agua residual (lodo), Pa.s

Si el valor de K obtenido se encuentra entre 3.33 y 43.6, entonces para determinar la velocidad de sedimentación libre se emplea la ecuación siguiente:

$$\mu_t = \frac{0.153 * g^{0.71} * D_{pRJ}^{1.14} * (DEN_{RJ} - DEN_a)^{0.71}}{DEN_a^{0.29} * \mu_a^{0.43}} \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Si la μ_t es menor que 3m/min; entonces la fracción volumen del sólido se calcula de la siguiente forma:

$$F_v = \frac{x * DEN_a}{DEN_{RJ} - (DEN_{RJ} - DEN_a) * x} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

Donde:

x: fracción másica de sólido en la suspensión

$$x = \frac{m_{RJ}}{m_{total}} \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

Si es posible mantener la suspensión del tanque se procede al cálculo de las dimensiones del tanque.

Cálculo de las dimensiones del tanque

$$Vl = Va + VRJ \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Donde:

Va: volumen del agua residual, m³

VRJ: volumen del residuo de jardinería, m³

Vl: volumen de líquido, m³

Para un sobrediseño que represente un 85%, $Vl = 0.85Vt$ por tanto:

$$Vt = \frac{Vl}{0.85} \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

Se asume que:

H= D

$$Vt = \left(\frac{\pi * D^2}{4} \right) * H \quad (\text{Ecuación 2.10})$$

2.6.3. Diseño preliminar del biodigestor

El cálculo del volumen del biodigestor anaerobio se realizó por diferentes métodos:

1. Ecuación expresada por Menéndez y Pérez, (1991):

$$V = \theta * Q \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

Donde:

V: Volumen (m³)

θ : Tiempo de retención (días)

Q: Flujo volumétrico de lodo que entra al biodigestor o volumen de lodos a secar (m³/día); que según el Especialista de la planta de tratamiento de residuales "Punta de Hicacos es el 20% del volumen de lodos suspendidos producidos; que este último dato se recopiló de la tabla 2.2 (Anexo 7)

El tiempo de retención viene dado por la siguiente ecuación:

$$\theta = \left(\frac{\Delta S}{X * k} \right) * \left(\frac{S_0}{S} \right) \quad (\text{Ecuación 2.12})$$

Donde:

ΔS : $S_0 - S$ (mg/ L)

S_0 : DQO en el afluente al biodigestor, mg/ L

S: DQO en el efluente al biodigestor, mg/ L

X: Concentración de sólidos suspendidos volátiles del lodo en el biodigestor, mg/ L

k: Constante específica de remoción de sustrato (día^{-1})

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) del afluente fue información brindada por el Especialista de la planta de tratamiento de residuales "Punta Hicacos" Licenciado Javier Barroso.

La DQO del efluente se calculó por la ecuación:

$$\% \text{Eficiencia} = \frac{\Delta S}{S} \quad (\text{Ecuación 2.13})$$

Donde:

Eficiencia (%): La planta trabaja con una eficiencia de 92%, valor obtenido del manual de la planta elaborado por la Empresa de Investigación y Proyectos Hidráulicos, (1999).

La concentración de sólidos suspendidos volátiles del lodo se obtuvo de la tabla 2.3 (Anexo 8)

Según los autores Izquierdo y Menéndez, (1991) la constante específica de remoción puede variar entre 0.020 y 0.040.

2. Según el método propuesto por Izquierdo y Menéndez, (1991) el volumen se halla por la ecuación:

$$V = V_0 * \theta \quad (\text{Ecuación 2.14})$$

Tiempo de retención:

$$\theta = \frac{X_0 * Q}{V_0 * v} \quad (\text{Ecuación 2.15})$$

Donde:

X_0 : Sólidos suspendidos volátiles del agua de entrada (kg/m^3)

Q_0 : Caudal de agua residual de entrada ($\text{m}^3/\text{día}$)

V_0 : Volumen de lodos suspendidos producidos ($\text{m}^3/\text{día}$).

v : Carga de sólidos ($\text{kg SSV}/\text{m}^3 \text{ día}$)

El valor de los sólidos suspendidos volátiles del agua de entrada se busca en la tabla 2.3 (Anexo 8).

El flujo del agua residual de entrada es información brindada por el Especialista de la planta "Punta Hicacos".

El volumen de lodos suspendidos producidos se obtuvo de la tabla 2.2 (Anexo 7).

La carga de sólidos fue obtenida de la tabla 2.3 (Anexo 8).

3. Según el método propuesto por Sánchez, (2005); el volumen del biodigestor se calcula en función de la cantidad de inóculo empleado. La ecuación es la siguiente:

$$V = (Mkg \text{ inóculo} + Mkg \text{ agua}) * \Theta \quad (\text{Ecuación 2.16})$$

Donde:

Θ : Tiempo de retención (día); según Sánchez, (2005) igual a 40 días ya sea para las excretas de cerdo como para ganado vacuno. (Tabla 1.1, Anexo 3).

La masa de inóculo se determinó sumando número de cerdo por la masa de excreta húmeda diaria por cada cerdo más el número de vaca por la masa de excreta diaria por cada vaca. Se consideró un total de animales de 100, donde la relación cerdo- vaca fue de 2:1. Por tanto, para calcular la cantidad de estos dos tipos de animales se utilizó la ecuación lineal que se muestra a continuación:

$$2 * X + X = 100 \quad (\text{Ecuación 2.17})$$

2X: Cantidad de cerdos

X: Cantidad de vaca

La cantidad de agua en kg para una relación de cerdo- agua de 1:1 se iguala a la masa de cerdo. (Tabla 1.1, Anexo 3).

Los resultados del diseño se muestran en el capítulo 3 epígrafe 3.3.3.

2.6.3.1. Cálculo de las dimensiones del biodigestor cúpula fija

Se utilizó la metodología propuesta y aplicada por Sánchez, (2003), donde la misma consiste en analizar las diferentes figuras geométricas que conforman su cuerpo central, dividiéndose este en tres figuras básicas (Fig. 2.3):

- I. Cono inferior del cuerpo del biodigestor (fondo).
- II. Cilindro central (cilindro 1) del cuerpo del biodigestor y cilindro más pequeño situado encima de la cúpula (cilindro 2), llamado cuello del biodigestor.
- III. Cúpula superior situada entre el cilindro central del cuerpo de biodigestor y el cuello.

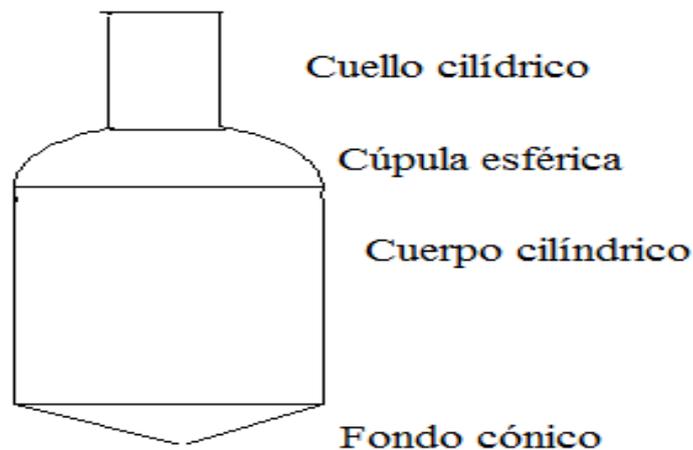


Figura 2.3. Esquema de las partes de biodigestor anaerobio con las figuras geométricas correspondientes.

Fuente: Elaboración propia.

El volumen total del biodigestor será:

$$V_{\text{Biodigestor}} = V_{\text{cono}} + V_{\text{cilindro1}} + V_{\text{cúpula}} + V_{\text{cilindro2}} \quad (\text{Ecuación 2.18})$$

Para determinar el volumen del cono se utilizó la siguiente ecuación:

$$V_{\text{cono}} = \frac{\pi * r^2}{3} * h \quad (\text{Ecuación 2.19})$$

Donde:

r: radio

h: altura

Para el cálculo de los volúmenes de los cilindros se empleó la fórmula:

$$V_{\text{cilindro}} = \frac{\pi * D^2}{4} * h \quad (\text{Ecuación 2.20})$$

Donde:

D: diámetro

h: altura

Para el cálculo del volumen de la cúpula se utilizó el siguiente procedimiento:

Se prolongó de forma imaginaria el cilindro 2 (cuello del biodigestor) hacia abajo, de modo que su base coincidiera con el extremo superior del cilindro central del cuerpo del digestor,

formándose así un cilindro 3, imaginario, que ocuparía la porción central del volumen de la cúpula y se calculó su volumen, ecuación 2.20

Se determinan las medidas de una de las secciones laterales del cilindro antes citado. El volumen a calcular corresponde aproximadamente a ¼ del volumen de la esfera que se forma al unir esta sección con la opuesta y cada una de las otras dos secciones restantes (por delante y por detrás del cilindro 3) también corresponderían aproximadamente a ¼ del volumen calculado para la supuesta esfera que se formaría; por tanto se utiliza la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{4} * V_{esfera} = \frac{1}{4} * \left(\frac{4}{3} * \pi * r^3 \right) \quad (\text{Ecuación 2.21})$$

Por lo que el volumen de estas 4 secciones conformarían el volumen total de la sección de la cúpula que se determina y sería aproximadamente:

$$V_{cúpula} = 4 * \left(\frac{1}{4} * V_{esfera} \right) + V_{cilindro3} \quad (\text{Ecuación 2.22})$$

Después de determinados todos estos volúmenes se procede al cálculo total del biodigestor. Los resultados se muestran en el capítulo 3 epígrafe 3.3.3.1.

2.6.3.2. Selección de los materiales del biodigestor cúpula fija.

La selección de los materiales se realizó por Sánchez, (2005), ya que hay un estudio para un biodigestor con volumen de 22.5 m³, se tuvo en cuenta las partes del mismo las cuales son:

- ✓ Cimentación loza cónica.
- ✓ Muro cilíndrico en mampostería de bloque o canto.
- ✓ Cúpula o domo esférico.
- ✓ Cuello.
- ✓ Tapas de concreto.
- ✓ Acabados: Repello de muros cilíndricos y cúpula e impermeabilización interna de la cúpula.

Los materiales a utilizar se expondrán en el capítulo 3 epígrafe 3.3.3.2

2.7. Análisis económico

2.7.1. Determinación del costo del biodigestor cúpula fija

El presupuesto preliminar del biodigestor ha sido elaborado atendiendo al Cálculo por el Método de los Precios Agrupados desarrollado por el Grupo de Economía de la Construcción de la EMPAI. El mismo ofrece un resultado acorde a los requerimientos de alcance y contenido para

las diferentes etapas del proyecto y tiene en cuenta todas las especificaciones planteadas en la Instrucción Presupuestaria del PRECONS II vigente, así como de la lista de costos del mismo, que ha servido de base a la confección de los Precios Agrupados.

Para estimar los valores de las especialidades (movimiento de tierra, arquitectura, estructura e instalaciones); primeramente se halló el área del cuerpo del biodigestor por la ecuación siguiente:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (\text{Ecuación 2.23})$$

D: Diámetro del cuerpo del biodigestor.

Después de determinado el área se multiplicó por un precio agrupado para la misma que según PRECONS II es 360 \$/m². El valor obtenido en miles de peso se multiplica posteriormente por el porcentaje destinado a las especialidades, los cuales son:

Movimiento de tierras: 10%

Arquitectura: 23%

Estructura: 22%

Instalaciones: 6%

Suministros: 39%

En el caso de los suministros, los Precios Agrupados se toman del Sistema de Gestión de Precios de Suministros de la Construcción (SGPSC), que constituye una base de datos con más de 10 000 precios actualizados según el mercado internacional, contribuyendo así a la máxima precisión en el presupuesto.

Aquellas partidas correspondientes al PRECONS II, cuyo cálculo corresponde según el mismo a la entidad constructora, se presentan calculadas empleando índices porcentuales máximos, de manera que el resultado represente el valor máximo admisible de la obra.

2.7.2. Evaluación de la inversión

Según Brizuela, (1987) existen diferentes métodos de evaluación de la inversión, como por ejemplo:

1. Criterio del valor actual neto.
2. Criterio de tasa interna de rentabilidad
3. Criterio del plazo de la recuperación de la inversión (PRI).

El valor actual neto (VAN) se determinó sumando todos los movimientos de fondos actualizados.

$$TIR = i - \left[\frac{(VAN +) * (i - i1)}{(VAN +) - (VAN -)} \right] \quad (\text{Ecuación 2.24})$$

Donde:

i: interés para el VAN positivo, %

i1: interés para el VAN negativo, %

El VAN de determinó sumando todos los movimientos de fondos actualizados.

Capítulo 3: Análisis de los resultados

En este capítulo se mostrarán los resultados de la investigación que le dan cumplimiento a los objetivos planteados.

3.1. Resultados del análisis documental

Resultaron de gran aporte a la investigación la tesis de maestría de la licenciada Magalys Caridad Domínguez ya que en ella se estudió la influencia de las excretas vacuna- porcina en el proceso de arrancada de la digestión anaerobia. Se obtuvo como resultados que la utilización de excretas vacunas es más eficiente para la producción de biogás que la de cerdo. Aquí también se realizó los experimentos a escala de laboratorio con digestores de 2L así como los parámetros considerados en el diseño experimental.

Otro estudio de gran importancia fue el de Sánchez, (2005) porque reporta aspectos de gran utilidad sobre los diferentes biodigestores anaerobios existentes y construidos en la Ciénaga de Zapata y refiere una metodología para determinar las dimensiones de los biodigestores la cual fue aplicada en el presente trabajo.

Las visitas a la planta de tratamiento de residuales ‘‘Punta Hicacos’’ permitió consultar el manual de la planta y ayudó a recopilar los datos y la información acerca del lodo de gran valor pues facilitó la ejecución de la experimentación y de los cálculos.

La ley 81 del Medio Ambiente constituyó el soporte teórico fundamental que permitió constatar la legislación ambiental relacionada con el tratamiento de las aguas residuales, la gestión de residuos sólidos y la aplicación a escala industrial de la política ambiental cubana.

La tesis de diploma de la Ingeniera Mariela Alfonso Sanabria, expone procedimientos experimentales cuyos resultados son compatibles con el presente estudio ya que la obtención de biogás se realiza con la utilización de lodos de depuradoras.

3.2. Análisis de la producción de biogás a partir del diseño experimental

La tabla 3.1 refleja los resultados del diseño experimental y la generación de biogás para cada variante experimental. El tiempo de retención fue de 1 mes.

Tabla 3.1: Generación de biogás por los diferentes experimentos en cada condición.

#Experimentos	Cantidad de lodo	de Cantidad de residuo de jardinería	Producción de biogás (m ³) (75%GV/25%C)	Producción de biogás (m ³) (25%GV/75%C)
1	825	275	1.05x10 ⁻³	1.9x10 ⁻⁴
2	825	550	1.2x10 ⁻⁴	1.6x10 ⁻⁴
3	825	825	1.4x10 ⁻³	1.3x10 ⁻⁴
4	550	275	1.03x10 ⁻³	1.5x10 ⁻⁴
5	550	550	5x10 ⁻⁴	0
6	550	825	1.5x10 ⁻³	1.53x10 ⁻⁴
7	275	275	1x10 ⁻³	2.5x10 ⁻⁴
8	275	550	2.3x10 ⁻⁴	2x10 ⁻⁴
9	275	825	1.9x10 ⁻³	0

(Fuente: Elaboración propia)

Como se evidencia los mayores valores para la producción de biogás se corresponden con la variante de inóculo referida a 75% ganado vacuno y 25% de cerdo.

La figura 3.1 ilustra el comportamiento de las corridas experimentales.

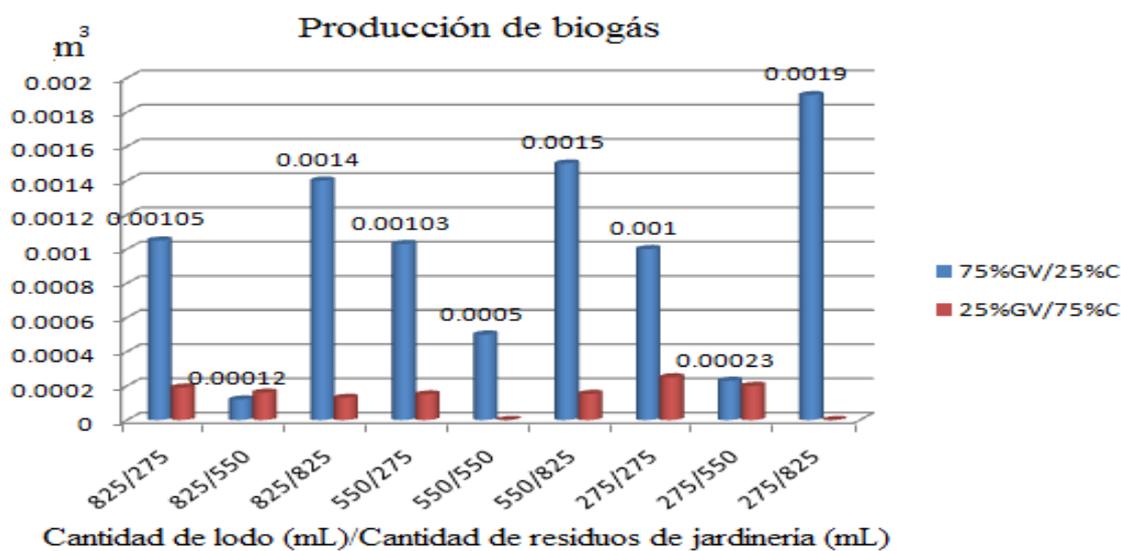


Fig. 3.1. Generación de biogás de las corridas experimentales.

Elaboración propia

En la figura 3.1 se aprecia que la mayor producción de biogás responde a la variante en la que se utilizó 275 mL de lodo y 825 mL de residuo de jardinería para la relación 75% GV/25%C Después continua la variante de 550 mL de lodo y 825 mL de residuo de jardinería y en tercera opción el experimento que contenía la mayor cantidad tanto de lodo como residuo de jardinería. Por lo antes expuesto se plantea que a medida que la carga inicial contenga más residuo de jardinería que lodo y mayor excreta de vaca se obtendrá mejores resultados en la generación de biogás.

Los resultados experimentales en las muestras de referencia fueron $7.10 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ de biogás para 75%GV/25%C y $6.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ de biogás para 25%GV/75%C. Es evidente que el contenido de residuo de jardinería en el proceso de digestión anaerobia aumenta la producción de biogás en ambas variantes de inóculo, lo cual se justifica por la composición química de los residuos derivada del contenido de macro y micronutrientes aportados por las diferentes partes de la planta y su función en el proceso anaerobio.

El proceso de optimización permitió confirmar que la variante 275 de lodo y 825 de residuo de jardinería para la proporción 75% GV/25% C es la óptima por lo cual se tendrá en cuenta en el diseño del equipamiento. Los resultados se muestran en el anexo

3.3. Resultado del análisis físico- químico.

En el anexo 9 se plantean la tabla 3.2 y 3.3 con los resultados obtenidos.

La figura 3.2 ilustra el comportamiento del pH.

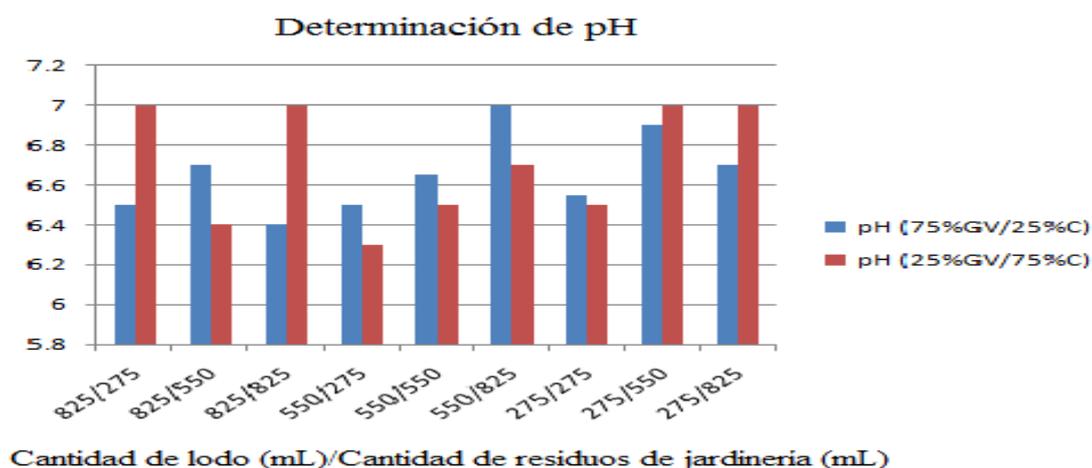


Fig. 3.2. Comportamiento del pH para las condiciones de inóculo 75% GV/25% C y 25% GV/ 75% C.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.2 se observa que el pH de todos los experimentos oscila entre 6.3 y 7, lo que significa que algunas muestras poseen carácter poco ácido y otros neutros. Al comparar estos valores con los reportados por Campos, *et. al.*, 2000; Conteras, 2006; ETHANOL, 2009, pH desde 6.6 a 7.6, se puede decir que la mayoría de las corridas se encuentran en el rango establecido. Los valores son idóneos para el crecimiento y reproducción de los microorganismos. La figura 3.3 ilustra el comportamiento de DQO.

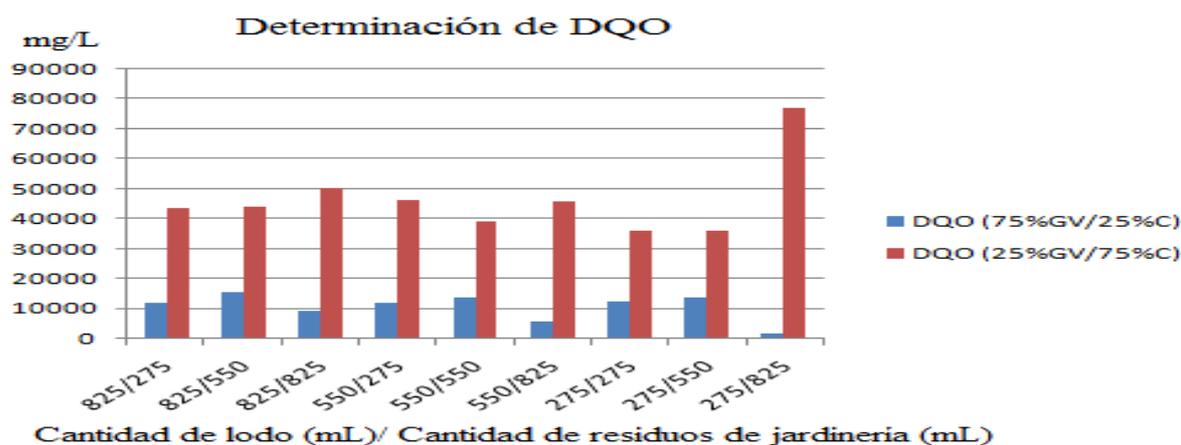


Fig. 3.3. Determinación de DOQ para las condiciones de inóculo 75% GV/25% C y 25% GV/ 75% C.

Fuente: Elaboración propia.

Según la figura 3.3 las corridas experimentales con mayor contenido de excreta de ganado vacuno y que a su vez son las de mayor producción de biogás reportan menos valores de DQO, esto demuestra que se degrada mayor contenido de materia orgánica. Los valores máximos de producción de gas por kilogramos de DQO destruidos para una relación de 75 % GV/25 % C se encuentran entre $0.0078 \text{ m}^3/\text{kg DQO}$ y $0.95 \text{ m}^3/\text{kg DQO}$ y para 25 % GV/ 75%C el rango es desde $0 \text{ m}^3/\text{kg DQO}$ a $0.0069 \text{ m}^3/\text{kg DQO}$. Al comparar estos valores con los reportados por Echenfelder, citado por Montes, (2008) se puede decir que todos cumplen con lo establecido, excepto el experimento que contiene 825 mL de residuo de jardinería y 275 mL de lodo, se considera un resultado lógico ya que en este es donde existe más contenido de residuo de jardinería.

La figura 3.4 ilustra el comportamiento de los ST

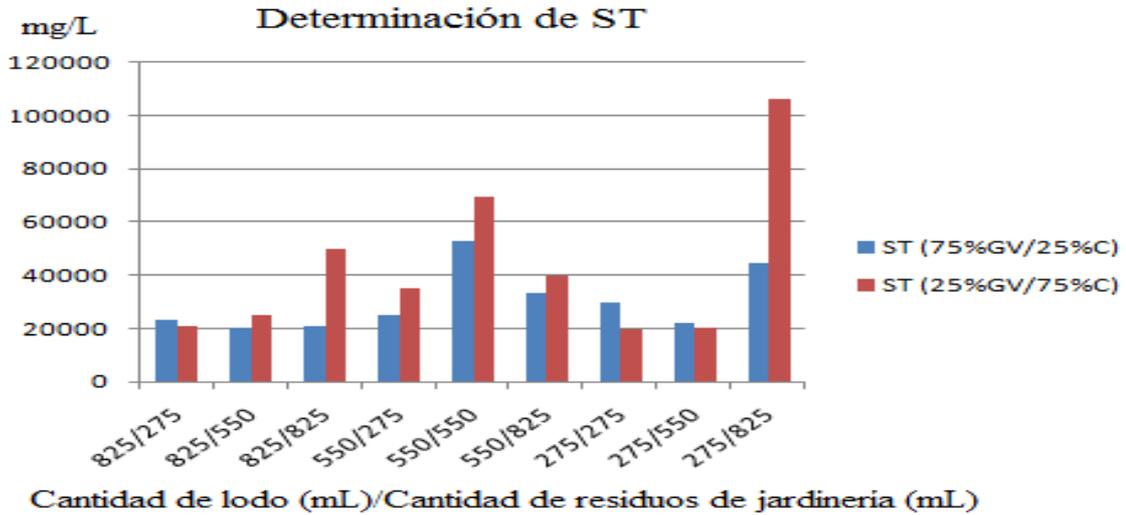


Fig. 3.4. Determinación de ST para las condiciones de inóculo 75% GV/25% C y 25% GV/75% C.

Fuente: Elaboración propia.

Según la figura 3.4, la mayoría de los experimentos que reportan alto contenido de sólidos totales son los que cumple con la relación 25% GV/ 75% C y los que generaron menos biogás.

La figura 3.5 ilustra el comportamiento de los STV

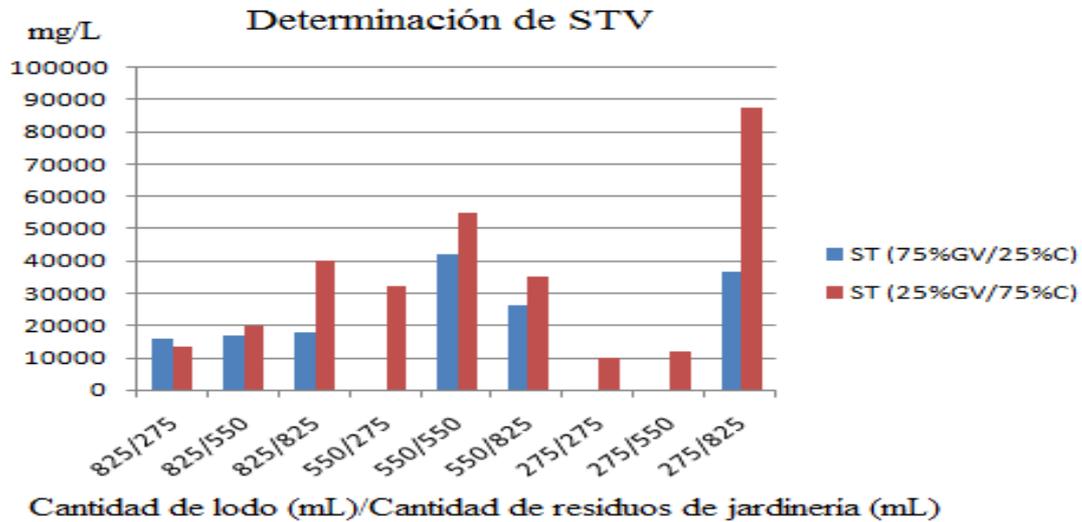


Fig. 3.5. Determinación de STV para las condiciones de inóculo 75% GV/25% C y 25% GV/75% C.

Fuente: Elaboración propia.

Igual comportamiento presenta los sólidos totales volátiles, según muestra la figura 3.5 donde es mayor su contenido para la proporción 25% GV/75%C.

3.4. Propuesta tecnológica de la planta de producción de biogás a partir de residuos de jardinería, lodo y utilizando como inóculo mezcla de excreta de ganado vacuno y porcino.

Se propone que la planta de generación de biogás sea instalada en la planta de tratamiento de residuales "Punta Hicacos" Varadero y no en la Universidad de Matanzas a pesar que los residuos de jardinería provienen de ella, porque si no fuera así se necesitarían trasladar 14 tanques de 55 galones. Sin embargo, estando allí se transportaría 10 tanques de 55 galones: 6 con inóculo y 4 con residuo de jardinería. Es decir, el transporte a utilizar es de área menor.

En este proceso se lleva a cabo las siguientes etapas:

Preparación de las materias primas.

Una de las materias primas es el lodo. Este se bombea hacia un tanque donde se mezcla con residuo de jardinería molido. El residuo de jardinería primeramente se adiciona en 4 tanques de almacenamiento, también de 55 galones, posterior a esto se pasa por una tolva para verterlos en un molino de martillo hasta obtener una granulometría de 2 mm.

Según la heurística 1 referida por Walas, (2000); los tanques de almacenamiento deben ser verticales porque el volumen es menor que 1000 galones.

Se escogió el molino de martillo ya que, según Mc. Cabe, (1986), poseen un rotor de alta velocidad y para reducción fina, la velocidad periférica de los extremos de los martillos puede alcanzar los 7 m/min, también se obtiene un producto de tamaños menores a 200 mallas. Además Rosabal, (1989) los caracteriza por gran capacidad y bajo gasto energético.

Preparación del inóculo.

La preparación consiste en mezclar la excreta de vaca con la de cerdo y a la vez con agua e introducirlo en el biodigestor un tiempo antes que las materias primas. Para el almacenamiento de las mismas se necesitan 6 tanques de posición vertical, ya que es el más recomendado según la heurística 1 referida por Walas, (2000) porque el volumen es menor que 1000 galones.

Las tres bombas utilizadas deben ser del tipo OMEGA, ya que es la que se utiliza en la planta de tratamiento para llevar los lodos a los lechos de secado.

Digestión anaerobia.

La etapa de digestión anaerobia se lleva a cabo en un biodigestor de cúpula fija. Se selecciona este modelo porque según los resultados experimentales se obtuvo una productividad por unidad

de volumen de $0.95 \text{ m}^3 \text{ biogás/ m}^3 \text{ de biodigestor}$. Según Sánchez, (2005) el modelo de cúpula fija posee una productividad que varía entre 0.75-1.30 para residuales porcinos y al analizar el valor obtenido se encuentra dentro del mismo. También los materiales de construcción son más fáciles de obtener.

El funcionamiento de este modelo (Figura 3.6, Anexo 11) consiste en que las materias primas preparadas se adicionan por el registro de carga y caen dentro por gravedad. Al ponerse en contacto con las bacterias presentes en el sistema anaerobio comienza el proceso de digestión anaerobia; como resultado de este proceso bioquímico la biomasa inicial se descompone y desprende determinados productos gaseosos entre los que se encuentran fundamentalmente el Metano, el Dióxido de Carbono y otros gases en menor escala. Esta mezcla de gases, conocido como biogás, ejerce una presión sobre las paredes de la cúpula y la superficie semisólida formada por el resto de la biomasa que aún se encuentra en digestión y los residuos ya digeridos al desprender el biogás pierden masa y se hacen más ligeros, razón por la que se van a encontrar en la parte superior del biodigestor y son desplazados por la presión ejercida por el volumen de biogás, saliendo por la compuerta que al biodigestor con la laguna de compensación. De esta forma el material ya digerido es expulsado hacia la laguna de compensación donde puede recogerse como abono orgánico de un buen poder nutritivo para mejorar las condiciones de los suelos. (Sánchez, 2005).

El esquema de la planta propuesta se observa la figura 3.7 (Anexo 12).

3.4.1. Resultados del diseño de la tolva

Datos

m (residuo de jardinería)= 1650 kg

ρ aparente del residuo= 1212 kg/m^3

Después de obtener estos datos se procedió al cálculo del volumen de la tolva por la ecuación 2.1, siendo igual a 1.36 m^3 y considerando el sobrediseño 2.51 m^3 .

El radio y la altura del cono resultó ser 1 m y por tanto la altura y diámetro del cilindro toman valores de 2 m. Al final se obtiene como altura total de la tolva 3m.

3.4.2. Resultados del diseño del tanque para la suspensión de lodo y residuos de jardinería.

Para determinar si se puede mantener la suspensión en el tanque se necesita que se cumplan los criterios donde se plantea que la velocidad de sedimentación libre debe ser inferior a 3 m/min y la fracción en volumen de sólidos menor que un 30%.

Datos

$$D_p \text{ RJ} = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\text{DEN RJ} = 1212 \text{ kg/ m}^3$$

$$\text{DEN a} = 1000 \text{ kg/ m}^3$$

$$\mu_a = 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

$$m \text{ (lodo)} = 3125 \text{ kg}$$

$$m \text{ (residuo de jardinería)} = 1650 \text{ kg}$$

Al calcular K se obtuvo un valor de 25.53, resultado que se encuentra dentro del rango establecido por Mc Cabe, (1986) (3.33 y 43.6), lo que implica la aplicación de la ecuación 2.5 para determinar la velocidad de sedimentación libre, siendo de 0.08 m/min.

La fracción en volumen del sólido resultó ser de 26.12 % para un valor de fracción másica de sólido de 0.3.

Al analizar los resultados tanto de la velocidad de sedimentación como el de la fracción en volumen de sólido se plantea que si se puede mantener la suspensión en el tanque.

En el diseño del tanque, primeramente para determinar el volumen del líquido por la ecuación 2.8 se divide cada masa por las densidades correspondientes y se obtiene un valor de 4.49 m³.

Considerando un sobrediseño de 85% el volumen total del tanque fue de 5.27 m³ y la altura como el diámetro de 2 m.

3.4.3. Resultados del diseño preliminar del biodigestor anaerobio

Los resultados del volumen y el tiempo de retención calculado por los tres métodos explicados en el epígrafe 2.6.3 se muestran posteriormente en la tabla 3.4.

Según el método explicado por Menéndez y Carlos, (1991) el volumen se determinó por la ecuación 2.11 que depende del tiempo de retención y del flujo volumétrico de lodo. A continuación se ofrece los datos siguientes:

Datos

$$S_0 = 500 \text{ mg/L}$$

$$\text{Eficiencia} = 92\%$$

$$X = 3487 \text{ mg/L}$$

$$k = 0.040 \text{ días}^{-1}$$

$$Q = 0.20 * (997 \text{ m}^3/\text{año} * 2.73 \text{ m}^3/\text{día}) = 0.546 \text{ m}^3/\text{día}$$

Para determinar la Demanda Química de Oxígeno en el efluente (S) se utilizó la ecuación 2.13 y se obtuvo un valor de 40 mg/L.

Para el método de Izquierdo y Menéndez, (1991):

Datos

$$X_0 = 231 \text{ mg/L} \cdot 10^3 / 1 \text{ m}^3 \cdot 1 \text{ g} / 10^3 \text{ mg} \cdot 1 \text{ kg} / 10^3 \text{ g} = 0.231 \text{ kg/m}^3$$

$$Q_0 = 61\,886 \text{ m}^3 / \text{mes} \cdot 1 \text{ mes} / 30 \text{ días} = 2062.87 \text{ m}^3 / \text{día}$$

$$V_0 = 997 \text{ m}^3 / \text{año} \cdot 1 \text{ año} / 365 \text{ días} = 2.73 \text{ m}^3 / \text{día}$$

$$v = 3487 \text{ mg/L} \cdot 10^3 / 1 \text{ m}^3 \cdot 1 \text{ g} / 10^3 \text{ mg} \cdot 1 \text{ kg} / 10^3 \text{ g} = 3.487 \text{ kgSS/m}^3 \text{ día}$$

Según el método basado en la cantidad de inóculo:

Datos

Θ : 40 días

Masa de excreta húmeda diaria por cada cerdo según lo reportado por la tabla 1.1 es de 2.25 kg.

Masa de excreta húmeda diaria por cada vaca según lo reportado por la tabla 1.1 es de 10 kg.

Total de cerdos y vacas= 100

Relación cerdo- vaca= 2:1

Relación cerdo- agua= 1:1

Para calcular la cantidad de cerdo y ganado vacuno se utilizó la ecuación 2.17 donde se obtuvieron como resultados 34 cabezas de vaca y 66 de cerdos.

La cantidad de agua fue de 148.5 kg para una proporción 1:1.

A continuación se plantea una tabla resumen con los resultados de los volúmenes y tiempo de retención obtenidos por los diferentes métodos.

Tabla 3.4: Resumen de los cálculos del volumen y el tiempo de retención por cada método.

Parámetros	Menéndez y Carlos, (1991)	Izquierdo y Menéndez, (1991)	Sánchez, (2005)
Volumen (m ³)	22.52	27.50	25.48
Tiempo de retención (días)	41	50	40

Fuente: Elaboración propia.

Según los valores de la tabla 3.4 el biodigestor es de primera generación porque el volumen, ya sea para un método o para el otro, oscila dentro del rango de 5 m^3 a 47 m^3 que son los reportado por Sánchez, (2005) para esa clasificación.

El tiempo de retención dio valores parecidos a los estudios que se reportan en la tabla 1.1 del anexo 2.

Al analizar los volúmenes determinados el escogido para llevar a cabo los cálculos posteriores de las dimensiones del biodigestor es el de 22.52 m^3 porque según la literatura es uno de los más usados al igual que los de 10, 14 y 47 m^3 .

3.4.3.1. Resultados de las dimensiones del biodigestor cúpula fija

Para determinar la altura y el diámetro de cada parte del biodigestor se tuvo en cuenta como base de cálculo el volumen total del mismo, el cual es de 22.5 m^3 . Como se ha explicado en el epígrafe 2.6.3.1, el biodigestor cuenta con tres figuras geométricas: para el fondo (cono), cuerpo central y cuello (cilindro) y cúpula fija (esfera y cilindro).

El volumen total del biodigestor se determinó por la ecuación 2.18, pero para su realización se necesita los volúmenes del fondo, cuerpo, cúpula y cuello.

Cálculo del volumen del fondo (Ecuación 2.19):

r: 1.5 m

h: 0.4 m

$$V_{\text{cono}} = 0.942 \text{ m}^3$$

Cálculo del volumen del cuerpo (cilindro 1) (Ecuación 2.20):

D: 3 m

H: 2.5 m

$$V_{\text{cilindro1}} = 17.663 \text{ m}^3$$

Cálculo del volumen del cuello (cilindro 2) (Ecuación 2.20):

D: 1 m

H: 1.5

$$V_{\text{cilindro2}} = 1.178 \text{ m}^3$$

Cálculo del volumen de la cúpula:

El volumen de la cúpula depende del volumen del cilindro 3 y de la esfera. Primeramente se determinó el volumen del cilindro 3 (Ecuación 2.20), utilizando las dimensiones que se observa en la siguiente figura 3.8:

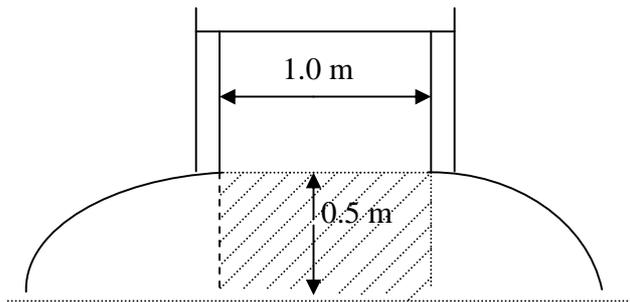


Fig. 3.8. Volumen del cilindro 3.

Elaboración propia.

$$V_{\text{cilindro 3}} = 0.393 \text{ m}^3$$

Las medidas de una de las secciones laterales al cilindro 3 se muestran en la figura 3.9.

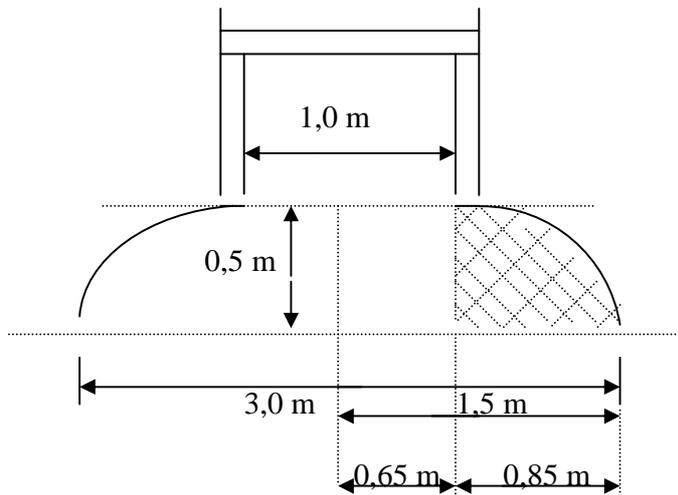


Fig. 3.9. Determinación de las medidas de $\frac{1}{2}$ de la semiesfera lateral al cilindro 3.

Elaboración propia.

El volumen de la esfera se determinó por la ecuación 2.21, dando como resultado:

$$V_{\text{esfera}} = 2.571 \text{ m}^3$$

Finalmente se halló el volumen de la cúpula utilizando la ecuación 2.22:

$$V_{\text{cúpula}} = 2.964 \text{ m}^3$$

Después de obtener todos estos valores se procede a comprobar que el volumen total es aproximadamente de 22.5 m^3 , donde se utilizó la siguiente ecuación:

$$V_{\text{Biodigestor}} = V_{\text{cono}} + V_{\text{cilindro 1}} + V_{\text{cúpula}} + V_{\text{cilindro 2}}$$

$$V \text{ Biodigestor} = 22.7 \text{ m}^3$$

Se comprueba que el volumen total obtenido es cercano a 22.5 m^3 , por eso las dimensiones propuestas son las adecuadas para el diseño del biodigestor cúpula fija, lo cual se corrobora con la propuesta de Sánchez, (2005).

La figura 3.6 (Anexo 11) muestra las partes del biodigestor cúpula fija con sus dimensiones.

3.4.3.2. Materiales que se emplean en la construcción del biodigestor cúpula fija

Para la construcción se debe realizar una excavación y movimiento de tierras, para esto se utiliza palas, picas, carretillas, barrera de acero, polea, apisonador manual y también herramientas de albañilerías como son: nivel de mano, hilo, nivel de manguera, escuadra de albañil, plomada.

Después de realizada la excavación se procede a construir la loza de cimentación cónica (es decir el fondo), la cual debe tener concreto de 3000 psia para que sea resistente a la compresión e impermeable, para lograr esto se mezclan cemento, grava y arena en una proporción volumétrica 1:2:3. El agua que se utiliza para el amasado no debe ser mayor a la mitad del peso del cemento; es decir la relación agua- cemento deber ser menor o igual a 0.5. La fundición de la loza se realiza en un solo día para que el concreto tenga la misma edad. Al concluir se debe dejar levantada la primera hilera de canto o bloque del cuerpo del biodigestor.

En el muro cilíndrico generalmente se utiliza bloque de concreto con una presión de 120 kg/cm^2 , con dimensiones $20\text{cm} \times 40\text{cm} \times 15\text{cm}$. Para la pega se mezcla cemento gris con arena que pase por una malla de 3 mm en proporción 1:4 y para el mortero de relleno se utiliza cemento y arena gruesa en una proporción 1:5.

Para la cúpula o domo esférico se utiliza ladrillos. Los materiales empleados para la pega son los mismos que los utilizados en la pega del muro del cilindro. Después de la cúpula se construye la viga de cierre que es una sección trapezoidal con 15cm de base, 15cm de altura y un ancho superior de 25cm. El concreto de esta viga es de 3000 psia con refuerzo.

Para la construcción del cuello se utiliza ladrillos y el mortero de pega es similar al utilizado en la construcción del cuerpo central del biodigestor.

La tapa es de concreto y debe cerrar herméticamente. La manija de hierro es fundamental para poder moverla ya sea para realizar mantenimiento o para otras necesidades. Para su instalación se utiliza mortero de arcilla y cemento en proporción 8:1.

Los repellos de muros cilíndricos y cúpula deben ser de un espesor mínimo de 2 cm. Los materiales a utilizar son lechada de agua, cemento gris y arena y también se aplica la

impermeabilización en la parte interna de la cúpula, cuello y tapa del biodigestor. Este se prepara con resina epóxica y reticulante donde se aplica dos manos.

3.5. Resultados del análisis económico

3.5.1. Resultados del costo del biodigestor cúpula fija

Para la determinación del presupuesto preliminar del biodigestor se halló el área del cuerpo del mismo el cual fue de 7.07 m^2 y considerando su precio agrupado arrojó un valor de 2.6 miles de pesos. A continuación se muestra una tabla con los valores estimados para cada especialidad y el precio del biodigestor.

Tabla 3.5: Presupuesto preliminar del biodigestor cúpula fija.

Especialidades	U/M	Valor estimado		
		Total	CUC	MN
Movimiento de tierra	MP	0.7	0.0	0.7
Arquitectura	MP	1.6	0.1	1.5
Estructura	MP	1.5	0.1	1.4
Instalaciones	MP	0.5	0.0	0.5
	MP			
Sub - total:	MP	4.3	0.3	4.0
Suministros	MP	2.8	2.1	0.7
Otros gastos directos de obra:	MP	0.9	0.3	0.6
Gastos generales de obra:	MP	0.7	0.2	0.5
Total gastos directos de producción:	MP	8.7	2.9	5.8
Gastos indirectos de obra:	MP	1.1	0.4	0.7
Sub - total de gastos:	MP	9.8	3.2	6.5
Presupuestos independientes:	MP	2.9	0.2	2.8
Costo total:	MP	12.7	3.4	9.3
Utilidades:	MP	1.4		1.4
Precio del Servicio de Construcción:	MP	14.1	3.4	10.7
Equipos	MP			
De ellos (Equipos montables)	MP			
Otros	MP			
Total Inversión:	MP	14.1	3.4	10.7

Fuente: Elaboración propia

Según los resultados de la tabla 3.5 se obtiene que el presupuesto referido al servicio de construcción del biodigestor anaerobio sea de \$ 14 100, donde se invierte 3400 en CUC y 10 700 en MN.

3.5.2. Análisis de los resultados de la evaluación de la inversión

Para determinar la inversión se necesitan:

Costo del equipamiento tecnológico del proceso (CETP):

Tanques de almacenamiento de inóculo (6) -----	\$ 382.30 -----	(\$ 2293.81)
Tanque para preparar el inóculo (1) -----	\$ 1338.06 -----	(\$ 1338.06)
Tanques para almacenamiento de residuos de jardinería (4) -----	\$ 382.30-----	(\$ 1529.21)
Tolva (1) -----	\$ 764.63-----	(\$ 764.63)
Molino de martillo (1) -----	\$ 14861-----	(\$ 14861.71)

Tanque de suspensión (1) -----\$ 397.74----- (\$ 397.74)
 Bombas OMEGA (3) -----\$ 899.69----- (\$2699.08)
 Biodigestor (1) -----\$ 14000----- (\$ 14000)

El costo del equipo tecnológico del proceso es de \$ 160615.81.

Costo de instrumentación del proceso (CIPT):

Costo de adquisición (CAI)= 15% CETP

CAI= \$ 24092.37

Costo de instalación y montaje= 50 % CAI

Costo de instalación y montaje= \$ 12046.19

CIPT= CAI + 0.5 CAI

CIPT= \$ 36138.56

Costo de adquisición y montaje de tuberías (CAMT):

Materiales= 35% CIPT

Materiales= \$ 56215.53

Mano de obra= 26 % CIPT

Mano de obra= \$ 41760.11

CAMT= Materiales+ Mano de obras

CAMT= \$ 97975.65

Costo de instalaciones eléctricas (CIE):

CIE= 10% CIPT

CIE= \$ 16061.58

Costo de obras civiles y edificaciones civiles (CTOC y CEC):

CTOC- CEC= 9% CIPT

CTOC- CEC= \$ 14455

Costo del proyecto:

CP= \$ 1599.95

Costo de instalación y montaje (CIM):

Molino de martillo: 25% Costo de adquisición= \$ 3715.43

Tolva: 25% Costo de adquisición= \$ 191.16

Tanques de almacenamientos: 30% Costo d adquisición* 10= \$ 771.72

Tanque para la preparación del inóculo: 30% Costo de adquisición= \$ 401.42

Tanque para la suspensión de lodo y residuos de jardinería= 30% Costo de adquisición= \$ 119.32

Bombas OMEGA= 50% Costo de adquisición* 3=\$ 1349.54

Biodigestor= \$ 14 000

CIM= \$ 20 648.58

La inversión resultó ser de \$ 224863

Costos fijos:

Costo de mantenimiento

Costo de salario

Mano de obras

Costos de mantenimiento= C conservación y mantenimiento equipos+ C conservación y mantenimiento de obras + C otros

Costo de mantenimiento= 800.24 + 220+ 29.76

Costo de mantenimiento= \$ 1050

El costo del salario para dos operadores es de 600 \$/mes, equivalente a 7200 \$/ anual.

Costo de mano de obras= \$ 28800

Costos variables:

Consumo de electricidad

Consumo de la materia prima

Para obtener el consumo de la electricidad:

Costo de electricidad= Consumo de electricidad total* precio de electricidad

Costo de electricidad= 2038 kW h/ año*0.09 \$/Kw h

Consumo de electricidad= 184 \$/año

El costo de la materia prima es de 1482 \$/año

Se considera un tiempo de vida útil 10 años y un interés de 10%.

A partir de los cálculos expuestos en la tabla 3.6 (Anexo 13), el VAN positivo obtuvo un valor de \$ 629204, resultado mayor que cero, lo que implica que se acepta la inversión, se obtiene ganancia y se paga el interés.

La tasa interna de retorno fue de 63% para un interés de 65%, lo que significa que se debe aceptar valores menores a este último para que el VAN no resulte negativo.

La inversión se recupera en 2 años.

3.6. Conclusiones parciales del capítulo

1. La experimentación arrojó que la variante 275 mL de lodo y 825 mL de residuo de jardinería para la proporción 75% GV/25% C genera mayor producción de biogás.
2. El proceso de optimización permitió confirmar que la variante 275 mL de lodo y 825 mL de residuo de jardinería para la proporción 75% GV/25% C es la óptima.
3. El análisis físico- químico permitió corroborar que el comportamiento de los parámetros:
 - ✓ pH: todos los experimentos oscila entre 6.3 y 7, valores establecidos dentro del rango recomendado.
 - ✓ DQO: las corridas experimentales de menores valores de demanda química de oxígeno para la condición 75% GV/ 25% C fueron los de mayor generación de biogás.
 - ✓ Al aumentar el contenido de sólidos (ST y STV), para la condición 25% GV/75% C, disminuyó la producción de biogás.
4. La propuesta tecnológica para la planta de producción de biogás considera dentro de los equipos fundamentales: tanques, bombas, tolva, molino de martillo, biodigestor de cúpula fija.
5. El diseño del biodigestor por los métodos según criterio cinético arrojó un volumen de 22.5m³.
6. Las dimensiones del biodigestor resultaron: altura y diámetro del cuerpo 2.5 m y 3 m respectivamente y su costo 14100 CUP.
7. En el diseño de la tolva se obtuvo un volumen de 2.51 m³ y una altura total de 3 m.
8. El tanque para la suspensión de lodos y residuos de jardinería posee un volumen de 5.27 m³ y las dimensiones: altura, 2 m y diámetro, 2 m.
9. Se obtienen valores de VAN y TIR, \$ 629240 y 63% respectivamente, lo que se acepta la inversión y se recupera la misma en 2 años.

Conclusiones

1. La obtención de biogás a partir de lodos y residuos de jardinería minimiza la contaminación ambiental que genera la disposición de los lodos en los lechos de secado en la planta de tratamiento de residuales “Punta Hicacos” por lo que queda validada la hipótesis.
2. La utilización del residuo de jardinería como fuente alternativa de sustrato aumenta la producción de biogás.
3. El proceso de optimización permitió la confirmación estadística de los resultados experimentales, comprobándose que la variante 275 de lodo y 825 de residuos de jardinería para la proporción 75% GV/25% C es la óptima.
4. El comportamiento de los parámetros pH, DQO y los sólidos muestran la eficiencia de la utilización del residuo de jardinería y lodos en la obtención de biogás.
5. La propuesta tecnológica para la planta de producción de biogás incluye las siguientes etapas: preparación del sustrato, preparación del inóculo, digestión anaerobia y almacenaje.
6. El equipamiento según la propuesta tecnológica para la obtención de biogás a partir de lodo y residuos de jardinería considera:
 - ✓ Tanques de almacenamiento para residuos de jardinería e inóculo de 55 galones.
 - ✓ Tolva de 3 m de altura.
 - ✓ Un molino de martillo donde se obtiene como producto tamaños menores de 200 mallas.
 - ✓ Tanque para la suspensión del residuo de jardinería y lodo de 2 m de altura y 2 m de diámetro.
 - ✓ Biodigestor de cúpula fija con un volumen de 22.5 m³.
7. Los indicadores VAN y TIR iguales a \$ 629240 y 63% respectivamente, demuestran la rentabilidad del proyecto de inversión.

Recomendaciones

1. Continuar el estudio para otras fuentes de sustrato y otras mezclas de inóculos.
2. Profundizar en el estudio de otros parámetros que inciden en la digestión anaerobia.

Bibliografía

- ✓ Álvarez, Y. (2009). Caracterización y propuesta de manejo de los residuos sólidos generados en la planta de tratamiento por lodos activados de Varadero. Universidad de Matanzas. Tesis en opción al título de Ingeniera Química.
- ✓ Areces, F. y Fryxell, P.A. (2007). Fascículo 10. Flora de la República de Cuba. Capparaceae. Germany. Ed. A.R. Gantner Verlag KG. 228 p.
- ✓ ARINSEMA. (2004). Censo de digestores construidos en Matanzas, en III Simposio Internacional de Arquitectura e Ingeniería al Servicio del Medio Ambiente. Camagüey.
- ✓ Arrastía, M. (2009). Hacia un nuevo paradigma energético. [consultado 25 de noviembre del 2011][on line]. Disponible en: <http://www.juventudrebelde.cu/cuba/2009-01-13/hacia-un-nuevo-paradigma-energético/v>.
- ✓ AWWA, APHA, WPCP. (1992). *Standard methods of examination of water and wastewater*. Madrid, España. Ed. Díaz de Santos, S.A.
- ✓ Barradas, A. (2009). Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales. Veracruz, México.
- ✓ Betancourt, S.A. (2000). Árboles Maderables exóticos en Cuba. La Habana. Ed. Científico Técnica. 352 p.
- ✓ Bigeriego, F. (2000). Nuevas tecnologías. Congreso IESPO Mundial, Acapulco. Disponible en: <http://www.cema-sa.org>.
- ✓ Brizuela, E. (1987). Aspectos fundamentales del desino de planta. ISPJAE. La Habana.
- ✓ Brummeler, E.; Aarnink, M.M.J.; Koster, W. (1992). *Dry anaerobic digestion of solid organic waste in a biocell reactor a pilot plant scale*. Wat. Sci. Techol. 25: 301- 310.
- ✓ Buell, P., Gerard, J., (1994). Biochemistry: The molecules of life. Chemistry an Enviromental Perspective, p. 299.
- ✓ Campos, E.; Flotats, X.; Casañé, A.; Palatsi, J.; Bonnatí, A. (2002). *Anaerobic codigestion of pig slurry witch olive bleaching earth*. VI Seminario Latinoamericano de digestión anaerobia. Recife, Brasil. Vol. II pp. 57-60.
- ✓ Chamy, R.; Poirrier, P.; Schiappacasse, M.C. (1992). Tratamiento anaerobio de residuos sólidos. En Memoria del III Taller y Seminario Latinoamericano "Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales". Montevideo, Uruguay.
- ✓ Ciesla, W. M., (1998). *Essential Oils. Non - wood forest products from conifers*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

- ✓ Conde, E., Cadahía, E. and García, M. C. (1997). *Low molecular weight polyphenols in leaves of Eucalyptus camaldulensis, E. globulus and E. rudis*. Phitochemical analysis, p. 186-193.
- ✓ Conteras, L. (2006). Producción de biogás con fines energéticos. De lo histórico a lo estratégico. Revista futuros. Vol. 6.
- ✓ Díaz, A. (2008). Propuesta de alternativas operacionales para la determinación biológica de nutrientes en la Planta de Lodos Activados del Trip Península. Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas. 36 p.
- ✓ Díaz, M.R.; Yordan; Leiva, A. (2006). Digestores de biogás en las Tunas, en X Taller Nacional, Actualización y perspectiva para la producción de biogás en Cuba. Sancti Spíritus. Ed. Feijóo 2006. ISBN 939-203-247-1.
- ✓ Díaz, S. (1998). Comportamiento del follaje de *Pinus caribaea* y *Pinus tropicalis* en el desarrollo de una metodología para la obtención de cera conífera, pasta clorofila- caroteno y residuo forrajera a escala de banco. Tesis presentada en opción a grado científico de Dr en Ciencias Forestales.
- ✓ Dirección General del Medio Ambiente. (2000). Ejemplos de buenas prácticas de compostaje y recogida selectiva de residuos. Disponible en: E-mail: env-compost@cec.eu.int
- ✓ Domínguez, M. C. (2001). Influencia de la Zeolita en el período de arrancada de la digestión anaerobia. Matanzas. Tesis en opción al título académico de Máster en Control y Tratamiento de la Contaminación Ambiental.
- ✓ Empresa de Investigación y Proyectos Hidráulicos (1999). Manual de la Planta “Punta de Hicacos”.
- ✓ Espinosa, L. (2011). Residuos Urbanos. El tratamiento de residuos de jardinería. [consultado 10 de septiembre del 2011] [on line]. Disponible en <http://www.blackwellpublishing.com/book.asp?ref=0632058897>.
- ✓ Esquer, R. A. (2009). Reciclaje y Tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos. México. Tesis en opción al título de Ingeniero.
- ✓ ETHANOL, K. (2009) *Evaluation of Analytical Methods for Analysis of Dried Distillers Grains whit Soluble*. KANSAS. United States, University of Minnesota Distiller Grain Site.
- ✓ Fengel, D. y Wegener, G. (1984). *Wood chemistry, Ultrastructure Reaction*. Walter de Grutier, Berlin.

- ✓ Fernández, A. (1997). Ley 81 del Medio Ambiente. CITMA. La Habana.
- ✓ Fernández, A. y Sánchez, M. (2007). Guía para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos. Ciudad de La Habana.
- ✓ Fernández, J.; Pérez, M. y Romero, L. (2008). *Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW)*. Bioresource Technology.
- ✓ Fragina, A. I. y Chernomoski, C. A. (1969). Utilización de los elementos vivos del árbol. Vocero Científico Leningrado. p. 36-38, N° 119.
- ✓ Gijzen, H. (1995). *Recent development in the anaerobic digestion of solid and- semi solid waste*. En Workshop Curso- Taller Internacional “ Tratamiento anaerobio de aguas residuales”. Universidad del Valle. Colombia.
- ✓ González, L. Y; Alonso, Y.; Pérez, A. (2009). Propuesta técnica–económica para mejorar la producción y comercialización del bioplaguicidas *Bacillus Thuringiensis* que se obtienen en la Planta de biopreparados de la Provincia de Matanzas. Revista Cubana de Química. (aprobada). BDI: EBSCO, *Chemical Abstracts*, Cuba Ciencia, LATINDEX, Índice de revista Latinoamericana y Actualidad Iberoamericana. ISSN 0258-5995.
- ✓ González, O. (2007). Construyen en destilería avileña planta de biogás. GRANMA. La Habana.
- ✓ González, J.C. (2005). Tratamientos para aguas residuales albañales en zonas turísticas costeras. Tesis presentada en opción al título de Doctora en Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible.
- ✓ Guardiola, J.L. y García, A. (1995). Nutrición y Transporte. Fisiología Vegetal I. Editora Síntesis. p.132.
- ✓ Hernández, A. (2001). Depuración y desinfección de aguas residuales. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. España. Quinta edición.
- ✓ Infante Gil, S., Zárate de Lara, G. P. (1997). Métodos Estadísticos. Un enfoque interdisciplinario. Trillas, México. Segunda edición.
- ✓ Izquierdo, E. y Menéndez, C.L. (1991). Tratamiento Biológico de Aguas Residuales. Manual Práctico.

- ✓ Jiménez, A.; Borja, R.; Martín, A. (2004). *A comparative kinetic evaluation of the anaerobic digestion of untreated molasses previously fermented with Penicillium decumbens in batch reactors*. Biochemical Engineering Journal 18:121-132.
- ✓ Kelly A. Reynolds, MSPH, Ph.D. (2002). Tratamiento de Aguas Residuales en Latinoamérica. Identificación del Problema.
- ✓ López, M.; Espinosa, MC.; Escobedo, R.; Delgado, J. (2004). Gestión integral de los residuos sólidos y líquidos en Cuba. Ciudad de La Habana.
- ✓ Lukhele, M.S. y Ryssen, J.B.J. (2000). *The chemical composition of leaves from indigenous fodder trees in South Africa*. Universidad de Pretoria.
- ✓ Marmer, W. N., (1996). Preservation and tanning of animal hides. ACS.
- ✓ Masera, O.R.; Aguillón, J.; Gamino, B. (2005). Estimación de Recurso y Prospectiva Tecnológica de la Biomasa como Energético Renovable en México.
- ✓ Mc Cabe, W. (1986). Operaciones básicas de Ingeniería Química. Ed. Revolucionaria.
- ✓ Mc Farclene, P.N. y col. (1998). *Metabolism of resin acids in anaerobic systems*. Water Science Techology.20.
- ✓ Meller, E. V. (1967). Fisiología Vegetal. Cap. IV. Pigmentos de las plantas. p. 45- 65.
- ✓ Mendonça, S. R. (2000). Sistemas de Lagunas de Estabilización. Cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de riego. Colombia: Mc Graw- Hill Interamericana. 370p. ISBN 958-41-0090-0.
- ✓ Menéndez, C.L.; Pérez, J. (1991), Tratamiento Biológico de Aguas Residuales Industriales.
- ✓ Metcalf and Eddy, INC (1995). Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. España. Tercera edición Wastewater Engineering.
- ✓ Microsoft Excel. (2007). Microsoft Office Enterprise.
- ✓ Montalvo, S.J. y Guerrero, L. (2003). Tratamiento Anaerobio de Residuales. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- ✓ Montes, M. E. (2008). Estudio técnico- económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradoras para la obtención de biogás. Tesis en opción al título de Doctor.
- ✓ Ndreisamanatsoa, R. (1995). Trabajo de Diploma “Instalación y puesta en funcionamiento de digester anaerobio Piloto”. Propuestas de actividades docentes. Matanzas.

- ✓ Novoa, M. C. y López, C. (2008). Microbiología de la digestión anaerobia en algunos ecosistemas naturales. Revista del Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CENIC). Ciencias Biológicas. 22p.
- ✓ Oficina Nacional de Estadísticas (ONE). (2005). Anuario Estadístico de Cuba.
- ✓ Pan, H. (1995). *Estudies of phenolic and terpenoids constituents extracted from bark of birch, Spruce and pine in Sweden, Dissertation Uppsala.*
- ✓ Patricio, A. (2009). Alternativa de gestión para disminuir el consumo de agua potable en la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Universidad de Matanzas. Tesis en opción al título de Ingeniero Químico.
- ✓ Pérez, C. (2008). Análisis del sistema energético en Cuba período 2001- 2006. Las Villas, Santa Clara. Disponible en: E-mail: carlospb@uclv.edu.cu.
- ✓ Pérez, J.L.; Bermúdez, R.C.; Lezcano, P. y Rabelo, D. (2000). Tecnologías de digestión anaerobia para el tratamiento de residuales. Revista Cubana de Ciencias Agrícolas. Tomo 34, No. 2. p. 93 – 102.
- ✓ Pieper, D. & W. Reineke. (2000). *Engineering bacteria for bioremediation. Current Opinion in Biotechnology*, Vol. 11, 262-270pp.
- ✓ Polis, O. (1986). Informe final. Asesoría extranjera (Silova, Letonia); IIF.
- ✓ Rankin, R. (2005). Fascículo 10. Flora de la República de Cuba Capparaceae.
- ✓ Rodríguez, A.; Letón, P.; Rosal, R.; Dorado, M.; Villar, S. y Sanz, J. (2003). Tratamientos avanzados de aguas residuales. Madrid. Disponible en: www.madrimasd.org.
- ✓ Rodríguez, F.J. (2000). Curso de Verano. Gestión de Residuos Urbanos e Industriales. Universidad de Burgos. España.
- ✓ Rosabal, J.M. y Valle, M. (1989). Hidrodinámica y separaciones mecánicas. La Habana. Ed. Félix Varela, 2006. 317 p.
- ✓ Sanabria, M. (2008). Digestión anaerobia, la tecnología del biogás. Universidad de Matanzas.
- ✓ Sánchez, E.; López, M.; Roviroso, N.; Travieso, L.; Morales, J.L. (1999). Gestión para el manejo, tratamiento y aprovechamiento de residuos urbanos en Cuba. Revista Residuos. España. 51: 90- 93.
- ✓ Sánchez, J.V. (2003). Biodigestores anaerobios de pequeño formato en comunidades locales de la Ciénaga de Zapata. Universidad de Matanzas. 96 h. Tesis en opción al título de Máster.
- ✓ Sánchez, J.V. (2005). Introducción a la producción de biogás. Matanzas, Cuba.

- ✓ Savran, V. (2006). Censo Digestores Construidos en Sancti Spíritus, en X Taller Nacional, Actualización y perspectiva para la producción de biogás en Cuba. Sancti Spíritus. Ed. Feijóo, 2006. ISBN 939-203-247-1.
- ✓ Six, W. y De Baere, L. (1992). *Dry anaerobic conversion of municipal solid waste by means of the DRANCO Process*. Wat. Sci. Technol. 25: 295 -330.
- ✓ Soares, D. A. (2010). Diseño de biorreactor para el tratamiento de las vinazas de destilería Jesús Rabí. Universidad de Matanzas. 79 h. Tesis en opción al título de Ingeniera.
- ✓ Suárez, J. y Beatón, P. (2007). Estado y perspectivas de las energías renovables en Cuba. Tecnología Química.
- ✓ Suárez, R. (2012). Presentan innovaciones para el empleo del biogás. Periódico Granma. La Habana. Ed. Única.
- ✓ Súchil, M.C., Jain and P.K. (2001). *A note on simulation of biogas production from cattle dung by addition of charcoal*. Biological Waste. Vol. 20. 212-214pp.
- ✓ Tomás, J. (1965). Diccionario de Botánica. La Habana. Editorial Nacional de Cuba.
- ✓ Torres, R. (2012). En la Isla: un camino en el uso de la Energía Renovable. Periódico Granma. La Habana. Ed. Única.
- ✓ Tsagarakis K.P. y Papadogiannis, C. (2006). *Technical and economic evaluation of the biogas utilization for energy production at Iraklio Municipality, Greece*. Energy Conversion and Management 47:844-857.
- ✓ Vallée, V. y Marc, T. (2008). Las fuentes renovables de energía en Cuba. Canadá.
- ✓ Verstraete, W.; Tanghe, T.; Smul, A.; Grootaerd, H. (1997). *Anaerobic biotechnology for sustainable waste treatment. En Biotechnology: Biotechnology in the Sustainable Environment*. Gran Bretaña.
- ✓ Voipio, R. (1990). *Vitamin content of tree biomass, Forestry Abstracts*.
- ✓ Walas, S.M. (2000). *Heuristics Chemical Engineering*. Boston
- ✓ Weiland, P. and RozziI, A. (2006). *The start-up operation and monitoring of highrate anaerobic treatment systems*. Water Sci. Tech., vol. 28, no. 14.
- ✓ Yagodin, V. I. (1981). Fundamentos de química y tecnología para el tratamiento del follaje. Academia Forestal de Leningrado.

- ✓ Yagodin, V. I. y Antonov, V. I. (1989). *Flexible wasterless technology of biologically active substances of tree foliage; Harvesting and utilization of tree foliage*. IUFRO, Project Group P 3 05 00 meeting, Riga, p. 265- 267.
- ✓ Yagodin, V. I. (1989b). Conferencias impartidas en la Universidad de Pinar del Río.

Anexos

Anexo 1:

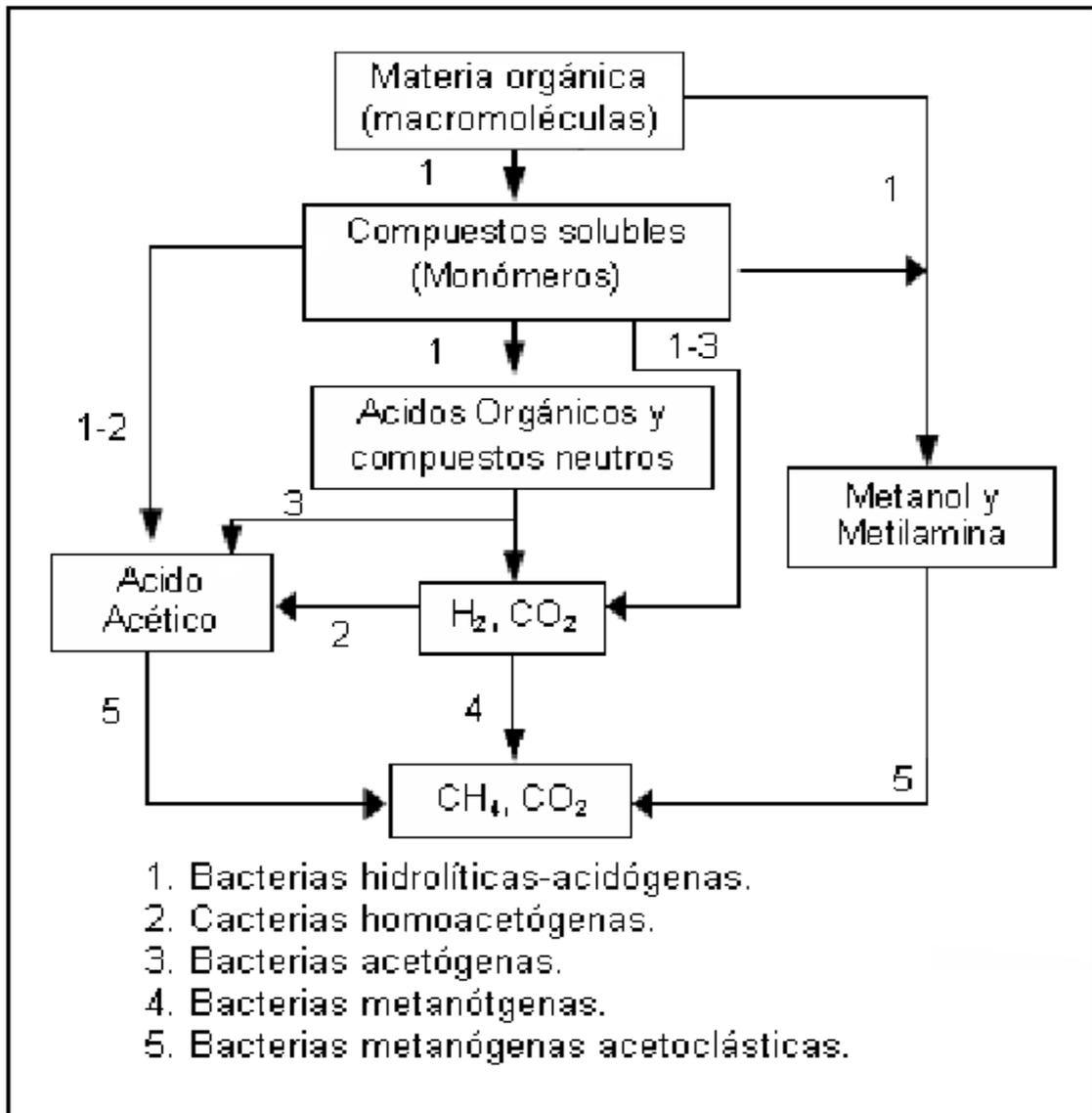


Fig.1.1. Etapas de fermentación bacteriana

Fuente: Montalvo, 2003; Pieper, 2000

Anexo 2:



Figura 1.2. Biorreactor de Cúpula Fija



Figura 1.3. Biorreactor de campana flotante.



Figura 1.4. Biorreactor Tubular de Polietileno.

Anexo 3:**Tabla 1.1: Algunas posibles fuentes de biogás**

Fuente.	Excreta húmeda diaria (kg) por animal.	m ³ de biogás por día.	Proporción excreta: agua.	Tiempo de retención aconsejable.
Vaca.	10	0,36	1 : 1	40 días
Toro.	15	0,540	1 : 1	40 días
Cerdo (50kg)	2,25	0,101	1:1 – 3	40 días
Pollo.	0,18	0,008	1 : 3 – 8	30 días
Caballo.	10	0,300	1 :1 – 3	40 días
Carnero.	2	0,100	1 : 1 – 3	40días
Ternero.	5	0,200	1 : 1	40 días
Persona adulta	0,40	0,025	1 : 1	60 días

Fuente: Sánchez, 2005

Anexo 4:



Figura 1.5. Biodigestor 5 m³ en Agramonte, Jagüey Grande.



Figura 1.6. Biodigestor de 22.5 m³ en Cantel.



Figura 1.7. Biodigestor de 47.5 m³ en San Miguel.

Anexo 5:

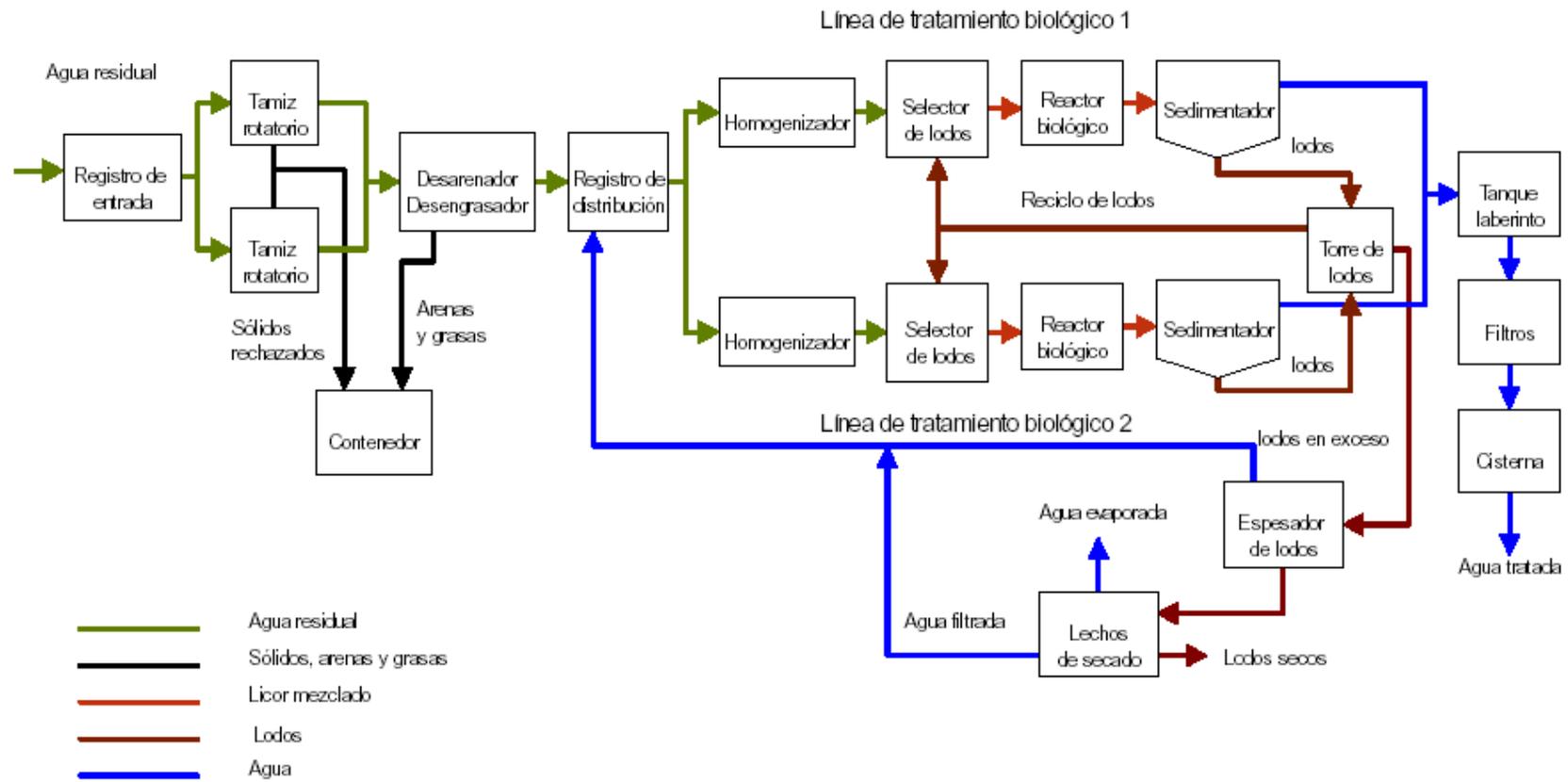


Figura 2.2. Diagrama de flujo de la planta Punta Hicacos

Fuente: Díaz, (2008)

Anexo 6:

Tabla 2.1: Caracterización de los lodos ‘Punta Hicaco.

Temporada	muestra	Análisis físico-químicos											
	fecha	pH	C.E (mmhos/cm)	N (%)	P (%)	K (%)	Na (%)	Ca (%)	Mg (%)	Cl (mg/kg)	H (%)	C (%)	MO (%)
BT	mayo	7,39	2,83	2,24	18,92	0,064	0,021	6,07	1,17	257,82	21,56	28,65	71,35
	junio	7,68	1,21	1,99	16,21	0,056	0,032	6,36	1,35	166,69	17,89	33,39	66,61
AT	julio	7,8	2,39	1,24	17,32	-0,051	-0,094	6,26	0,17	2096,46	23,51	34,95	74,21
	agosto	7,7	2,14	-0,9	18,43	-0,059	-0,083	6,55	1,34	-1110	19,84	36,51	67,82
BT	septiembre	7,65	2,22	1,34	19,54	-0,081	-0,124	6,45	1,52	-852,18	25,46	38,07	69
	octubre	0,51	-2,56	1,09	20,65	-0,089	-0,113	6,74	0,34	-943,31	21,79	39,63	69,74
	noviembre	6,53	5,8	2,82	13,03	0,211	0,147	5,55	0,77	2062,61	11,14	24,29	75,71
AT	diciembre	6,53	5,79	2,69	13,42	0,215	0,149	5,42	1,01	2218,93	13,1	24,41	75,59
	enero	6,58	5,84	2,67	13,96	0,215	0,15	5,55	0,9	2082,31	13,28	24,27	75,73
	febrero	6,54	5,72	2,71	14,58	0,215	0,15	5,77	0,73	2081,39	13,23	24,17	75,83
	marzo	6,56	5,8	2,66	14,83	0,215	0,15	5,32	0,9	2142,75	13,3	24,21	75,79
	abril	6,56	5,74	2,83	14,78	0,215	0,15	5,9	0,79	2086,17	13,49	23,93	76,07

Fuente: Álvarez, 2009

Anexo 7:

Tabla 2.2. Lodos generados anualmente en las plantas de tratamientos.

Meses	SST (g/L)				
	Hicacos	Sol Palmeras	Tainos I		
			Digestor 1	Digestor 2	Total
Enero	14,08	6,44	12,32	14,72	27,04
Febrero	6,72	8,88	13,68	13,8	27,48
Marzo	2,76	8,92	14,96	10,96	25,92
Abril	9,84	9,16	12,84	9,48	22,32
Mayo	6,72	8,92	-	-	-
Junio	2,44	8,36	-	-	-
Julio	5,12	6,12	7,84	12,88	20,72
Agosto	3,68	6,84	10,44	10,44	20,88
Septiembre	8,52	9,04	5,8	14,92	20,72
Octubre	6	8,48	5,16	7,12	12,28
Noviembre	10,76	5,56	8,88	9,52	18,4
Diciembre	6,8	3,6	9,72	7,48	17,2
Total	69,36	90,32	12,32	14,72	212,96
Año	2007	2007	2007	2007	2007
Volumen de lodos suspendidos producidos (m ³ /a).*	997	500	500		
Lodos secos producidos (kg/a).	69 151,9	45 160,0	106 480,0		
Volumen total de lodos producidos en el año (kg/a)	220 791,9				
Volumen total de lodos producidos en el año considerando 30 % de sobrediseño (t/a).	287 029,496				

* Fuente: Manual de operación de las EDARs. Empresa Aguas Varadero.

Anexo 8:

Tabla 2.3: Datos de lodos y del caudal de entrada de la planta de tratamiento de residuales Punta Hicacos

Datos de lodos													
	enero	Febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	Prom
S.T.	6040	4800	3840		4120	3200	6440	7840	2520	3480	5720	6880	4989
S.T.F.	1200	1040	200		720	720	1200	1480	720	920	1520	1440	1015
S.T.V.	4840	3760	3640		3400	2480	5240	6360	1800	2560	4200	5440	3975
S.S.T.	4200	4240	3600		3120	2640	6000	7440	2080	2560	3840	6400	4193
S.S.F.	960	640	160		440	400	1000	1200	400	320	1120	1120	705
S.S.V.	3240	3600	3440		2680	2240	5000	6240	1680	2240	2720	5280	3487
S.D.T.	1840	560	240		1000	560	440	400	440	920	1880	480	796
S.D.F.	240	400	40		280	320	200	280	320	600	400	320	309
S.D.V.	1600	160	200		720	240	240	120	120	320	1480	160	487
Datos del caudal de entrada													
Caudal	58905	50591	58914	69623	69624	70269	70270	49176	46693	40103	77853	80613	6718
S.T.	3440	880	1120		640	960	880	640	840	640	680	840	1051
S.T.F.	1160	440	200		80	40	200	80	80	280	320	320	291
S.T.V.	2280	440	920		560	920	680	560	760	360	360	520	760
S.S.T.	40	160	240		120	600	240	600	680	160	80	80	273
S.S.F.	20	80	40		40	0	160	80	40	0	0	0	42
S.S.V.	20	80	200		80	600	80	520	640	160	80	80	231
S.D.T.	3400	720	880		520	360	640	40	160	480	600	760	778
S.D.F.	1140	360	160		40	40	40	40	40	280	320	320	253
S.D.V.	2260	360	720		480	320	600	0	120	200	280	440	525

Fuente: Especialista de la planta Punta Hicacos, 2011

Anexo 9:

Tabla 3.2: Resultados de los análisis físico- químicos del efluente obtenido de los experimentos bajo la condición de 75% de excreta de ganado vacuno y 25% de la de cerdo.

Experimentos	Cantidad de lodo (mL)	Cantidad de residuo de jardinería (mL)	pH	DQO (mg/L)	ST (mg/L)	STV (mg/L)
1	825	275	6.5	11 881	23 090	15 926
2	825	550	6.7	15 433	20 000	17 000
3	825	825	6.4	9 435	21 000	18 000
4	550	275	6.5	11 923	25 000	-
5	550	550	6.65	13 725	53 094	41 955
6	550	825	7	5 578	33 000	26 000
7	275	275	6.55	12 450	30 000	-
8	275	550	6.9	13 892	22 000	-
9	275	825	6.7	1 960	44 713	36 693

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.3: Resultados de los análisis físico- químicos del efluente obtenido de los experimentos bajo la condición de 25% de excreta de ganado vacuno y 75% de la de cerdo.

#Experimentos	Cantidad de lodo	Cantidad de residuo de jardinería	pH	DQO (mg/L)	ST (mg/L)	STV (mg/L)
1	825	275	7	43 450	20 607	13 488
2	825	550	6.4	44 000	25 000	20 000
3	825	825	7	50 000	50 000	40 000
4	550	275	6.3	46 000	35 000	32 000
5	550	550	6.5	38 943	69 614	54 816
6	550	825	6.7	45 523	40 000	35 000
7	275	275	6.5	35 945	19 500	10 000
8	275	550	7	36 000	20 000	12 000
9	275	825	7	76 567	106 221	87 651

Fuente: Elaboración propia

A nexo 10: Optimización de los resultados experimentales.

Microsoft Excel 12.0 Informe de respuestas

Hoja de cálculo: [Libro1]Hoja1

Informe creado: 17/06/2012 09:52:42 a.m.

Celda objetivo (Máximo)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$G\$2	Prod.Biogás (m ³)(75%GV/25%C)	7.1245625	0.00189977

Celdas cambiantes

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$D\$3	825/275 Cantidad de lodo (mL)	825	47.99202274
\$E\$3	825/275 Cantidad de RJ (mL)	275	278.5523675
\$D\$4	825/550 Cantidad de lodo (mL)	825	825
\$E\$4	825/550 Cantidad de RJ (mL)	550	550
\$D\$5	825/825 Cantidad de lodo (mL)	825	825
\$E\$5	825/825 Cantidad de RJ (mL)	825	825
\$D\$6	550/275 Cantidad de lodo (mL)	550	550
\$E\$6	550/275 Cantidad de RJ (mL)	275	275
\$D\$7	550/550 Cantidad de lodo (mL)	550	550
\$E\$7	550/550 Cantidad de RJ (mL)	550	550
\$D\$8	550/825 Cantidad de lodo (mL)	550	550
\$E\$8	550/825 Cantidad de RJ (mL)	825	825
\$D\$9	275/275 Cantidad de lodo (mL)	275	275
\$E\$9	275/275 Cantidad de RJ (mL)	275	275
\$D\$10	275/550 Cantidad de lodo (mL)	275	275
\$E\$10	275/550 Cantidad de RJ (mL)	550	550
\$D\$11	275/825 Cantidad de lodo (mL)	275	275
\$E\$11	275/825 Cantidad de RJ (mL)	825	825

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	Fórmula	Estado	Divergencia
\$G\$2	Prod.Biogás (m ³)(75%GV/25%C)	0.00189977	\$G\$2<=\$F\$11	Obligatorio	0
\$G\$2	Prod.Biogás (m ³)(75%GV/25%C)	0.00189977	\$G\$2>=\$F\$4	Opcional	0.00177977

Anexo 11: Esquema del biodigestor cúpula fija.

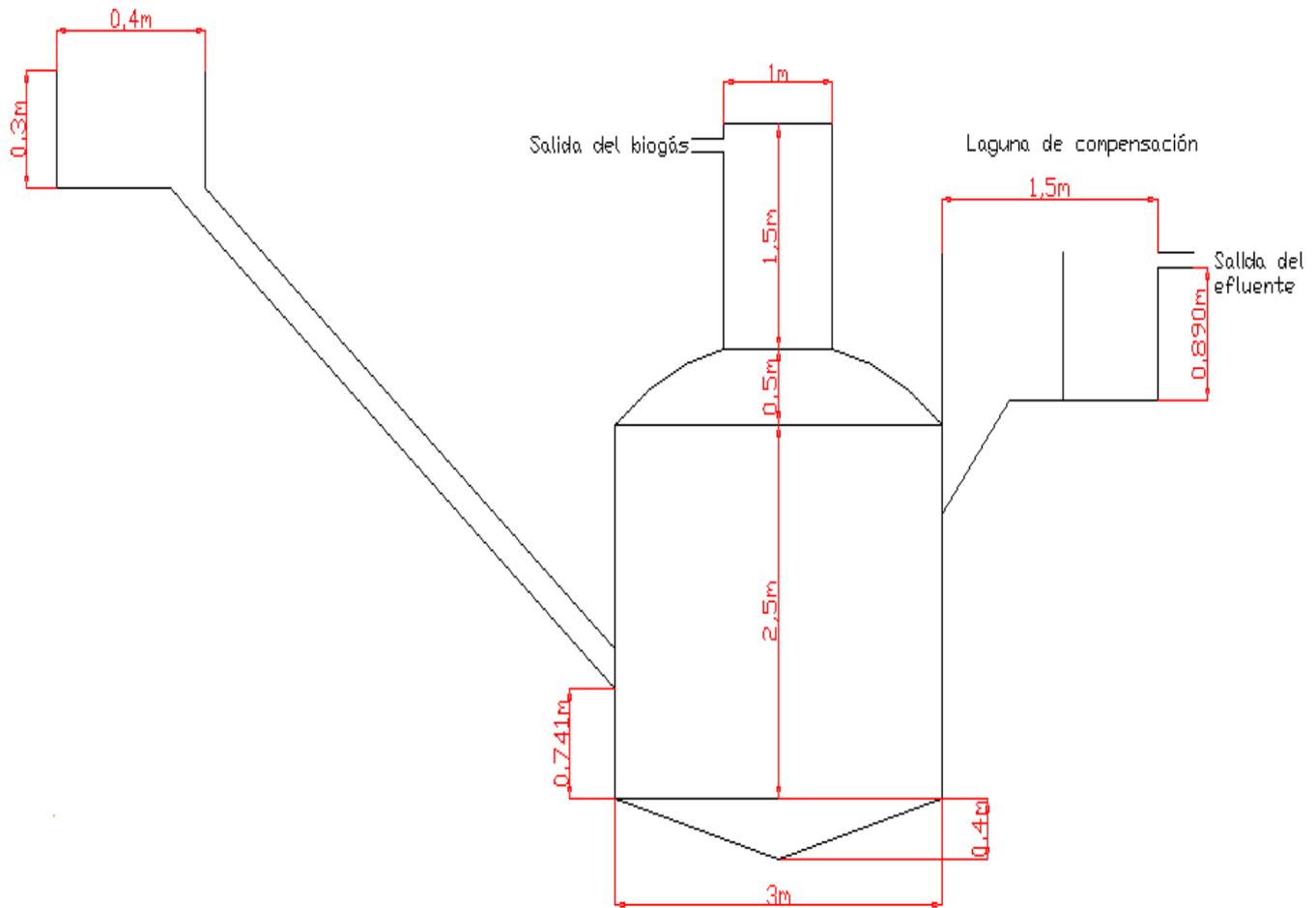


Figura. 3.6. Esquema del biodigestor con sus dimensiones.

Elaboración propia.

Anexo 11:

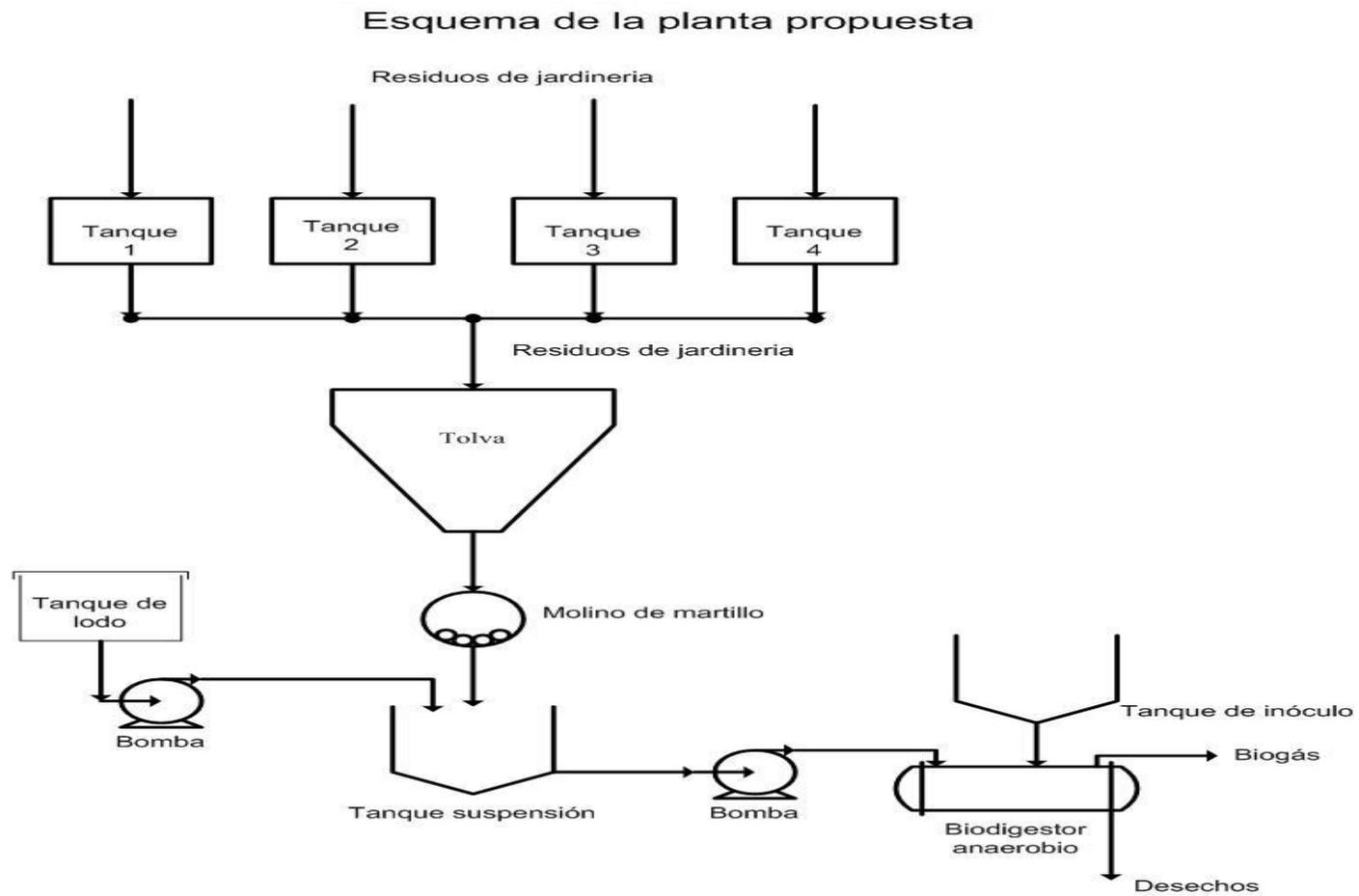


Figura 3.7. Esquema de la propuesta tecnológica de la planta para generar biogás.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 12:

Tabla 3.6: Resultados del Valor Actual Neto (VAN)

Parámetros	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I (\$)	224863	224863	224863	224863	224863	224863	224863	224863	224863	224863	224863
CF (\$)	0	37050	37050	37050	37050	37050	37050	37050	37050	37050	37050
CV (\$)	0	1667	1667	1667	1667	1667	1667	1667	1667	1667	1667
CP (\$)	224863	38717	38717	38717	38717	38717	38717	38717	38717	38717	38717
VP (\$)	0	177712	177712	177712	177712	177712	177712	177712	177712	177712	177712
MF (\$)	-224863	138995	138995	138995	138995	138995	138995	138995	138995	138995	138995
MFA	-224863	-85868	53127	192123	331118	470114	609110	748105	887101	1026097	1165093
MFAct	-224863	126359	114872	104429	94935	86305	78459	71326	64842	58947	53588

Fuente: Elaboración propia

CP= CF+CV

VP= Volumen de gas* pup

Movimiento de fondo: MF= VP- CP

Movimiento de fondo acumulado: MFA

Movimiento de fondo actualizado: MFAct