



UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

Caracterización y estudio económico del proceso de bio-digestión de excrementos de ganado vacuno como alternativa para obtener biogás y abonos en una hacienda de producción lechera de la Sierra Ecuatoriana

Trabajo de Titulación presentado en conformidad a los requisitos establecidos para optar por el título de:
Ingeniería Agroindustrial y de Alimentos

Profesor Guía:
Ing. Freddy Ordóñez MSc.

AUTOR:
JUAN GABRIEL CASTELLANOS VÁSCONEZ

Año
2011

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con la estudiante, orientando sus conocimientos para un adecuado desarrollo del tema escogido, y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

Freddy Ordóñez
Ingeniero Mecánico
C.I.: 110322033-9

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”.

Juan Gabriel Castellanos Vásquez

C.I.: 171165927-4

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres quienes me han guiado con mucha sabiduría a lo largo de mi carrera estudiantil y me han enseñado que la perseverancia y honestidad siempre deben ser prioridad en la vida.

Me gustaría agradecer a mis profesores, quienes me han impartido un sin fin de conocimientos prácticos y teóricos a lo largo de mi carrera universitaria, además agradecer al Ingeniero Pablo Moncayo, Coordinador de la Facultad de Agroindustria quien ha sido un gran apoyo para la ejecución de este proyecto.

Agradezco al Ing. Freddy Ordóñez quien ha guiado este proyecto y ha sido una gran motivación para el desarrollo del mismo y un ejemplo como profesional y persona.

A la Asociación de Ganaderos de la Sierra y Oriente (AGSO) por el apoyo técnico y profesional del Ingeniero Juan Pablo Grijalva.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres Jaime Castellanos y Mélida Vásquez; son ellos quienes me han apoyado de forma activa e incondicionalmente en todo lo que me he propuesto.

A mi hermano Jaime Nicolás y mis hermanas María Lorena y María Alexandra, que me han acompañado a lo largo de toda mi vida.

RESUMEN

La ganadería lechera en la Sierra ecuatoriana ha crecido de forma progresiva en los últimos años, junto con ello también ha aumentado abruptamente la cantidad de desechos que estos recintos pecuarios generan causando contaminación de fuentes hídricas y emisión de gases invernadero a la atmósfera de forma descontrolada.

En consecuencia, la ganadería ha alterado el entorno natural y ha contribuido al calentamiento global. Además, la inocuidad de la producción agrícola se ha visto fuertemente afectada y la salud pública está expuesta a un constante riesgo sanitario debido al riego de cultivos con agua contaminada que contiene altas concentraciones de estiércol y patógenos.

Por otro lado, la explotación de recursos energéticos de tipo fósil es cada vez más restringida y se teme que en los próximos años habrá escasez de fuentes de energía a nivel mundial ya que el descubrimiento de yacimientos petroleros ha decrecido mientras que la demanda de energía sigue en aumento. Esto ha ocasionado que los precios del petróleo y gas natural se incrementen notablemente.

En la actualidad el gobierno ecuatoriano subsidia gran parte del costo de gas licuado de petróleo reduciendo el impacto económico a la industria y familias ecuatorianas. Pero para el Estado este subsidio ha significado graves complicaciones fiscales y se estima que este subsidio se eliminará paulatinamente en los próximos años.

Este proyecto analiza la bio-digestión anaerobia a través de la construcción de un bio-digestor para la Hacienda San Juan ubicada en la parroquia de Nono, Provincia de Pichincha. En este proyecto se plantea una alternativa para aprovechar los desechos producto de la actividad pecuaria como el estiércol; dar valor económico a los mismos a través de su utilización para la generación

de bio-abonos y biogás. Y además solucionar el problema ambiental y de salud que causa el no tratamiento adecuado de este desecho tan nocivo.

ABSTRACT

In past years, milk-producing cattle have increased dramatically in the Ecuadorian region Sierra. Meanwhile, the amount of waste that animal production generates is going up, polluting water resources and causing green gas effects.

As consequence, the cattle production has changed the natural environment and has contributed to global warming. Moreover, the safety of agricultural production has been severely affected and the public health is exposed to a constant sanitary risk because of the irrigation of cultivating fields with polluted water with a high concentration of manure and pathogens.

Day after day, the exploitation of fossils fuels is more restricted and thus there is a serious concern. This is because of the general belief that soon, the energy resources will be limited due to the declining number of petrol fields worldwide whilst energy demands are increasing. This has affected the petrol and natural gas prices, which have sharply risen.

Currently, the Ecuadorian government subsidises the cost of natural gas reducing the financial impact on the Ecuadorian industry and on families. However, for the Government, this represents serious complications for public budgeting. It has believed that in the next few years this subsidy will eventually vanish.

This project analyzes the anaerobic bio-digestion through the construction of a bio- reactor for the Ranch San Juan, which is located in the town of Nono, Pichincha Province. This project proposes that waste such as manure can be used within animal industries, thus giving waste an economical value, making it useful in the production of bio-fertilizers and biogas. Therefore, this project presents a solution to environmental, health and safety issues caused by untreated harmful waste.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	5
1 POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA	5
1.1 GENERALIDADES	5
1.1.1 Métodos Termoquímicos para el Aprovechamiento	5
1.1.2 Métodos Bioquímicos para el Aprovechamiento	6
1.2 MODELO CINÉTICO DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA	7
1.3 MICROBIOLOGÍA BACTERIANA DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN ANAEROBIA	12
CAPÍTULO II	15
2 TECNOLOGÍAS DE DIGESTORES ANAEROBIOS	15
2.1 ANTECEDENTES DE BIO-DIGESTORES PARA GRANJA	15
2.1.1 Circular de Domo Fijo	15
2.1.2 De Campana Flotante	16
2.1.3 Janata con Domo Fijo	16
2.1.4 Tubular de Polietileno	17
2.2 REACTORES DE PRIMERA GENERACIÓN	18
2.2.1 Discontinuo o por Lotes	18
2.2.2 Flujo de Pistón	19
2.2.3 Continuo de Mezcla Completa	19
2.2.4 De Contacto Anaerobico o Agitado	20
2.3 REACTORES DE SEGUNDA GENERACIÓN	21
2.3.1 Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente-Descendente	21
2.3.2 Lecho Fijo con Flujo Descendente en Régimen Estacionario	22
2.3.3 Flujo de Lodos	22
2.3.4 Lecho Fluidizado	23
CAPÍTULO III	25
3 PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA	25
3.1 FACTORES QUE AFECTAN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	25
3.1.1 Ph y Alcalinidad	25
3.1.2 Temperatura	26

3.1.3	Relación Carbono/Nitrógeno.....	27
3.1.4	Humedad	28
3.1.5	Agitación	28
3.1.6	Toxicidad e Inhibición.....	29
3.2	APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS	30
3.2.1	Tipos de Sustrato.....	30
3.2.2	Composición Química del Biogás	31
3.2.3	Potencial del Biogás.....	32
3.2.4	Manejo del Biogás	34
3.3	USO DEL BIOGÁS	36
3.4	APROVECHAMIENTO DEL EFLUENTE DE SALIDA.....	38
3.4.1	El Biol.....	39
3.4.2	El Biosol.....	40
CAPÍTULO IV		43
4	ANÁLISIS DE LA HACIENDA SAN JUAN	43
4.1	GENERALIDADES DE LA HACIENDA SAN JUAN.....	43
4.2	COSTOS RELACIONADOS.....	46
CAPÍTULO V		48
5	DISEÑO, DIMENSIONAMIENTO Y POTENCIAL DEL BIO-DIGESTOR.....	48
5.1	TECNOLOGÍA Y DISEÑO ESTRUCTURAL	49
5.2	TEMPERATURA Y TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO	53
5.3	DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR Y VOLUMEN DEL CAUDAL.....	55
5.4	PRODUCCIÓN ESPERADA DE BIOGÁS.....	56
5.4.1	Análisis De Carga Orgánica Volumétrica	58
5.5	PRODUCCIÓN DE ABONOS.....	59
5.6	ARRANQUE DEL BIO-DIGESTOR	60
CAPÍTULO VI.....		62
6	RESULTADOS	62
CAPÍTULO VII.....		65
7	ANÁLISIS FINANCIERO	65

CAPÍTULO VIII	72
8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
8.1 CONCLUSIONES.....	72
8.2 RECOMENDACIONES	74
Bibliografía	75
Anexos	77

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 1.1	Fases de crecimiento bacteriano	8
Gráfico N° 1.2	Sistema de mezcla completa	10
Gráfico N° 1.3	Fases del proceso de descomposición	13
Gráfico N° 2.1	Bio-digestor circular de domo fijo.....	15
Gráfico N° 2.2	Bio-digestor de campana flotante	16
Gráfico N° 2.3	Bio-digestor Janata con domo fijo.....	17
Gráfico N° 2.4	Digestor tubular de polietileno.....	18
Gráfico N° 2.5	Diagrama de reactor discontinuo	18
Gráfico N° 2.6	Diagrama de reactor de flujo de pistón	19
Gráfico N° 2.7	Diagrama de reactor continuo de mezcla completa.....	20
Gráfico N° 2.8	Diagrama de reactor de contacto anaerobio.....	20
Gráfico N° 2.9	Diagrama de reactor de flujo ascendente-descendente.....	21
Gráfico N° 2.10	Diagrama reactor de lecho fijo con flujo descendente	22
Gráfico N° 2.11	Diagrama de reactores de flujo de lodos	23
Gráfico N° 2.12	Diagrama reactor lecho fluidizado.....	23
Gráfico N° 3.1	Tiempo de retención hidráulico en función de la temperatura del proceso	27
Gráfico N° 3.2	Sistemas de eliminación de agua condensada.....	35
Gráfico N° 3.3	Sistema de eliminación de SH ₂ mediante óxidos de hierro.....	36
Gráfico N° 3.4	Caldera de vaporización instantánea.....	37
Gráfico N° 5.1	Diagrama de flujo para el diseño de un bio-digestor.....	53
Gráfico N° 5.2	Diagrama y Diseño del Bio-digestor.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1.1	Fases de la fermentación anaerobia	12
Tabla N° 3.1	Concentraciones de inhibición y de toxicidad de los metales pesados en digestión anaerobia	29
Tabla N° 3.2	Composición de excretas de diversos animales (4 por 100 de materia seca) y agua residual doméstica bruta	31
Tabla N° 3.3	Producción de biogás según sustrato.....	31
Tabla N° 3.4	Composición bioquímica del biogás	32
Tabla N° 3.5	Producción de energía según el compuesto presente en el sustrato	34
Tabla N° 3.6	Comparación de composición nutricional entre estiércol de vaca fresco y estiércol de vaca bio-digerido	38
Tabla N° 3.7	Composición del biol	39
Tabla N° 3.8	Composición del biosol.....	41
Tabla N° 4.1	Producción de excretas según el tamaño del ganado	44
Tabla N° 4.2	Clasificación del ganado en la Hacienda San Juan.....	44
Tabla N° 4.3	Costos actuales en que incurre la Hacienda San Juan relacionados a energía y fertilización	47
Tabla N° 5.1	Juzgamiento y selección de temperatura del proceso.....	54
Tabla N° 5.2	Informe de resultados posterior al análisis del sustrato.....	57
Tabla N° 6.1	Especificaciones técnicas del reactor.....	62
Tabla N° 7.1	Desglose de la inversión del proyecto	65
Tabla N° 7.2	Valor comercial de los productos a obtener	66
Tabla N° 7.3	Producción estimada e ingresos por año	67
Tabla N° 7.4	Costo real de mano de obra para trabajadores en general, pequeña industria, maquila, agrícolas y servicio doméstico	68
Tabla N° 7.5	Horas y costo de mano de obra que demanda el bio-digestor para su funcionamiento diario y labores de mantenimiento.....	69

Tabla N° 7.6 Cálculo de Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno del proyecto (TIR)	70
Tabla N° 7.7 Principales indicadores financieros	71

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía N° 4.1	Ganado Holstein Frisen – criollo Hacienda San Juan.....	45
Fotografía N° 4.2	Desfogue de estiércol y orines en la Hacienda San Juan	45
Fotografía N° 5.1	Durante la construcción del bio-digestor.....	49
Fotografía N° 5.2	Estructura del tanque.....	50
Fotografía N° 5.3	Piezas del sistema de mezclado.....	52
Fotografía N° 5.4	Bio-digestor terminado y listo para su instalación en campo	56
Fotografía N° 5.5	Reactor instalado en campo y arranque del mismo en la Hacienda San Juan.....	61
Fotografía N° 6.1	Bio-digestor terminado y en funcionamiento en la Hacienda San Juan.....	63
Fotografía N° 6.2	Condiciones del establo en la Hacienda San Juan antes y después de poner en marcha el proyecto	64

INTRODUCCIÓN

Frente a una explotación de recursos naturales cada vez más restringida existe una demanda energética creciente a nivel mundial, lo cual genera graves complicaciones ya que el agotamiento de los combustibles fósiles se incrementa constantemente. En el año 2004 Fernando Ballenilla, profesor de Educación Ambiental de la Universidad de Alicante publicó un estudio "El final del petróleo barato"; donde dice que el 95% de la energía utilizada en el mundo para el trabajo de los diferentes tipos de motores es energía fósil.

Varias compañías petroleras como; Royal Dutch, Shell y Exxon Mobil, han aceptado públicamente en informes recientes ("Proved Reserves Recategorization" y "Tendencias energéticas, emisiones de gas de efecto invernadero y energías alternativas") que el ritmo de explotación de combustibles fósiles es mucho mayor al ritmo de reposición de sus reservas (ASPO, Marzo 2004). De hecho, en base a la frecuencia y ritmo con que se descubre nuevos pozos petroleros, el consumo debería disminuir entre 4 a 6 por ciento anual para que la producción sea considerada como una explotación balanceada.

El agotamiento de recursos fósiles obliga buscar fuentes alternativas de energía; una de ellas es el aprovechamiento de la biomasa de restos vegetales, desperdicios animales, purines, entre otros. Mediante la aplicación de métodos termoquímicos y bioquímicos es posible extraer combustibles como etanol y gas metano.

Tradicionalmente se ha considerado el área rural únicamente como una fuente de producción agrícola y pecuaria, y es recién en los últimos años que se ha determinado un gran potencial en esta región como fuente generadora de energía alternativa.

Con el tiempo y gracias a la aplicación de diversas técnicas y tecnología, gran parte de las fincas agropecuarias para la producción de leche se han convertido en verdaderas industrias, que generan gran cantidad de desechos y desperdicios.

Una práctica muy común en la actualidad; es el almacenamiento de desechos animales cerca del establo de ordeño o en otros casos diseminarlos en potreros indistintamente. Cabe recalcar que, el libre almacenamiento de estiércol en establos produce fuertes emisiones de amoníaco, metano y CO₂ a la atmósfera de forma descontrolada, provocando daños irreversibles en la salud humana.

En la mayoría de casos, el estiércol y orines son desechados directamente a ríos y acequias, posteriormente estas aguas son dirigidas a canales de riego para diferentes cultivos, es decir fuentes de agua limpia pasan a ser aguas residuales con gran contenido de nitrógeno, fósforo y materia orgánica consumidora de oxígeno. El descuido en cuanto al tratamiento de desechos representa un impacto ambiental negativo en cuanto a contaminación de fuentes hídricas superficiales y subterráneas y aporta indeseablemente la emisión de gases invernadero en el planeta.

Una de las consecuencias de la contaminación hídrica es justamente la emergencia sanitaria que ya ha causado alrededor de 15 muertes en Alemania y ha afectado a varios individuos en otros países de la región europea por consumo de alimentos agrícolas contaminados por la bacteria *Escherichia Coli*, ésta bacteria se encuentra presente en eses fecales; se expande a través de los canales de riego y posteriormente a lo largo de toda la cadena de producción y transformación de alimentos. Es decir que el estiércol no tratado de bovinos constituye un eminente precursor de este tipo de bacteria que afecta a la salud e inocuidad alimentaria de la población.

Un estudio realizado en tres países de Sur América demostró que los cuatro ríos más contaminados en el Ecuador son; Machángara, Guayllabamba, Esmeraldas y Guayas. Se recalcó que el país realiza saneamiento en menos del 40 % de las aguas que lo necesitan, en donde tan sólo se trata el 10% del total de aguas servidas, provocando una contaminación hídrica de grandes dimensiones. (OXFAM. 2009).

A más de contaminar fuentes hídricas y suelos, todos estos factores aportan al calentamiento global (ClimateChangeOutreach.org, 2009) con desastrosas consecuencias como son el agotamiento de recursos, cambio climático, deterioro de hábitats, etc. En los últimos 50 años los niveles de contaminación que ha alcanzado el planeta es alarmante, específicamente de dióxido de carbono; de 320 ppmv en 1960 a 385 ppmv en el 2010 (Mauna Loa Dioxide Organization, 2010).

Durante el último año el sector agropecuario registra un incremento sostenido en los costos de producción, lo cual constituye un problema para los productores lecheros. La Asociación Holstein Friesen del Ecuador sostiene que los costos de producción aumentaron en un 20% por lo que el sector ya no tiene rentabilidad. Además, la sequía redujo la producción de leche, especialmente en Carchi, Tungurahua y Chimborazo, debido a la falta de pastos para alimentar a las vacas. (Portal Web Pura Leche, Lechería Latina, 22 marzo del 2010, publicado por Damián Morais).

ALCANCE.

Este estudio caracterizará el funcionamiento de un bio-digestor experimental con excrementos de ganado vacuno (estiércol) evitando a la vez la contaminación de fuentes hídricas y emisión descontrolada de gases invernadero y obteniendo gas metano para generar energía y abonos para enriquecer los suelos.

Adicionalmente se estudiará las opciones de utilización de los subproductos con miras a su posterior comercialización. Se planteará un modelo a seguir por parte de otros interesados con un proceso estándar y por consiguiente una producción estable y constante.

OBJETIVOS.

Objetivo General.

Caracterizar el proceso de la bio-digestión anaerobia para estiércol vacuno de la Hacienda San Juan en la Parroquia de Nono, del Cantón Quito, Provincia de Pichincha, mediante la construcción de un bio-digestor experimental y determinar el posible ahorro de energía y reducción en los costos de fertilizantes en que incurre la producción del día a día de la mencionada granja lechera.

Objetivos Específicos.

- a) Diseñar y construir un bio-digestor experimental para la hacienda San Juan aprovechando estiércol de ganado vacuno.
- b) Estudiar factores que influyen en el funcionamiento del bio-digestor.
- c) Realizar un análisis financiero la granja agrícola de ser aprovechados los residuos animales generados por la misma.
- d) Establecer la mejor forma de aprovechamiento de bio-energía producida para el crecimiento económico de esta granja.
- e) Determinar la viabilidad del proyecto para su aplicación a nivel regional en la Sierra ecuatoriana.

CAPÍTULO I

1 POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA

1.1 GENERALIDADES

Se considera energía renovable a toda energía producida gracias al aporte de fuentes naturales y la cual se regenera por el ciclo natural de los mismos. En la actualidad se conocen varios tipos de energía renovable; eólica, solar, geotérmica, mareomotriz y en este caso la biomasa.

La biomasa se obtiene gracias al proceso fotosintético. Durante este proceso los organismos vegetales absorben la energía del sol que llega al planeta y la convierten en materia orgánica con un mayor contenido energético. Posteriormente los vegetales son ingeridos por los animales dando inicio a la cadena trófica. A lo largo de este ciclo la biomasa sigue acumulando energía en forma de carbono. Finalmente se aplica un proceso controlado en donde se recupera la energía y se la orienta según las necesidades como; energía térmica, eléctrica o como carburante vegetal.

Para lograr aprovechar el potencial energético que la biomasa ofrece es necesario aplicar algún tipo de técnica; la variedad de técnicas se divide según el tipo de biomasa a ser aprovechada. Según esto existen métodos termoquímicos y bioquímicos.

1.1.1 Métodos Termoquímicos para el Aprovechamiento

Estos métodos se basan en el aprovechamiento de biomasa seca mediante la aplicación de temperaturas elevadas en donde la presencia o ausencia de oxígeno durante el proceso define dos métodos distintos como son la combustión y la gasificación y pirólisis.

La combustión consiste en la aplicación de temperaturas elevadas con exceso de oxígeno dentro del sistema. Aquí se libera dióxido de carbono, agua cenizas y calor. El calor producido es aprovechado para obtener energía calórica bien sea para calefacción o energía eléctrica, es posible aplicar este método a nivel industrial o doméstico.

A diferencia de la combustión, la gasificación se basa en una combustión incompleta donde se aplica altas temperaturas en ausencia de oxígeno. En este proceso se libera monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno y metano. Una vez finalizado el proceso se obtiene una mezcla de gases, sólidos y líquidos con un alto contenido de carbono el cual puede ser utilizado como energía útil en un sinnúmero de procesos.

1.1.2 Métodos Bioquímicos para el Aprovechamiento

Los métodos bioquímicos tal como su nombre lo indica consisten en un proceso biológico donde varios tipos de microorganismos degradan la biomasa húmeda en sus componentes más simples los cuales poseen gran potencial energético.

Existen dos tipos de métodos bioquímicos; fermentación alcohólica y fermentación metánica. La fermentación alcohólica consiste en un proceso de fermentación en ausencia de oxígeno donde la actividad de ciertos microorganismos procesan hidratos de carbono y como producto final se obtiene etanol ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$) líquido y dióxido de carbono (CO_2) en estado gaseoso. El etanol puede ser aprovechado de la misma manera que los combustibles fósiles para el funcionamiento de motores modificados para este tipo de bio-combustible.

Por el contrario, la fermentación metánica o digestión anaerobia fermenta la biomasa dentro de un sistema hermético en ausencia de oxígeno en donde

posterior a una serie de procesos de tipo biológico se obtiene gas metano y dióxido de carbono en una mezcla conocida con el nombre de biogás.

El biogás es aprovechado como energía térmica o eléctrica. El metano obtenido al finalizar este proceso representa una ventaja para el medio ambiente ya que contiene bajas proporciones de azufre, no libera partículas durante su combustión y la producción de cenizas es escasa.

En este proyecto se aplicará un proceso de digestión anaerobia para el aprovechamiento de la biomasa.

1.2 MODELO CINÉTICO DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es un proceso de fermentación bacteriana en ausencia de oxígeno con el fin de estabilizar la materia orgánica a través de la reducción de la misma y consecuente conversión a metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), nitrógeno en forma de amoníaco (NH₃), ácido sulfhídrico (H₂S), lodos y calor.

Materia orgánica + H₂O = CH₄ + CO₂ + NH₃ + H₂S + Masa estabilizada (Lodos) + Calor.

En base a esta ecuación se entiende que la biomasa de entrada del afluente y el respectivo proceso de transformación de la biomasa dará como resultado productos equivalentes;

Biomasa afluente + Producción = Biomasa efluente + Biomasa de lodos.

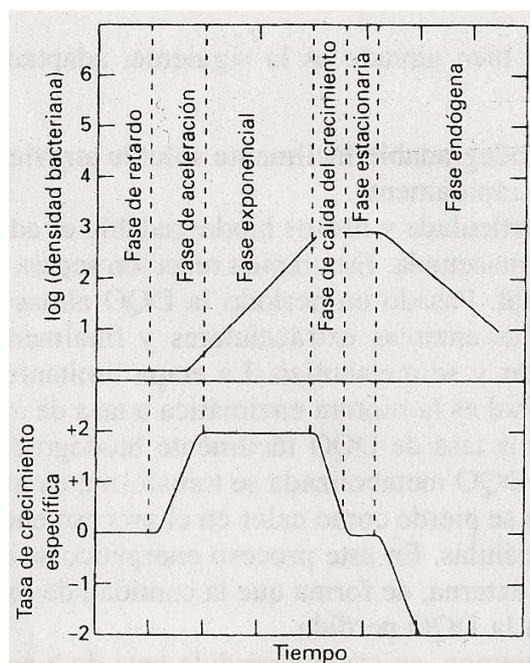
El crecimiento bacteriano para su estudio puede ser dividido en cuatro fases en función del tiempo:

- Fase de retardo; aclimatación y poca actividad reproductiva.

- Fase de crecimiento exponencial; crecimiento acelerado de las bacterias.
- Fase estacionaria; es uniforme y se la describe como la fase en donde se agotan los nutrientes; sin embargo esta etapa es la de mayor importancia pues el éxito consiste en mantener al biodigestor en esta etapa a través de la regulación de los nutrientes. Por consiguiente se obtiene una producción constante de gas metano. Adicionalmente el biogás producido en esta etapa es más fácil de aprovechar ya que es de mejor calidad por contener bajas proporciones de ácido sulfhídrico.
- Fase endógena; finalmente las bacterias se alimentan de su propia energía y por ende mueren aceleradamente mientras liberan grandes proporciones de biogás con alto contenido de ácido sulfhídrico.

El gráfico expuesto a continuación describe las diferentes fases del proceso de bio-digestión y la tasa de crecimiento específico según la duración de cada fase.

Gráfico N° 1.1: Fases de crecimiento bacteriano



Fuente: KIELY, 1999.

Se define una constante de crecimiento microbiológico expresada como μX ; en base a la variación de crecimiento bacteriano (dx) y variación del tiempo (dt).
Explicando la digestión anaerobia como;

$$\mu X = dx / dt$$

En donde, la biomasa (X) se entiende como la tase de crecimiento exponencial $X=X e^{\mu t}$, y la tasa de crecimiento específico como μ ;

μ = masa celular producida / masa celular viva. (MANOD 1949)

$$\mu = \mu_m [(S) / K_s + S]$$

K_s = saturación media [$\bar{m}g/L$] y μ_m = tasa de crecimiento máximo [$día^{-1}$];

Por consiguiente,

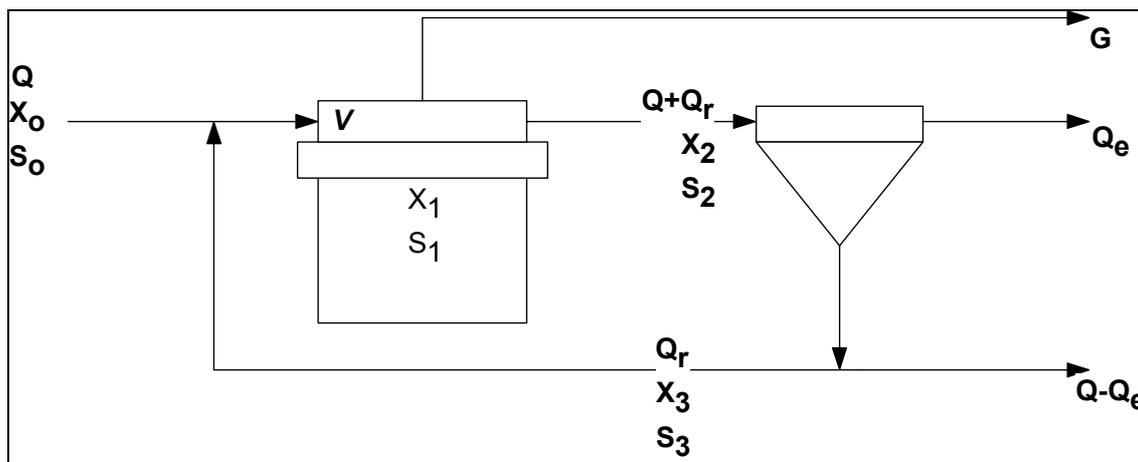
$$dx / dt = [(\mu_m * S_x) / K_s + S] - K_d X$$

El coeficiente de producción de biomasa (Y) fluctúa entre 0,08 - 0,2 para digestión anaerobia e influye en la tasa de producción de la siguiente manera en función de la variación del sustrato (ds) y tiempo (dt);

$$dx / dt = - Y^{-1} (ds / dt)$$

El gráfico expuesto a continuación explica el balance de masas y diferentes variantes que interactúan a lo largo del proceso de bio-digestión.

Gráfico N° 1.2: Sistema de mezcla completa



Fuente: FLOTATS X. & CAMPOS E., 2007.

Q = Caudal, m^3/d

S = Concentración del sustrato, kg/m^3 o mg/L

X = Concentración de la biomasa (sólidos biológicos), mg/L

V = Volumen de la cuba de aireación, m^3

Dentro del reactor se desarrolla un proceso de digestión donde se transforma la biomasa del afluente en biomasa estabilizada, sin embargo queda una mínima cantidad de masa que no termina de digerirse y por lo tanto no sufre cambios considerables.

De manera global se representa el proceso como;

$$Q_0 X_0 + V_r \left\{ \left[\frac{(\mu_m \cdot S_x)}{K_s + S} \right] - K_d X \right\} = (Q_0 - Q_w) X_e + Q_w S_w$$

En donde cada variante representa lo siguiente;

V_r = Volumen del reactor.

Q = Caudal

X = Tasa de crecimiento bacteriano

μ_m = Tasa de crecimiento máximo [$día^{-1}$]

S = Sustrato

K_d = Tasa de mortalidad endógena.

K_s = Constante de saturación media

Al realizar el balance de masa de la biomasa (X) y suponer $X_o = X_e = 0$ se obtiene;

Ecuación de balance de biomasa (X)

$$(\mu_m * S) / (K_s + S) = [(Q_w X_w) + K_s]$$

De la misma manera se considera que el sustrato de entrada es igual al sustrato de salida, por consiguiente se obtiene un sustrato único (S);

$$S = S_e = S_w$$

Sustrato + Sustrato consumido = Sustrato efluente + Sustrato de lodos

$$Q_o S_o + V_r [Y^{-1} (\mu_m * X_s) / (K_s + S)] = (Q_o - Q_w) S_e + Q_w S_w$$

Ecuación de balance masa del sustrato (S)

$$(\mu_m * S) / K_s = [(Q_o * Y) / (V_r * X)] * (S_o - S)$$

Finalmente al relacionar ambos balances de masa se obtiene una expresión única que explica el proceso de bio-digestión.

Ecuación del proceso de bio-digestión

$$(Q_w * X_w) / (V_r * X) + K_d = [(Q_o * Y) / (V_r * X)] * (S_o - S)$$

Adicionalmente se debe añadir dos variantes con un concepto muy similar; Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) y Tiempo de Retención Celular (TRC). El TRH es el parámetro físico que explica el tiempo que permanece el agua dentro del bio-digestor;

$$TRH = Vr / Qo$$

A su vez el TRC detalla el tiempo que permanece el fluido con una concentración específica de carga bacteriana dentro del bio-reactor.

$$TRC = (Vr * X) / (Qw * Xw)$$

Finalmente la interacción entre la biomasa del afluente, el sustrato consumido y el tiempo que los diferentes fluidos tardan en cruzar el bio-reactor, definen a la biomasa (X) como;

$$X = (TRC / TRH) * \{Y * (So - S) / [1 + (Kd * TRC)]\}$$

1.3 MICROBIOLOGÍA BACTERIANA DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN ANAEROBIA

A lo largo de la digestión anaerobia se diferencia tres fases para degradar el sustrato orgánico en donde en cada parte del proceso actúan microorganismos específicos.

Tabla N° 1.1: Fases de la fermentación anaerobia

Fase	Tipo de microorganismos	Descripción de población bacteriana
Hidrólisis	Acidogénicos hidrolíticos	Butyrivibrio, Clostridium, Ruminococcus, Acetivibrio, Eubacterium, Peptococcus, Lactobacillus y Streptococcus.
Acidogénesis	Homoacetogénicos	Acetobacterium, Acetogenium, Eubacterium, Pelobacter y Clostridium.
	Acetogénicos reductores	Methanobacillus omelionskii, Syntrophobacter wolinii, Syntropobacter wolfei y Syntrophus buswellii.
Metanogénesis	Metanogénicos	Methanobacterium (varias especies), Methanobrevibacter (varias especies), Methanococcus (varias especies), Methanomicrobium (varias especies), Methanogenium (varias especies) y Methanospirillum hungatei.

Fuente: KIELY, 1999.

Los microorganismos involucrados juegan un papel fundamental. La transición hidrólisis-acidogénesis se caracteriza por la interacción de microorganismos facultativos, mientras que en la tercera etapa; metano génesis, los microorganismos son estrictos, con rangos de crecimiento cinco veces menores a las acidogénicas. Como resultado, si las bacterias metanogénicas tienen inconvenientes para reproducirse y consumir los ácidos, estos se acumulan, empeorando las condiciones para las bacterias metanogénicas, responsables de la producción de metano.

El siguiente gráfico explica las diferentes etapas del proceso anaerobio:

Gráfico N° 1.3: Fases del proceso de descomposición

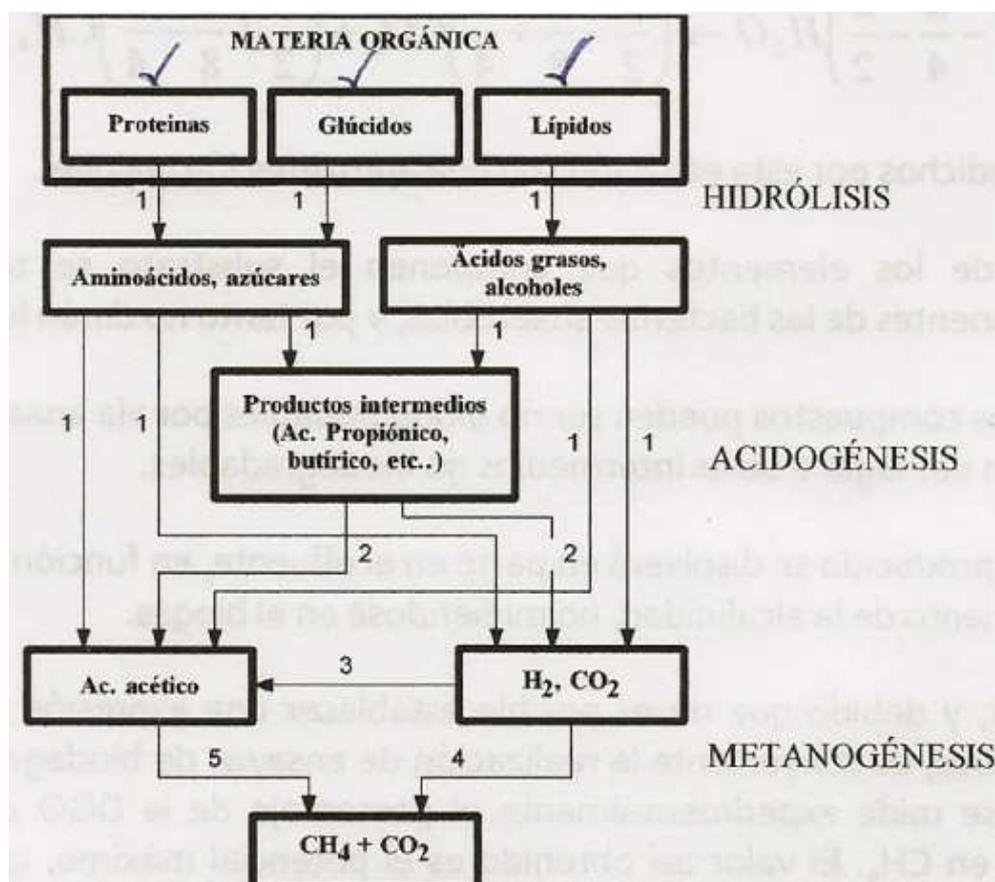


Figura 4-1: Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones bacterianas:

- 1) Bacterias hidrolíticas - acidogénicas.
- 2) Bacterias acetogénicas.
- 3) Bacterias homoacetogénicas.
- 4) Bacterias metanogénicas hidrogenófilas.
- 5) Bacterias

Fuente: FLOTATS X. & CAMPOS E., 2007.

Este proceso comprende una descomposición progresiva donde a lo largo de las diferentes etapas los componentes del sustrato se transforman en moléculas sencillas, finalmente en la fase de metanogénesis se obtiene compuestos sumamente simples como son metano y dióxido de carbono.

La calidad del sustrato disponible determina la población de bacterias. Este factor es sumamente sensible y de haber algún tipo de sustancia tóxica para las bacterias metanogénicas habrá un exceso de producción de ácidos, estos ácidos se acumulan y no permiten el normal y óptimo desarrollo de las bacterias, afectando directamente la producción de gas metano. Por consiguiente las excretas del ganado lechero a utilizar deben estar en condiciones óptimas según los requerimientos del proceso y de manera estricta no contener ningún tipo de antibiótico ya sea rastros de penicilina u otro tipo de sustancia.

El balance entre la población bacteriológica es fundamental dentro del proceso. De hecho en la fase acetogénica (Gráfico N° 1.3). La descomposición anaerobia de los ácidos propiónico y butírico no se darían a no ser por el metabolismo de las bacterias propias del proceso anaeróbico, pues es gracias a estas que es posible eliminar del medio los productos de la etapa acetogénica, y posteriormente dar paso a las siguientes etapas del proceso.

Adicionalmente, la conversión del sustrato (estiércol vacuno) en biomasa es cuatro veces inferior a la conversión si se tratase de un sistema aerobio (presencia de oxígeno), el cual elimina la materia orgánica mucho más rápido pero no con la misma eficiencia. En otras palabras un sistema anaerobio, requiere pasar por un periodo de estabilidad microbiológico para conseguir la producción deseada en cuanto a biogás y fertilizantes biológicos (biol y biosol).

CAPÍTULO II

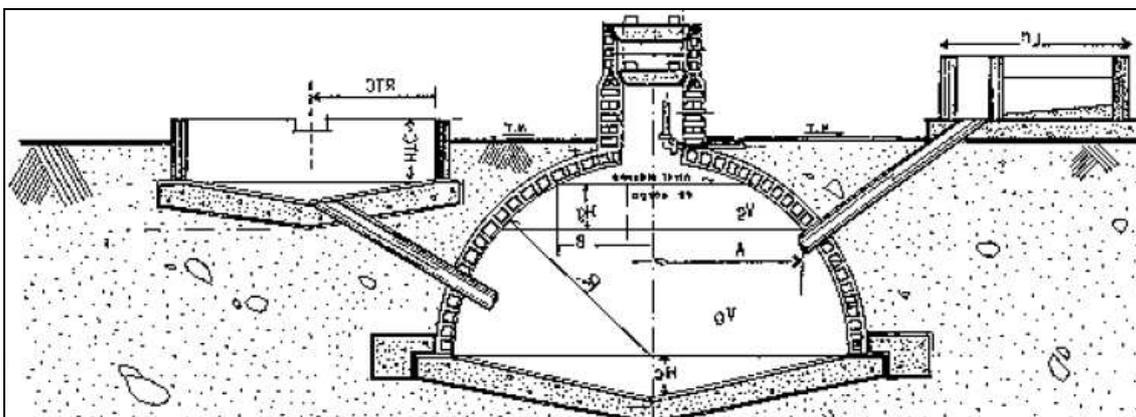
2 TECNOLOGÍAS DE DIGESTORES ANAEROBIOS

2.1 ANTECEDENTES DE BIO-DIGESTORES PARA GRANJA

2.1.1 Circular de Domo Fijo

Es uno de los bio-digestores más populares en China, su construcción se intensificó en la década de 1970. Se caracteriza por estar fabricado de ladrillo o cemento, tal como su nombre lo indica su domo es fijo y la única estructura metálica que posee es el tubo de acero para dirigir el biogás. La construcción de este reactor requiere de un nivel alto de conocimientos técnicos. Desde sus inicios este tipo de reactores ha sido construido en comunidades a modo de unidades familiares con un volumen entre 6 – 10 m³, capaces de producir de 1 – 2 m³ diarios de biogás en base al aprovechamiento de residuos humanos y animales (ROSE, 1999). Sin embargo, los reactores circulares de domo fijo han demostrado una gran desventaja, pues se ha notado fugas del gas metano, lo cual da el indicio que este sistema no es completamente hermético.

Gráfico N° 2.1: Bio-digestor circular de domo fijo



Fuente: SILVA VINASCO JP, 2010.

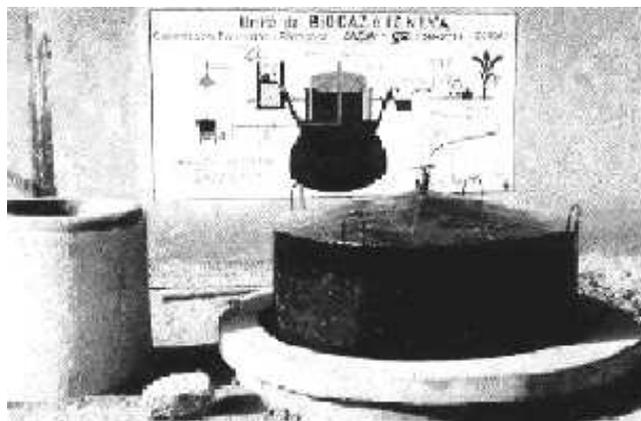
2.1.2 De Campana Flotante

También conocido como bio-digestor KIVH atribuye su nombre a la compañía Khadi an Villange Industries Commision, compañía la cual se ha encargado de promocionar su tecnología e implantación de la misma. Este tipo de reactor se diferencia por la forma en que almacena gas pues al existir suficiente cantidad de gas metano dentro del reactor este ejerce presión en la campana de acero que flota sobre la estructura permitiendo la salida del biogás y almacenamiento del mismo. Su figura cilíndrica está parcialmente enterrada en la tierra y su diseño se basa en que la altura es entre 2,5 – 4 veces mayor al diámetro (SILVA VINASCO JP, 2010). La cantidad diaria de biogás en este bio-reactor se estima según su volumen, entre 20 – 30% de producción de gas metano del volumen del reactor.

Gráfico N° 2.2: Bio-digestor de campana flotante



Fuente: CHAO R, 2007.

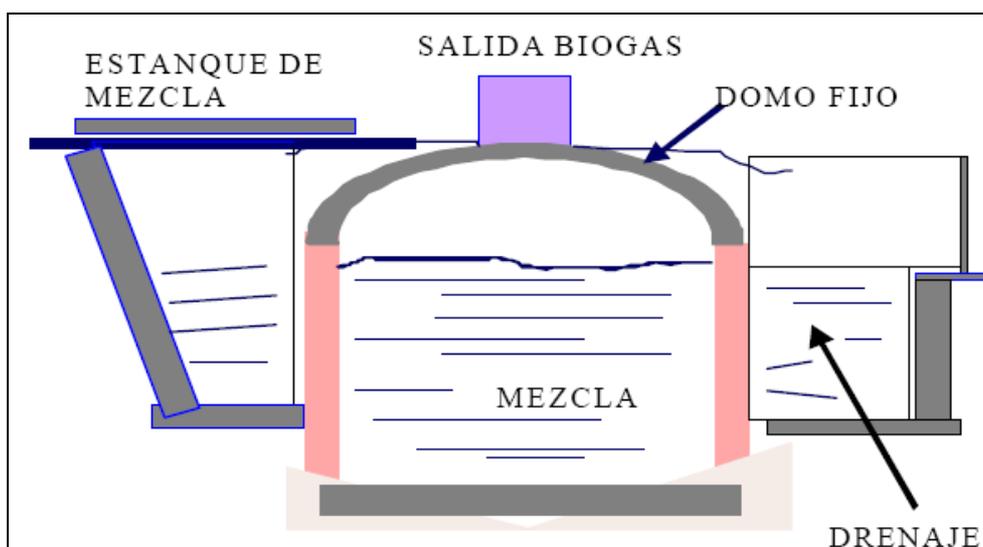


2.1.3 Janata con Domo Fijo

Se desarrolló en la India y luego se lo perfeccionó en Pakistán, combina la tecnología del bio-digestor circular de domo fijo y del bio-digestor de campana. Pues posee una tapa (domo) fijo y sobre esta posee una campana colectora de gas con un sello de agua externo. Como resultado se elimina los malos olores

y además se reduce la actividad corrosiva del ácido sulfhídrico del biogás. Presenta grandes ventajas, pues su diseño es sencillo, además se evita las fugas de gas y su costo de mantenimiento es relativamente bajo. Sin embargo requiere una inversión alta para su construcción (SILVA VINASCO JP, 2010).

Gráfico N° 2.3: Bio-digestor Janata con domo fijo

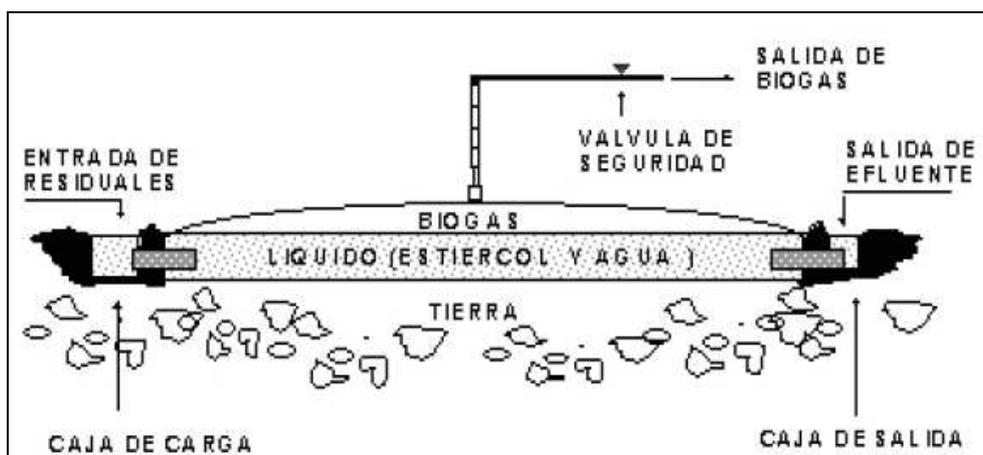


Fuente: SILVA VINASCO JP, 2010.

2.1.4 Tubular de Polietileno

Su origen es taiwanés y en los últimos años ha ganado gran popularidad, principalmente en países en vías de desarrollo como; Colombia, Vietnam, Filipinas, Tanzania, Bangladesh y Camboya donde su construcción se ha intensificado en distintas áreas rurales dedicadas a la producción animal (CHAO R, 2007). Radica en un reactor de polietileno de forma tubular orientando horizontalmente con tuberías de entrada y salida de residuos. Su gran aceptación se debe a su alta eficiencia, baja inversión, bajo costo de mantenimiento, no requiere un nivel elevado de conocimiento técnico y además es fácil de transportar de un lugar a otro.

Gráfico N° 2.4: Digestor tubular de polietileno



Fuente: CHAO R, 2007.

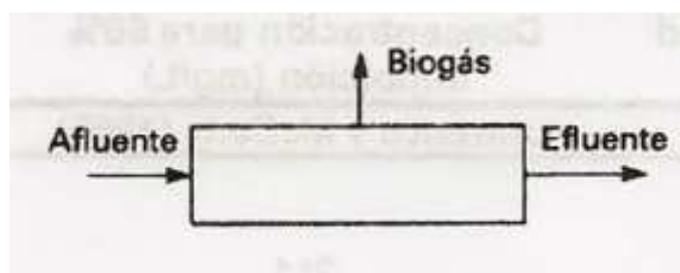
2.2 REACTORES DE PRIMERA GENERACIÓN

Los reactores de primera generación se destacan debido a que el tiempo de retención hidráulico es igual al tiempo de retención celular y pueden ser de cuatro tipos:

2.2.1 Discontinuo o por Lotes

Este tipo de basa en filtros anaerobios, lechos fluidizados y la inmovilización de la estructura sobre un soporte. Son simples y de baja inversión pero ocupan un área considerable. En proyectos piloto han presentado resultados positivos, pero a nivel industrial la utilización de este sistema aun es escasa (KIELY, 1999.).

Gráfico N° 2.5: Diagrama de reactor discontinuo



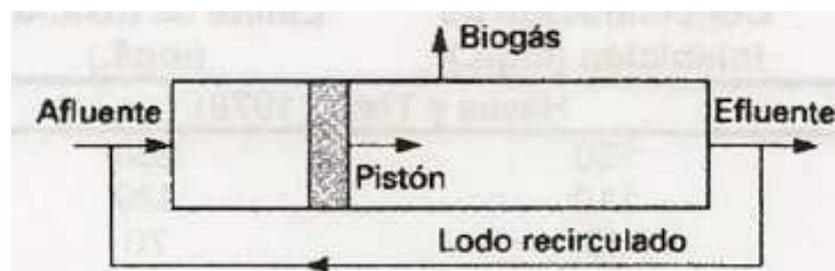
Fuente: KIELY, 1999.

2.2.2 Flujo de Pistón

En este tipo de reactor se maneja una concentración sumamente elevada de sustrato en consecuencia la concentración media en el interior del sistema es superior a la concentración del caudal de salida, esto provoca que el tiempo de retención sea inferior.

Este sistema se lo utiliza en residuos orgánicos como estiércol de porcino y bovino, sin embargo su uso presenta problemas debido a la falta de homogenización en la sección transversal a la dirección del flujo lo cual se puede evitar mediante un sistema de agitación transversal. Ma. Dolores. Álvarez profesora de la Universidad Politécnica de Cataluña recomienda la reintroducción de biogás a presión en la base del digestor si el reactor es horizontal para evitar este inconveniente.

Gráfico N° 2.6: Diagrama de reactor de flujo de pistón

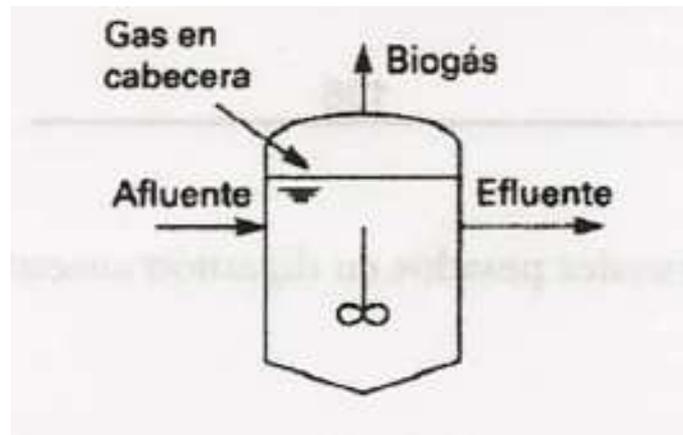


Fuente: KIELY, 1999.

2.2.3 Continuo de Mezcla Completa

En este equipo la tasa de crecimiento microbiana es generalmente uniforme a lo largo del proceso biológico, éste presenta ciertas ventajas; versátiles, son baratos y facilitan el control de variantes como son pH y temperatura de la mezcla al interior de la mezcla.

Gráfico N° 2.7: Diagrama de reactor continuo de mezcla completa



Fuente: KIELY, 1999.

2.2.4 De Contacto Anaerobico o Agitado

Se lo denomina de contacto agitado debido a que la mezcla se completa con cuatro o seis agitadores los cuales tienen una velocidad constante, sin romper la pared celular de los microorganismos, además el tanque posee una manguera de lodo recirculado para mantener la temperatura adecuada de la mezcla interna del reactor (KIELY, 1999).

Gráfico N° 2.8: Diagrama de reactor de contacto anaerobio



Fuente: KIELY, 1999.

2.3 REACTORES DE SEGUNDA GENERACIÓN

Los reactores de segunda generación se caracterizan porque el tiempo de retención celular es mayor al tiempo de retención hidráulico y además admiten una mayor carga orgánica, razón por la que son eficientes para el tratamiento de residuos industriales, específicamente en la industria pecuaria y de agroalimenticias. Estos se subdividen según la funcionalidad del sistema y diseño en:

2.3.1 Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente-Descendente

Las bacterias se encuentran fijas a una superficie formando bio-películas, columnas de relleno o atrapadas dentro del reactor, generalmente se utiliza soportes de cerámica o plástico.

Gráfico N° 2.9: Diagrama de reactor de flujo ascendente-descendente

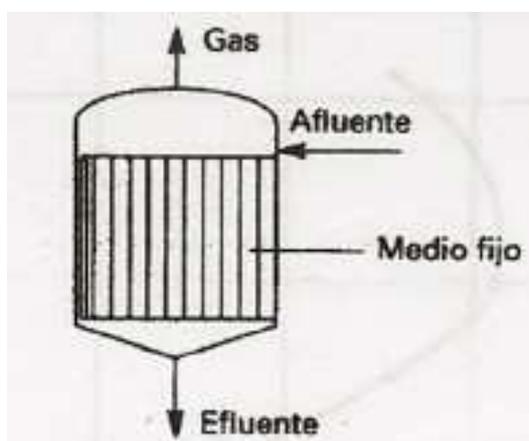


Fuente: KIELY, 1999.

2.3.2 Lecho Fijo con Flujo Descendente en Régimen Estacionario

Este tipo de reactor tiene muchas similitudes con el reactor de filtro anaerobio, pero en este caso las bacterias se encuentran en su mayoría atrapadas al interior del tanque. El tanque se encuentra orientado en forma vertical lo cual permite que la actividad de las bacterias sea fija (KIELY, 1999). Los trozos de bio película desprendida de sus estructuras verticales según la sedimentación juegan un papel importante en este tipo de reactor.

Gráfico N° 2.10: Diagrama reactor de lecho fijo con flujo descendente

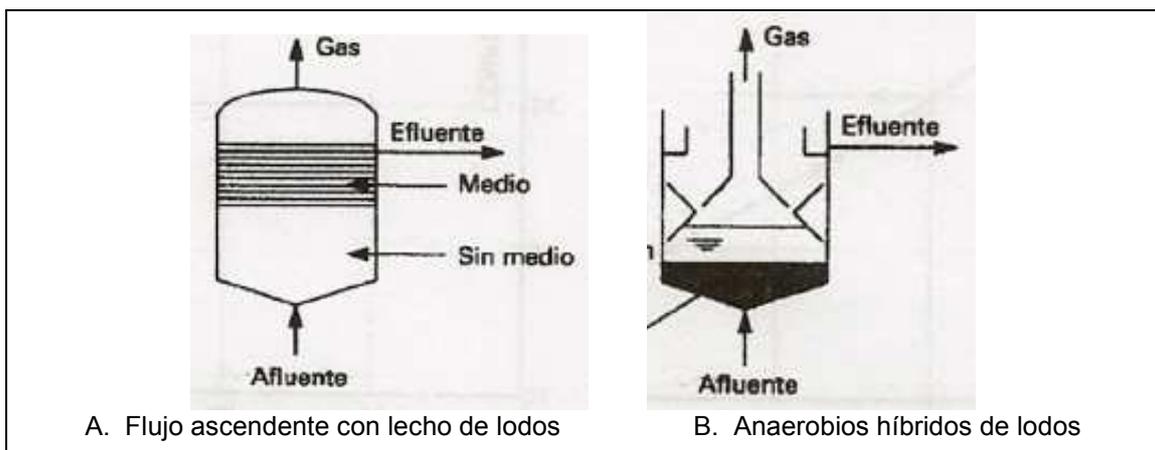


Fuente: KIELY, 1999.

2.3.3 Flujo de Lodos

Los reactores de tipo lecho de lodos se basan en la adición de una sustancia floculante al sistema para formar gránulos o asociaciones y así motivar la sedimentación al interior del reactor con una velocidad ascendente adecuada del fluido. Es sumamente importante que en la parte superior exista un buen separador sólido (biomasa) / líquido/gas. Existen dos diseños, ambos basados en el mismo principio de floculación; sin embargo, el más común es el Upflow Anaerobic Sludge Blanket (Gráfico 2.11-B).

Gráfico N° 2.11: Diagrama de reactores de flujo de lodos

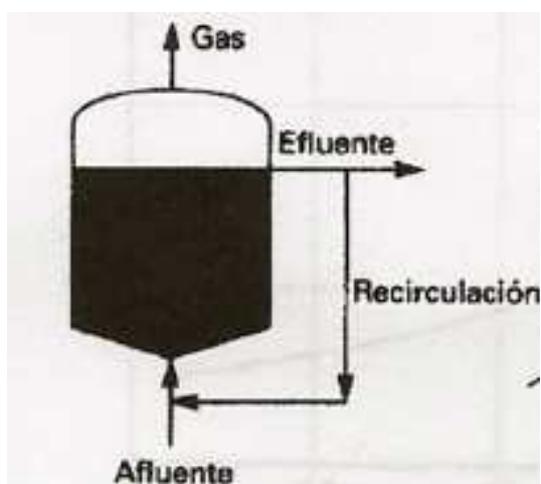


Fuente: KIELY, 1999.

2.3.4 Lecho Fluidizado

En este equipo las bacterias se encuentran fijadas al sistema formando bio-películas sobre el material inerte, el sistema se encuentra fluidizado constantemente gracias al flujo ascendente continuo se mantiene un caudal adecuado, el cual permite la expansión y fluidización del lecho y recirculación (KIELY, 1999). Este método se aplica para el tratamiento de aguas residuales producto de la actividad pecuaria, sin embargo su utilización en la industria ganadera es limitada.

Gráfico N° 2.12: Diagrama reactor lecho fluidizado



Fuente: KIELY, 1999.

Una vez analizadas las diferentes tecnologías se ha determinado que según los objetivos de este proyecto, el mejor bio-digestor a construir sería un equipo de primera generación continuo de mezcla completa.

CAPÍTULO III

3 PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

3.1 FACTORES QUE AFECTAN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

La digestión anaerobia consiste en un proceso biológico en donde intervienen gran cantidad de bacterias anaerobias que se clasifican en cinco grupos:

- Hidrolíticas - acidogénicas
- Acetogénicas
- Homoacetogénicas
- Metanogénicas hidrogenófilas
- Metanogénicas acetoclásticas

Estas bacterias al igual que cualquier otro ser vivo necesitan de parámetros físico-químicos específicos para su supervivencia; pH y alcalinidad, temperatura, relación carbono/nitrógeno, humedad y dilución, agitación de la mezcla y toxicidad causada por elementos extraños. El manejo adecuado de los éstos parámetros asegura el éxito del proceso metabólico y por ende el funcionamiento correcto del bio-digestor.

3.1.1 pH y Alcalinidad

El ciclo de un bio-reactor consta de tres etapas bien diferenciadas que son; hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis. El nombre de cada etapa se origina según el tipo de microorganismo que actúa en cada fase. Durante el proceso participan microorganismos hidrolíticos, acetogénicos y metanogénicos respectivamente, cada grupo de microorganismos acepta diferentes rangos de pH:

- Hidrolíticos 7,2 – 7,4
- Acetogénicos 7 – 7,2
- Metanogénicos 6,5 – 7,5

Al trabajar con aguas residuales es necesario controlar exteriormente el pH en la fase de acidogénesis para evitar el descenso acelerado. Pero al trabajar con residuos ganaderos es común encontrar una alcalinidad que varía entre 2 y 3 CaCO_3 por litro lo cual permite una autoregulación del pH global, sin embargo de presentarse un pH inestable es posible controlarlo a través de la mezcla de diferentes residuos.

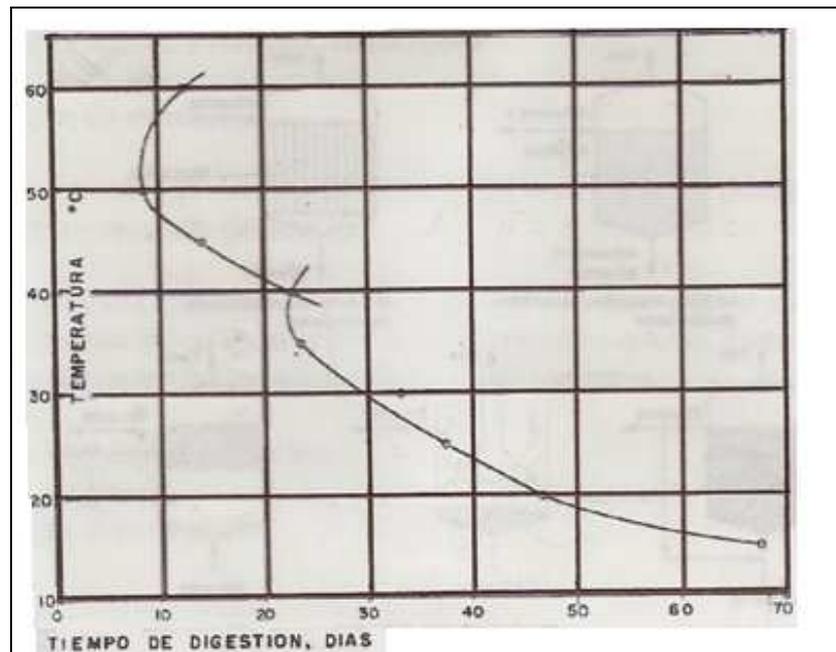
3.1.2 Temperatura

El proceso biológico anaerobio puede ser de tipo psicrófilo; temperatura inferior a 20 grados centígrados, mesófilo; entre 30 y 40 grados centígrados o termófilo; entre 50 y 70 grados centígrados. La temperatura tiene una gran influencia en diversos factores secundarios del bio-reactor, uno de ellos es la tasa de hidrólisis, pues conforme aumenta la temperatura la tasa de hidrólisis también se incrementa, por consiguiente la velocidad metabólica de las bacterias aumenta y a su vez la producción de biogás (FLOTATS X. & CAMPOS E., 2007). Por otro lado la agitación y bombeo se facilitan ya que la viscosidad de la mezcla disminuye. Adicionalmente el trabajar entre 50 y 70 grados centígrados es sumamente beneficioso para el aprovechamiento del abono ya que lo higieniza gracias a la destrucción de agentes extraños como; patógenos, malas hierbas, huevos de insectos y larvas.

Sin embargo el manejo de un sistema de tipo termófilo demanda mayor vigilancia, control y seguimiento, ya que debido a la alta temperatura el nitrógeno amoniacal reacciona como inhibidor, en donde la única forma de controlar dicha alteración es mediante una modificación de la mezcla para disminuir la concentración de nitrógeno. En contraste al trabajar con un sistema mesofílico la mezcla es más estable facilitando el manejo del bio-digestor y su proceso.

La temperatura influye directamente en el tiempo de digestión, es así que el tiempo de retención varía notablemente dependiendo si el proceso se desarrolla de forma psicrófilo, mesófilo o termófilo.

Gráfico N° 3.1: Tiempo de retención hidráulico en función de la temperatura del proceso



Fuente: FLOTATS X. & CAMPOS E., 2007

3.1.3 Relación Carbono/Nitrógeno

La relación apropiada entre ambos componentes juega un rol fundamental en el desarrollo metabólico y crecimiento de la flora bacteriana, en donde la proporción debe ser entre 15/1 y 45/1 con una razón de 30/1 como relación óptima. Una relación inferior disminuye drásticamente la velocidad de reacción, mientras que valores superiores inhiben el desarrollo bacteriano. Adicionalmente, pero con menos relevancia se considera importante la relación Carbono/Fósforo, la cual debe ser igual a 150/1. Sin embargo al trabajar con residuos ganaderos la relación Carbono/Nitrógeno y Carbono/Fósforo es óptima debido a la naturaleza misma de los desechos.

3.1.4 Humedad

La humedad del proceso de un bio-reactor puede ser; o bien digestión húmeda o digestión seca. Lo más recomendado es trabajar en vía húmeda para maximizar la producción de biogás. La vía húmeda consiste en la fermentación de la materia orgánica gracias a la utilización de varios ácidos. Para que este proceso se desarrolle de forma adecuada se recomienda una concentración del estiércol de 10% de sólidos totales.

3.1.5 Agitación

La agitación de la mezcla dentro del bio-digestor cumple con varios objetivos como son; mantener una distribución homogénea del sustrato alimenticio con el sustrato en digestión y además evita la sedimentación de partículas al fondo del tanque. Por otro lado es necesaria para mantener una temperatura uniforme en el sustrato y por ende en todo el sistema anaerobio. El mezclado también impide la formación de espuma y facilita la transferencia de gas atrapado en burbujas del sustrato.

Para lograr alcanzar los objetivos que persigue la agitación es necesario contar con un sistema ya sea de tipo manual o automático. En un proyecto realizado en Costa Rica – Santa Fe en el 2006 se aconseja que se agite la mezcla lentamente con velocidad constante 5 veces al día, por períodos de 5 minutos cada agitación. Aunque esta modalidad ayuda a cumplir con los objetivos del mezclado lo más recomendado es mezclar con mayor frecuencia.

Otra opción de agitación consiste en un sistema de mezclado automático el cual debe incluir un alternador programado. Se estima una potencia energética entre 10 a 100 W-h/m³/día. Flotats X. recomienda valores superiores a 30 W-h/m³/día mediante la utilización de un sistema mecánico o neumático.

3.1.6 Toxicidad e Inhibición

Es necesario entender el proceso de un bio-digestor como un sistema vivo donde bacterias de tipo metanogénico interactúan entre si, por tal motivo se debe brindar un medio saludable para las mismas sin ningún tipo de sustancia que provoque inhibición parcial o total de la fauna microbiológica que compone el sistema de producción de gas metano.

Dentro de este sistema es fundamental evitar las formas no ionizadas de ácidos grasos volátiles como son el amoníaco libre y ácido sulfhídrico. Además, es sumamente importante impedir altas concentraciones de metales pesados los cuales también representan agentes de inhibición.

La tabla expuesta a continuación explica las concentraciones y límites admisibles en un sistema de tipo anaerobio.

Tabla N° 3.1: Concentraciones de inhibición y de toxicidad de los metales pesados en digestión anaerobia

Metal	Concentración de inhibición (mg/L)	Límite de toxicidad (mg/L)	Concentración para 50% inhibición (mg/L)
Ref.	Hayes y Theis (1978)		Lawrence y McCarty (1965)
Cr (III)	130	260	-
Cr (VI)	110	420	
Cu	40	70	211
Ni	10	30	134
Cd	-	20*	-
Pb	340	340*	-
Zn	400	600	136

*Los autores señalan que el límite de toxicidad debe encontrarse por encima de la concentración especificada.

Fuente: FLOTATS X. & CAMPOS E., 2007.

3.2 APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS

La descomposición anaerobia de la materia orgánica produce gas combustible metano (CH_4) con un poder calorífico de 5.500 Kcal/m^3 (FLOTATS X. & CAMPOS E., 2007). Para maximizar el aprovechamiento de gas metano se debe analizar el tipo de sustrato a ser fermentado. Pues según el tipo de sustrato el potencial energético del biogás puede variar notablemente. El tipo de sustrato a utilizar puede variar y ser aprovechado de aguas residuales, estiércol, rastrojos de pastos y/o residuos urbanos.

El biogás tiene una composición química muy particular en cuanto a la presencia de ácido sulfhídrico (H_2S). De hecho el ácido sulfhídrico no solo causa el deterioro de las instalaciones metálicas de los equipos debido al óxido generado, sino que también acorta la vida útil de los motores donde es aprovechado el biogás. Por tal motivo es necesario eliminar el ácido sulfhídrico mediante filtros a un nivel máximo de $25 \mu\text{L/L}$ el cual es tolerable por los motores. (M. Acosta, D. Revelo, O. Ruiz, O. Tax, R. Botero, 2009).

3.2.1 Tipos de Sustrato

En la actualidad se han unificado varios conceptos entendiendo el biogás como un producto del metabolismo de microorganismos hidrolíticos, acetogénicos y metanogénicos. El biogás puede ser generado de forma espontánea en la naturaleza o posterior a un proceso inducido por el hombre, por eso se considera el biogás como una fuente de energía limpia y renovable.

Entre los sustratos más utilizados para la obtención de biogás se encuentran las excretas de la actividad ganadera. El contenido suficiente de nutrientes y la alta capacidad tampón, es decir pH estable facilita el aprovechamiento de las excretas para la obtención de biogás. En la tabla expuesta a continuación se puede apreciar las diferentes variantes en cuanto a composición de diferentes sustratos y producción de biogás según sustrato.

Tabla N° 3.2: Composición de excretas de diversos animales (4 por 100 de materia seca) y agua residual doméstica bruta

Componente	Fuente de agua (mg/L)				
	Ganado de ordeño	Ganado vacuno	Cerdo	Pollo	Humano
Sólidos totales (ST)	40 000	40 000	40 000	40 000	500
Sólidos volátiles (SV)	29 700	31 000	31 600	31 100	350
DBO ₅	6 000	6 700	12 800	9 800	200
DQO	36 200	35 600	32 800	36 000	450
Nitrógeno como N	1 600	1 900	2 500	2 900	30
Fósforo como P	300	400	950	1 100	10
Potasio como K	860	1 100	1 400	1 100	10

Fuente: KIELY, 1999.

Tabla N° 3.3: Producción de biogás según sustrato

Tipo de animal	Deyecciones (Kg /día)	Sólidos Totales (%)	Producción máxima gas (L/kg Sólidos volátiles)	% CH ₄
Terneros	21	13	220-300	55-60
Vacas	45	13	220-400	55-60

Fuente: HOBSON, 1990.

3.2.2 Composición Química del Biogás

El biogás es una mezcla de gases en donde la proporción de sus componentes varía según el sustrato utilizado y sistema operativo del reactor donde se procesa la biomasa. Típicamente la composición del biogás es metano (CH₄) en un 60%, dióxido de carbono (CO₂) en un 40% y ácido sulfhídrico (H₂S) en un 0.1%, con un potencial calorífico de alrededor 5. 500 Kcal/m³.

A continuación se detalla el porcentaje promedio en volumen de cada compuesto formador del biogás.

Tabla N° 3.4: Composición bioquímica del biogás

Componente	Formula química	Volumen %
Metano	CH ₄	60 - 70
Hidróxido de carbono	CO ₂	30 - 40
Hidrogeno	H ₂	1
Nitrógeno	N ₂	0.5
Monóxido de carbono	CO	0.1
Oxígeno	O ₂	0.1
Acido Sulfhídrico	H ₂ S	0.1

Fuente: SILVA VINASCO, Juan Pablo, 2009.

3.2.3 Potencial del Biogás

El funcionamiento del sistema y producción de biogás se basa en la Demanda Química de Oxígeno (DQO), donde la suma de las DQO de entrada debe ser igual a la suma de las DQO del efluente mas la DQO del biogás, es decir:

$$DQO_{\text{afuente}} = DQO_{\text{efluente}} + DQO_{\text{biogás}}$$

Si se considera que el biogás a obtener está formado únicamente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). Donde el CO₂ presenta una Demanda química de oxígeno (DQO) de cero, es decir que la DQO de entrada es equivalente a la DQO del gas metano y afluyente.

Flotats X. 2007, dice que por cada kilogramo de DQO eliminada se producen 0,35 m³ de CH₄, pero si se trabaja a una 1 atmósfera de presión y a 25 °C; por cada kilogramo de DQO eliminada se generarían 0,38 m³ de metano. Por consiguiente el poder calorífico del metano es de aproximadamente 3,5 kW·h/kg DQO eliminada, en unidades de energía primaria, en contraste un sistema aerobio tan solo presentaría un potencial calorífico de 1 kW.h/kg DQO eliminada, razón por la cual los sistemas anaerobios presentan una ventaja respecto a sistemas aerobios cuando el objetivo es obtener energía.

Se debe considerar que un sistema anaerobio también genera otros gases, entre ellos ácido sulfhídrico (H_2S), la acumulación de estos gases puede generar variaciones en la producción de energía por lo cual es sumamente importante controlar la presencia de los mismos mediante el uso de filtros. Por otro lado los valores de DQO pueden variar según la cantidad de carbono oxidable.

Basados en este principio, en 1952 Bushwell y Mueller plantearon la siguiente relación para estimar la producción de metano; un mol de glucosa produce 3 moles de metano y 3 de dióxido de carbono, o $0,37 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ por kg de glucosa degradada.

Sin embargo, esta relación no incluye ciertos procesos biológicos que influyen directamente en la producción de biogás. Uno de estos factores es que parte de los componentes del gas metano pasará a formar parte de bacterias anaerobias y no generará gas metano. Por otro lado el CO_2 producido se disolverá según el pH, incrementando el grado de alcalinidad, el cual no sería posible medir en el biogás.

Por todas estas razones se recomienda realizar ensayos y análisis según el sistema y tipo de desecho para medir experimentalmente el rendimiento de CH_4 según el porcentaje de DQO. Vale mencionar que dichos valores se pueden ver afectados a nivel industrial debido a los aspectos cinéticos y de operación (FLOTATS X. & CAMPOS E., 2007).

Finalmente, la producción de biogás está en función de la composición del desecho a ocupar en el proceso; es así que las proporciones de lípidos, glúcidos y proteínas afectan directamente en la composición final.

Tabla N° 3.5: Producción de energía según el compuesto presente en el sustrato

Tonelada de compuesto presente	Tonelada de biogás equivalente en combustible fósil
Lípidos	0.89
Glúcidos	0.32
Proteínas	0.42

Fuente: FLOTATS X. & CAMPOS E., 2007.

3.2.4 Manejo del Biogás

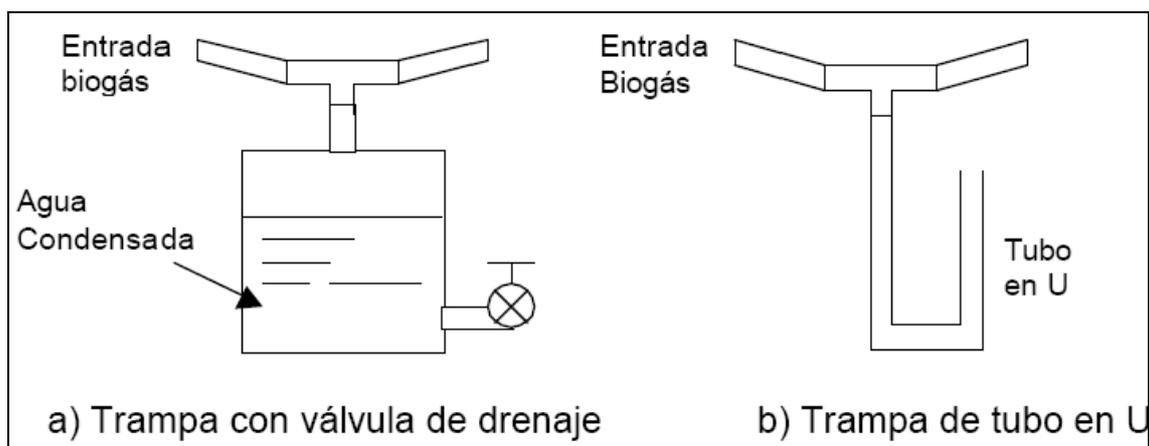
Al igual que el gas de origen fósil, el biogás constituye un combustible, es decir que al mezclarse con aire en una proporción de 1:20 es altamente explosivo por lo cual debe ser manejado con precaución y evitar a toda costa las fugas de gas, principalmente en espacios confinados.

Para el aprovechamiento adecuado del biogás es necesaria la instalación de un sistema adecuado que cuente con los siguientes implementos.

- Tuberías (cobre, plástico o acero), bombas o sopladores de gas.
- Regulador de presión.
- Medidor de flujo de gas.
- Drenaje de condensado.
- Sistema de separación de ácido sulfhídrico.

Además se debe tomar en cuenta que mientras más larga sea el sistema de tuberías de gas, la presión disminuye por lo cual en ciertos casos puede ser necesario adaptar un soplador al final de la línea. Por otro lado es indispensable considerar que el biogás posee gran saturación de agua condensada, para ello se debe proveer a la tubería de un sistema de eliminación de agua.

Gráfico N° 3.2: Sistemas de eliminación de agua condensada



Fuente: SILVA VINASCO JP, 2010.

Una vez finalizado el proceso de bio-digestión, el biogás posee un 0.1% de ácido sulfhídrico que al mezclarse con el agua condensada forma ácidos altamente corrosivos que pueden causar problemas y daños a equipos de refrigeración y de calderas. Para evitar dichos inconvenientes es posible revestir la cámara de combustión y quemadores de acero colado o acero especial de esmalte pero esta alternativa es costosa. Lo más recomendable es dotar al sistema de un filtro y así eliminar el azufre contenido en el biogás, el filtro puede ser de limadura de hierro, pero si el bio-digestor es artesanal lo más recomendado es utilizar filtros hechos a base de esponjilla de brillo la cual se debe cambiar periódicamente según su desgaste.

Gráfico N° 3.3: Sistema de eliminación de SH_2 mediante óxidos de hierro



Fuente: FLOTATS X. & CAMPOS E., 2007.

Otra alternativa para eliminar el ácido sulfhídrico es mediante la aplicación de biotecnología, éste proceso consiste en la utilización de bacterias. Las bacterias conocidas como bio-filtros al entrar en contacto con el biogás oxidan el ácido sulfhídrico degradándolo de forma natural.

3.3 USO DEL BIOGÁS

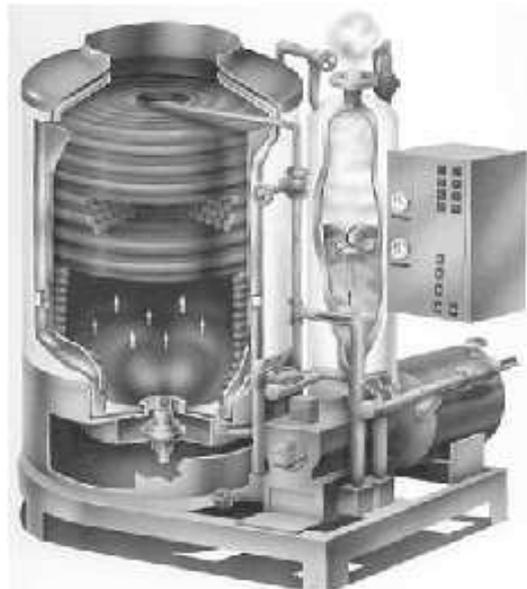
Posterior a la eliminación de agua condensada y ácido sulfhídrico el biogás contiene entre un 60 – 80% de metano por consiguiente su poder calorífico es relativamente alto, aproximadamente de 6 kWh/m^3 o lo que es lo mismo 800 BTU/pe^3 . El biogás producido es utilizado como combustible, para sustituir el uso de la leña para la cocción de alimentos. Además es una alternativa que puede sustituir en cierta medida el uso de combustibles fósiles, pues puede ser utilizado en plantas generadoras de electricidad, sustituyendo la gasolina, el diesel, el kerosene, el gas licuado de petróleo (propano) y gas natural.

En haciendas agrícolas y producciones pecuarias el biogás es aprovechado principalmente como:

- Energía lumínica.
- Calefacción para animales.
- Motores modificados; y
- Calderas de vaporización.

En el caso específico de la Hacienda San Juan en Nono de tener una producción importante de biogás, lo más recomendable sería aprovechar el biogás en una caldera de vaporización considerando que se trata de una producción pecuaria lechera.

Gráfico N° 3.4: Caldera de vaporización instantánea



Fuente: CABALLAN ALCÁNTARA J, 2010.

Este equipo de vaporización instantánea se caracteriza por la relación pequeña de agua en comparación a la cantidad de calor inyectado sobre dicho caudal de entrada. El sistema consta de un tubo que es calentado por una llama generada gracias a la quema del gas metano. Por un extremo del tubo entra agua fría y posteriormente debido a la fuente de calor a la que el tubo es

expuesto; agua caliente o vapor sale por el otro extremo del tubo. A continuación el agua caliente es utilizada para realizar la limpieza y sanitización de los sistemas cerrados ya sea para el equipo de ordeño, sistema de tuberías y/o sistemas abiertos como tanques de almacenamiento de leche y otros utensilios.

3.4 APROVECHAMIENTO DEL EFLUENTE DE SALIDA

El efluente de salida del bio-digestor constituye aproximadamente el 85% del caudal de entrada, donde el 90% corresponde a biol y el 10% a biosol. Ambos representan productos biológicos de gran calidad que puede ser aprovechado de diferente manera por quien opte por incluir la bio-digestión anaerobia dentro de una determinada actividad productiva.

La diferencia entre el biosol y biol radica en su densidad y características físico-químicas. Consecuentemente es necesario incluir dos salidas de efluente; una ubicada tres cuartas más abajo de la mitad del digestor y la otra ubicada en la base del equipo. La salida superior es por donde se evacua el biol mientras que por el ducto inferior se evacua el biosol, también un abono biológico pero de mayor densidad. Ambos, tanto biol como biosol, son de alta calidad fertilizante y es la mejor opción al momento de aprovechar el estiércol producto de la actividad ganadera.

Tabla N° 3.6: Comparación de composición nutricional entre estiércol de vaca fresco y estiércol de vaca bio-digerido

	Materia seca	Materia seca orgánica	N	P₂O₅	K₂O	MgO
Estiércol fresco	6,6	80	6,2	2,7	4,3	0,9
Estiércol bio-digerido (Biol + Biosol)	4	65	8,6	4,1	7,3	0,4

Fuente: APARCANA S., 2008.

3.4.1 El Biol

La aplicación de este compuesto natural, debido a su composición bioquímica (ver tabla N° 3.7), trae consigo beneficios como: Fertilizante, estimulante vegetal y mejorador de suelo. En la fermentación anaerobia por la presencia de las bacterias específicas que intervienen en el proceso; se producen hormonas vegetales de crecimiento. Estas fitohormonas principalmente; adeninas, citoquininas, purinas, giberalinas y auxinas; promueven la germinación de semillas, fortalecimiento de la base radicular, base foliar, engrosamiento de tallos, además de inducir la floración y fructificación de la planta.

Tabla N° 3.7: Composición del biol

COMPONENTE	CANTIDAD
COMPOSICIÓN QUÍMICA	
Materia seca	4,18%
Nitrógeno total	2,63 g/Kg
Amonio (NH ₄)	1,27 g/Kg
Fósforo (P ₂ O ₅)	0,43 g/Kg
Potasio (K ₂ O)	2,66 g/Kg
Calcio (CaO)	1,05 g/Kg
Magnesio (MgO)	0,38 g/Kg
Sodio (Na)	0,404 g/Kg
COMPOSICIÓN BIO-QUÍMICA	
Ácido indol acético	9 ng/g
Giberalinas	8,4 ng/g
Purinas	9,3 ng/g
Citoquininas	No detectado
Tiamina (Vit B1)	259 ng/g
Riboflavina (Vit B2)	56,4 ng/g
Adenina	No detectado
Ácido fólico	6,7 ng/g
Ácido pantoténico	142 ng/g
Triptofano	26 ng/g
Inositol	No detectado
Biotina	No detectado
Niacin	No detectado
Cianocobalamina (Vit B12)	4,4 ng/g
Piridoxina (Vit B6)	8,6 ng/g

Fuente: APARCANA S., 2008 & POTCH, 2004.

A su vez los beneficios que brinda la aplicación de bioles en el suelo es considerable ya que mejora el intercambio catiónico del suelo lo cual provoca un incremento en la disponibilidad de nutrientes y retención de humedad.

De consistencia líquida, los bioles son de rápida absorción y su aplicación es por vía foliar. No obstante en países con climas áridos y semiáridos del medio oriente; expertos recomiendan su aplicación por fert-irrigación, que consiste en mezclar fertilizantes con agua en proporciones determinadas y aplicar a los cultivos, ya sea por micro-aspersión, pivote central, exudación o goteo.

Ensayos y pruebas recientes realizadas en varios kibbutzim (pequeñas comunidades productivas) del norte de Israel, entre ellos Hazorea y Maagan Michael señalan que el mejor método de fert-irrigación es por goteo. Pues a través de equipos de alta tecnología permite el uso eficiente del agua y facilita la dosificación y concentración de fertilizantes según el tipo de cultivo y sus necesidades. Además mediante el uso de sistemas de mangueras y bombas facilita la irrigación en terrenos de geografía accidentada o con condiciones climáticas extremas de otra manera la aplicación de abonos demandaría un gran esfuerzo físico para los trabajadores. En conjunto todo este sistema se traduce en reducción de costos y por ende mayores beneficios económicos.

3.4.2 El Biosol

El segundo efluente de salida del bio-digestor es el biosol, este producto biológico al igual que el biol brinda al ganadero o agricultor algunas opciones de aprovechamiento. Puede ser aprovechado como fertilizante, sustrato en cultivos orgánicos, hidropónicos o de invernadero y mejora la estructura de suelos arenosos y arcillosos.

Tabla N° 3.8: Composición del biosol

COMPONENTE	CANTIDAD
Agua	15,70%
Sustancia orgánica seca	60,30%
Nitrógeno	2,70%
Fósforo (P ₂ O ₅)	1,60%
Potasio (K ₂ O)	2,80%
Calcio (CaO)	3,50%
Magnesio (MgO)	2,30%
Sodio (Na)	0,30%
Azufre (S)	0,30%
Boro (B)	64 ppm

Fuente: APARCANA S., 2008.

Lo más recomendable es utilizar el biosol de la misma manera que se aplica el compost, con la diferencia de que la cantidad de biosol que se aplica anualmente varía. Pues se debe aplicar entre 2 – 4 toneladas/ hectárea/ año según el cultivo y requerimiento nutricional del mismo. En contraste al utilizar compost se recomienda aplicar entre 10 – 30 toneladas/ hectárea/ año.

La utilización de este material producto de la digestión anaerobia trae consigo más de una ventaja, pues el uso de biosol regula la alimentación y absorción de nutrientes por parte de la planta, lo cual se traduce en fortalecimiento vegetal. A su vez la aplicación de biosol mejora la retención de humedad en el suelo, brinda mayor cohesión a suelos arenosos e incrementa la porosidad de suelos arcillosos y regula su permeabilidad y ventilación. Por consiguiente la aplicación de biosol permite al agricultor y ganadero el uso intensivo del suelo y su consecuente aumento en la producción de pasto o de cualquier cultivo.

Al descomponer la materia orgánica por métodos aerobios (en presencia de oxígeno) las pérdidas de carbono y nitrógeno son del 18% y 33% respectivamente. En contraste a través de un método anaerobio las pérdidas de nitrógeno y carbono son apenas del 1% y 7% (Raúl Botero B. y Thomas R.

Preston, 1987). Por consiguiente representa un abono de alto valor nutricional y de baja carga orgánica, es decir, abono esterilizado que a diferencia de abonos de origen aerobio o abono animal fresco (estiércol), evita; insectos indeseables, plagas, hongos y enfermedades, beneficiando así la sanidad del cultivo y por ende los productos agrícolas que se obtienen del mismo, sea pasto, frutas, hortalizas u otro tipo de bien agrícola.

En síntesis se puede enlistar varias ventajas que presenta la digestión anaerobia y el aprovechamiento de los efluentes de salida (biol y biosol):

- Estimula y fortalece los diferentes tejidos vegetales.
- Aumenta la disponibilidad de nutrientes en el suelo.
- Mejora la estructura del suelo y crea un ambiente propicio para cultivar.
- Reduce la cantidad y costos de fertilizantes químicos.
- Permite el uso intensivo del suelo.
- Incrementa la producción agrícola-pecuaria, minimiza costos y maximiza utilidades financieras.
- Reduce notablemente la carga orgánica y por ende microorganismos patógenos.
- Alto contenido de nitrógeno orgánico convertido en amoníaco.
- Baja viscosidad.
- Reduce la contaminación de aguas superficiales y subterráneas.
- Reduce malos olores al consumir los ácidos volátiles.

En conjunto estas características hacen del bio-abono un producto de bajo costo que brinda excelentes resultados al ser aplicado en cultivos ya sean extensivos o intensivos. Por otro lado de haber un excedente puede ser comercializado y generar ingresos económicos adicionales al recinto productivo.

CAPÍTULO IV

4 ANÁLISIS DE LA HACIENDA SAN JUAN

4.1 GENERALIDADES DE LA HACIENDA SAN JUAN

La Hacienda San Juan se localiza en la parroquia de San Miguel de Nono, ubicada a 2.850 metros sobre el nivel del mar. Se encuentra a 20 kilómetros del Noroccidente de la ciudad de Quito. Para arribar a esta parroquia es necesario recorrer caminos secundarios lo cual toma 40 minutos.

La zona ganadera de Nono se caracteriza por tener una temperatura media entre de 14 – 15 grados centígrados, temperatura mínima entre 8 – 10 grados centígrados y máxima de 24 grados centígrados en el verano. Se ha determinado una época lluviosa entre los meses de noviembre y mayo, no obstante en esta parroquia perteneciente a la provincia de Pichincha no se puede determinar con precisión las diferentes estaciones del año.

El ganado que se maneja en este recinto ganadero corresponde a la raza Holstein Frisen, esta raza es originaria de la región europea de Frisia, Holanda del Norte y Alemania y se caracteriza por su alto rendimiento para la producción de carne y leche, razón por la cual se ha convertido en la raza vacuna más popular alrededor del mundo. Al nacer tiene un peso de 40 kilogramos mientras que las hembras adultas alcanzan un peso de 600 kilogramos y los toros adultos llegar a pesar hasta 1.000 kilos.

Otra caracteriza del ganado Holstein Frisen es la adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales frente a otras razas. En la hacienda San Juan con el objeto de facilitar la adaptación de los animales se ha combinado genéticamente ganado criollo y Holstein Frisen, manejando una producción promedio de 15 litros al día por cabeza. Debe anotarse que cuando las vacas

suben al establo para ser ordeñadas es el único momento en el cual es posible recolectar el estiércol para alimentar al bio-digestor a ser construido.

Tabla N° 4.1: Producción de excretas según el tamaño del ganado

Tamaño	Cantidad de excretas por día. (kg.)
Grande	15
Mediano	10
Pequeño	8
Ternero	4

Fuente: MARTÍNEZ, Carlos, 2010.

La hacienda cuenta con un total de 76 cabezas de ganado lechero Holstein Frisen Criollo distribuidas de la siguiente forma:

Tabla N° 4.2: Clasificación del ganado en la Hacienda San Juan

Vacas *	24
Vaonas medias	5
Vaonas fierro	20
Terneras de leche -*	5
Toros reproductores	2
Vaonas vientre	16
Toretas	2
Terneros machos (futuros reproductores)	2
TOTAL	76

Fuente: Autor.

*Nota: Se puede aprovechar únicamente el estiércol de las Vacas y Terneras en el bio-reactor puesto que solo estos dos llegan al establo para la respectiva recolección de estiércol.

Fotografía N° 4.1: Ganado Holstein Frisen – criollo Hacienda San Juan



Fuente: Autor.

Como es usual en la sierra ecuatoriana, actualmente, todo el estiércol generado durante el proceso de ordeño es desechado a través de una tubería a un riachuelo contaminando el ambiente y alterando el ecosistema. De la misma manera muchas haciendas de la zona realizan el mismo procedimiento para desechar el estiércol.

Fotografía N° 4.2: Desfogue de estiércol y orines en la Hacienda San Juan



Fuente: Autor.

Las excretas animales producto de la actividad ganadera que son desechadas a riachuelos, ríos, lagunas u otro tipo de fuente natural reducen los niveles de oxígeno en el agua provocando la muerte de factores bióticos. Adicionalmente se generan concentraciones de fósforo de 0,01 mg/L (Kiely, 1999) lo cual promueve la floración de algas de manera exagerada y también constituye un impacto ambiental negativo para el desarrollo de otro tipo de vida acuática.

Considerando la contaminación que causa el desecho de estiércol animal no tratado; en los últimos meses las leyes ecuatorianas se han modificado y actualmente el nuevo código de la producción dicta que toda producción pecuaria obligatoriamente debe realizar tratamiento a los desechos producto de la actividad pecuaria que se realiza.

Hoy en día la producción de leche y crianza de ganadería bovina se ha multiplicado en varios puntos de la Sierra norte y centro, sin embargo son pocas las haciendas que cumplen con este requisito, por el contrario la mayor parte de fincas ganaderas contaminan de manera descontrolada el entorno natural donde se desarrollan; esto incluye la modificación de fuentes hídricas superficiales, subterráneas y suelos.

4.2 COSTOS RELACIONADOS

La Hacienda San Juan utiliza energía eléctrica para el funcionamiento del equipo de ordeño mecánico y para la elaboración de balanceado mediante el uso de un molino. Es así que la Hacienda San Juan requiere un promedio de 412 kw/h al mes, pagando un total de US\$ 38,26 al mes por concepto de servicio eléctrico. Adicionalmente se utiliza 1 cilindro de gas doméstico al mes con el fin de calentar agua para realizar la limpieza y sanitización de las instalaciones de ordeño, lo cual representa un costo de US\$ 2,50 mensual. A través del bio-digestor se espera que la finca pueda reducir la cantidad de gas que compra a terceros, consecuentemente reducir los costos de producción.

Con el fin de abonar 10 hectáreas de potreros, además de los costos explicados anteriormente, la Hacienda San Juan incurre en gastos por concepto de abono; anualmente se consume 40 sacos (50 kilos c/saco) de úrea y 30 sacos de fertilizante 10-30-10 lo cual representa un desembolso mensual de US\$ 110, 80.

Tabla N° 4.3: Costos actuales en que incurre la Hacienda San Juan relacionados a energía y fertilización

		Requerimiento mensual	Requerimiento anual	Valor unitario US\$	Costo mensual US\$	Costo anual
E. Térmica (m3 de gas)		18,15	217,8	0,14	2,5	30
Fertilización (Quintales)	Urea	3,33	40	10	33,3	400, 00
	10-30-10	2,5	30	30	75	900
TOTAL					110,8	1.330,00

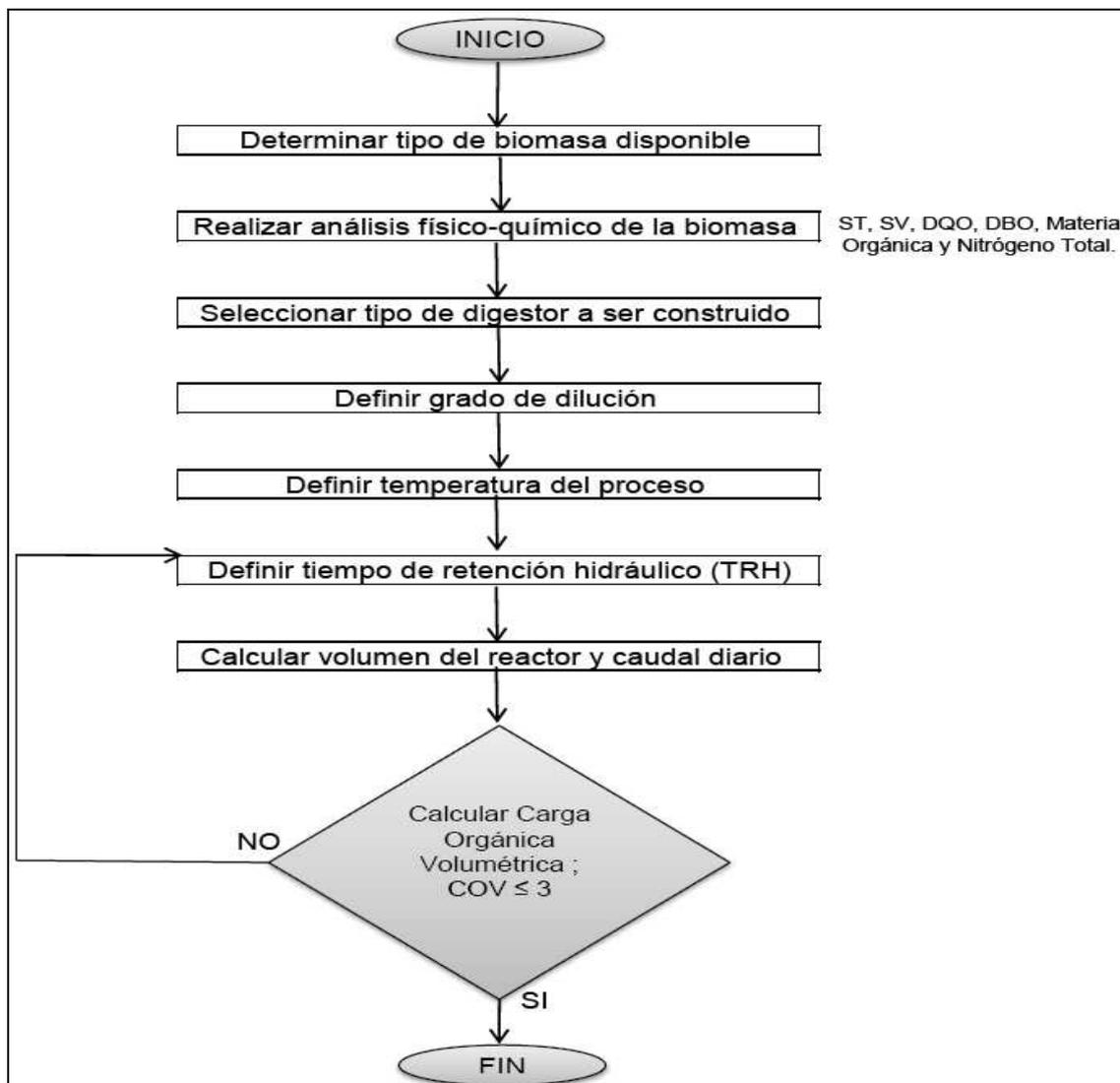
Fuente: Autor.

CAPÍTULO V

5 DISEÑO, DIMENSIONAMIENTO Y POTENCIAL DEL BIO-DIGESTOR

En el caso de la Hacienda San Juan la entrada del proceso es la necesidad de energía y de fertilizantes. Una vez analizado las características del recinto producto, la planificación de un bio-digestor incluye las siguientes etapas.

Gráfico N° 5.1: Diagrama de flujo para el diseño de un bio-digestor



Fuente: Autor.

5.1 TECNOLOGÍA Y DISEÑO ESTRUCTURAL

Para este proyecto se ha seleccionado la construcción de un reactor continuo de mezcla completa puesto que la hacienda genera desechos animales a diario, y el bio-digestor debe alimentarse todos los días. Además este tipo de reactor es más económico en comparación a otro tipo de reactores y según los estudios realizados brindaría mayor beneficio a la Hacienda San Juan.

Fotografía N° 5.1: Durante la construcción del bio-digestor



Fuente: Autor.

El reactor de mezcla completa consiste de un sistema hermético anaerobio. Dicho tanque posee tres capas. La capa interna está diseñada de polietileno y es la que está en contacto con el sustrato. La capa media es de lana de vidrio con un espesor de 10 centímetros la cual cumple la función de aislante térmico. Finalmente cuenta con una tercera capa externa de latón galvanizado la cual

está en contacto con la intemperie y evitar que la lana de vidrio se moje. La capa externa de latón también representa una medida de seguridad industrial al proteger el reactor de cualquier golpe u objeto corto punzante. En caso de incendio representa un casco de tolerancia al aislar el gas metano de la flama reduciendo así el riesgo de explosión y sus consecuencias.

Fotografía N° 5.2: Estructura del tanque



Fuente: Autor.

El reactor también cuenta con otros elementos cada uno con su respectiva llave de paso como son:

- Entrada de caudal (afluente) (Gráfico N° 5.2, literal A) de 2 pulgadas de diámetro en la parte superior del tanque. Por aquí se alimenta el biodigestor con sustrato (estiércol – agua al 10% de sólidos totales).
- Salida de caudal 1 para evacuar el biosol, localizadas en la parte inferior de 1½ pulgada.

- Salida de caudal 2 para evacuar el biol, ubicada a una altura media del tanque, su diámetro es de 1 ¼ pulgada.

Las dos salidas de caudal de la parte inferior del tanque sirven para evacuar el efluente de salida. La primera salida de efluente (Gráfico N° 5.2, literal F) consta de una manguera a la altura de la base del tanque de un diámetro de 1 pulgada para evacuar el efluente de mayor densidad como son los lodos.

La segunda salida de efluente (Gráfico N° 5.2, literal G) es facilitada por una manguera de 0.5 pulgadas de diámetro ubicada a una altura media del tanque, aquí se evacua el efluente de menor densidad como son los bioles. Ambos efluentes de salida cuentan con llaves de paso para el control del caudal. Dichos efluentes son recolectados en contenedores auxiliares (Gráfico N° 5.2, literal F1 y G1) para posteriormente ser utilizados como abono ya sea para la Hacienda San Juan o para ser comercializados por la propia hacienda como una fuente secundaria de ingresos económicos.

Mientras que el tercer ducto de salida se localiza en la parte superior del tanque y da paso al biogás (Gráfico N° 5.2, literal B). Posteriormente el biogás pasa por dos tipos de filtro; un filtro para eliminar el vapor de agua (Gráfico N° 5.2, literal C); este consiste de un recipiente plástico con agua hasta la mitad por donde circula el gas, aquí el vapor de agua se condensa mientras que el biogás sigue su camino en dirección a un segundo filtro de eliminación de ácido sulfhídrico (Gráfico N° 5.2, literal D) fabricado a base de esponjilla de alambre. Finalmente el biogás es almacenado en una boya flexible de geo-membrana (Gráfico N° 5.2, literal E).

Considerando el hecho de que la agitación y mezcla del sustrato es clave para el éxito del proyecto, el reactor cuenta con un mezclador metálico de acero (Gráfico N° 5.2, literal H) con tres hélices (Gráfico N° 5.2, literal H1, H2 & H3). Dicho impelente triple gira manualmente sobre una base de cobre ubicada en

la parte inferior del tanque y se sostiene en la parte superior por un juego de rulimanes que permiten su giro circular mas no vertical u horizontal.

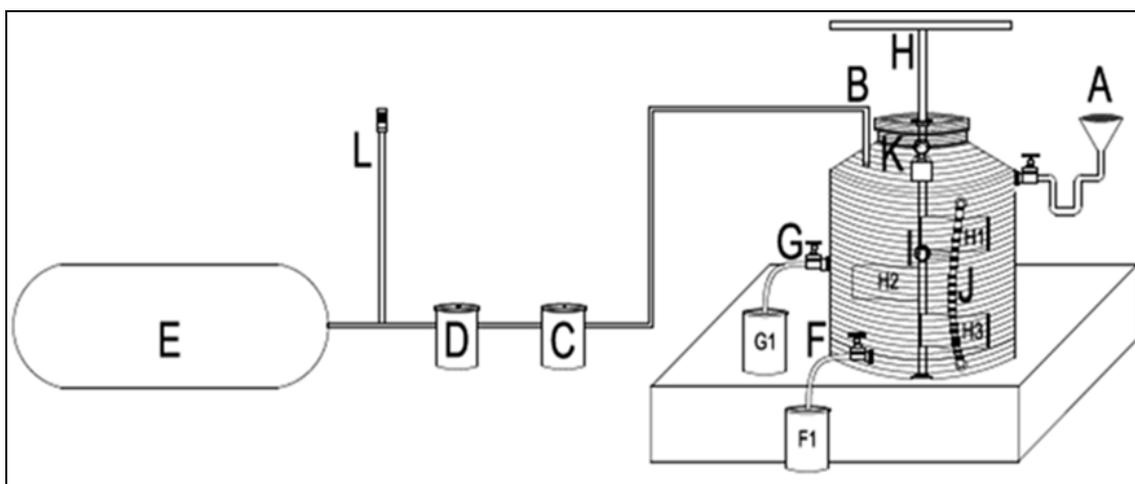
Fotografía N° 5.3: Piezas del sistema de mezclado

Manubrio	 A photograph showing a vertical metal shaft with a handle at the top, mounted on a blue circular base. The shaft is surrounded by a metal frame structure.
Mezclador	 A photograph of a vertical metal shaft with a large, flat, rectangular mixing blade attached to its side. The shaft is positioned on a concrete floor.
Sistema superior de rulimanes	 A close-up photograph of a metal roller bearing assembly, consisting of an inner ring, an outer ring, and balls, mounted on a blue surface.
Eje inferior	 A close-up photograph of a metal shaft with a large, circular flange or bearing housing at the bottom, resting on a dark surface.

Fuente: Autor.

Adicionalmente, el reactor cuenta con tres accesorios de control; termómetro (Gráfico N° 5.2, literal I), manómetro (Gráfico N° 5.2, literal K) y medidor de nivel (Gráfico N° 5.2, literal J) y antorcha (Gráfico N° 5.2, literal L) para quemar el biogás en caso de haber excedente. Y el pH se mide realizando soluciones con los efluentes de salida mediante la utilización de papel tornasol hasta lograr estabilizar el proceso.

Gráfico N° 5.2: Diagrama y Diseño del Bio-digestor



Fuente: Autor.

5.2 TEMPERATURA Y TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO

Anteriormente se explicó la influencia de varios factores físico – químicos en el proceso de bio-digestión (ver capítulo 4). Uno de estos factores es la temperatura. El proceso biológico puede ser de tipo psicrófilo; temperatura inferior a 20 grados centígrados, mesófilico; entre 30 y 40 grados centígrados o termófilo; entre 50 y 70 grados centígrados.

En este proyecto se ha decidido desarrollar el proceso biológico a una temperatura promedio de 30 grados centígrados, es decir que las bacterias se desenvuelven en un medio mesófilo. Para tomar dicha decisión se ha desarrollado la siguiente tabla de juzgamiento del 1 al 3, en donde 1 corresponde lo menos conveniente y 3 lo más conveniente. Finalmente el medio de mayor puntaje es seleccionado.

Tabla N° 5.1: Juzgamiento y selección de temperatura del proceso

Medio	Rango de temperatura	Parámetros de juzgamiento			
		Estabilidad biológica del proceso	Cantidad de biogás producido	Calidad y facilidad de uso del biogás	Disminución (higienización) de carga orgánica de la carga inicial
Psicrófilo	Menor a 20°C	3	1	1	1
Mesófilo	30 – 40°C	2	2	3	2
Termófilo	50 – 70°C	1	3	2	3

Medio	Rango de temperatura	Parámetros de juzgamiento			
		Tiempo de retención hidráulico	Complejidad de manejo	Demanda de vigilancia y control	Monto a invertir
Psicrófilo	Menor a 20°C	1	3	3	3
Mesófilo	30 – 40°C	2	2	2	2
Termófilo	50 – 70°C	3	1	1	1

Medio	Rango de temperatura	Puntaje total
Psicrófilo	Menor a 20°C	16
Mesófilo	30-40°C	17
Termófilo	50-70°C	15

Fuente: Autor.

Una vez determinada la temperatura de trabajo, es posible definir el tiempo de retención hidráulico (TRH). El TRH varía en función de la temperatura. Como ya se indicó anteriormente el TRH es el parámetro físico que explica el tiempo que permanece el agua dentro del bio-digestor. No obstante, el TRH también representa una orientación técnica para definir el tiempo que demora el reactor en generar gas metano una vez arrancado. En otras palabras describe el tiempo que tardan las bacterias que interactúan a lo largo del proceso en alcanzar la fase metabólica donde producen gas (CH_4). Tomando en cuenta que en este caso se trabaja con una temperatura equivalente a 30 grados centígrados se establece un TRH orientativo de 30 días.

5.3 DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR Y VOLUMEN DEL CAUDAL

Para determinar el volumen del reactor (V_R) y caudal (Q_o) es necesario remitirse al modelo cinético de bio-digestión explicado y desarrollado en el capítulo 1, pues es sumamente importante entender que el tiempo de retención hidráulico se refiere al tiempo que los fluidos tardan en atravesar el sistema, consecuentemente se entiende que existe relación directa entre en V_R , Q_o y el TRH. Expresado matemáticamente con la siguiente ecuación:

$$\text{TRH} = V_{r \text{ final}} / Q_o \quad \longrightarrow \quad Q_o = V_{r \text{ final}} / \text{TRH}$$

Tal como se determinó anteriormente el TRH es de 30 días. A su vez, se ha definido un $V_{r \text{ final}}$ de 600 L. Este volumen incluye el 10% de espacio libre que debe tener el reactor para facilitar el proceso biológico, es decir que el volumen útil es igual a 540 L.

Finalmente, una vez aplicada la ecuación expuesta se obtiene los siguientes resultados:

$Q_o = 600 \text{ Litros} / 30 \text{ días}$; y se obtiene un caudal de entrada de 20 Litros/día.

Fotografía N° 5.4: Bio-digestor terminado y listo para su instalación en campo



Fuente: Autor

5.4 PRODUCCIÓN ESPERADA DE BIOGÁS

Para estimar la producción de biogás es necesario realizar un análisis de laboratorio del sustrato, en este caso estiércol de vaca. Para el análisis se tomó varias muestras alrededor del establo de ordeño. A continuación se hizo una mezcla para obtener una sola muestra representativa la cual fue analizada en el laboratorio de química ambiental de la Universidad Central del Ecuador. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla N° 5.2: Informe de resultados posterior al análisis del sustrato

Parámetros	Unidades	Resultados	Método aplicado
Humedad	%	82.5	Gravimétrico
Sólidos totales	%	17.5	Gravimétrico
Sólidos volátiles	%	3.6	Gravimétrico
DQO	mg/Kg	304 440	Colorimétrico Merck
DBO5	mg/Kg	146 429	Winkler
Materia orgánica	%	13.45	Titulométrico
Nitrógeno total	%	0.58	Kjeldahl

Responsable: Dra. Jenny Murillo.

Una vez expuestos los resultado de laboratorio es posible aplicar la siguiente ecuación para estimar la producción biogás; compuesto en un 60 - 70% por metano (CH₄), 30 - 40% dióxido de carbono (CO₂), 1% hidrógeno (H₂), 0.5% de nitrógeno (N₂), 0.1% monóxido de carbono (CO), 0.1% de oxígeno (O₂) y 0.1 % de ácido sulfhídrico (H₂S).

$P_v = a \times n \times Q_o \times C_i$ [m³/día] (KIELY, 1999.)

P_v: Producción de biogás [m³]

a: Constante de producción de biogás ≈ 0,35 [m³/kg]

n: fracción de DQO biodegradable (0,85)

Q_o: Caudal diario [m³/día]

C_i: DQO afluente [kg/m³]

Al considerar una densidad promedio del estiércol igual a 1,04 kg/L (KIELY, 1999);

$$P_v = (0,35 \text{ m}^3/\text{kg}) \times (0,85) \times (20 \text{ L/día}) \times (0,316617 \text{ kg/L})$$

$$P_v = 1,88 \text{ m}^3/\text{día}$$

Sin embargo, el considerar una producción de biogás equivalente a 1,88 m³/día es extremadamente elevada, por consiguiente se ha determinado que al igual

que en experiencias anteriores el análisis de laboratorio no es exacto comparado con datos bibliográficos en cuanto a la Demanda Química de Oxígeno (DQO), esto debido a los métodos y procedimientos aplicados por el analista de laboratorio.

En consecuencia es necesario estimar la producción diaria de biogás con valores de composición promedio obtenidos de fuentes bibliográficas fiables. En donde la composición de excremento bovino en términos de DQO es igual a 36 200 mg/L. (KIELY, 1999).

$$P_v = (0,35 \text{ m}^3/\text{kg}) \times (0,85) \times (20 \text{ L/día}) \times (0,036200 \text{ kg/L})$$

$$P_v = 0,21 \text{ m}^3/\text{día}$$

Este resultado representa un valor más fiable y real. Una vez que se conoce la producción diaria de biogás es fundamental calcular la capacidad de almacenamiento de la bolsa de geo-membrana, lo recomendable es una que pueda contener el doble de la producción diaria, es decir, en este caso la bolsa de geo-membrana deberá ser de $0,42 \text{ m}^3$. Sin embargo para mayor seguridad la geo-membrana tendrá una capacidad de $0,5 \text{ m}^3$.

5.4.1 Análisis de Carga Orgánica Volumétrica

Un factor fundamental a ser analizado es la carga orgánica volumétrica (COV) del sustrato. La COV constituye la cantidad de sustrato existente en el reactor, en este caso el sustrato disponible en 540 litros. Flotats X. 2007, dice que el cálculo de este valor debe ser cercano a 2, mientras más cercano, mayor eficiencia del reactor. El primer paso es evaluar la concentración de sustrato en el caudal y posteriormente se procede a evaluar el COV.

$$S_o = 0,97 \text{ kg} / 20 \text{ L} = 0,0485 \text{ kg/L} = 48,5 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{COV} = (Q_o \times S_o) / V_r \longrightarrow \text{COV} = S_o / \text{TRH} \longrightarrow \text{COV} = 37,44 \text{ kg/m}^3 / 30 = 1,24$$

Como se puede apreciar el COV es 1, 24 por lo tanto es necesario corregir el COV.

$$\text{TRH}_c = S_o / 2 \longrightarrow \text{TRH}_c = 48,5 \text{ kg/m}^3 / 2 = 24,25 \longrightarrow \text{TRH}_c \approx 24$$

Una vez corregido el COV se establece que el tiempo de retención hidráulico en lugar de ser de 30 días, debe ser de 24 días con el fin de aumentar la eficiencia del proceso anaerobio.

5.5 PRODUCCIÓN DE ABONOS

Tal como se explicó en secciones anteriores, el bio-digestor cuenta con dos efluentes de salida, lugar por donde se recolecta lodos y bioles, productos con un gran valor nutricional para el suelo. La primera salida (ver gráfico N° 5.2, literal F) es por donde se evacuan lodos, mientras que el segundo conducto de salida (ver gráfico N° 5.2, literal G) cumple la función de evacuar bioles. Posteriormente dichos efluentes son recolectados en contenedores auxiliares (ver gráfico N° 5.2, literal F1 y G1).

Para determinar el volumen de bioles producidos por el reactor se debe considerar el caudal de entrada igual a 20 L/día (Q_o) y el tiempo de retención hidráulico corregido (TRH_c) del sistema; 24 días. Es decir que una vez arrancado el bio-digestor, el Q_o tarda 24 días en ser procesado por el sistema microbiológico del reactor. Posterior a este TRH_c ; el 80% del caudal de entrada es evacuado en forma de bioles. Es decir 16 L de bioles son evacuados del sistema y está listo para ser aprovechado como fertilizante de baja densidad. Se espera que transcurridos 24 días de la instalación del bio-digestor, este produzca 16 L de bioles diarios lo que equivale a una producción mensual de 480 litros de bioles.

A su vez los lodos se acumulan a diario a razón de un 20% del caudal diario y se evacuan cada 10 días cuando se obtiene 40 L. Para ello cada 10 días es

necesario no realizar labores de mezclado con el propósito de que los lodos se precipiten al fondo del tanque y así facilitar su evacuación. Como resultado a final de cada mes se habrá recaudado un total de 120 L de fertilizante de alta densidad llamado biosol.

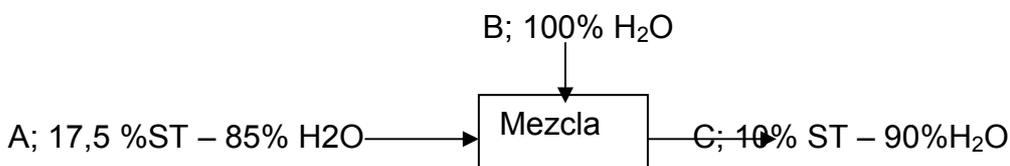
5.6 ARRANQUE DEL BIO-DIGESTOR

Para dar inicio al proceso de bio-digestión anaerobia es preciso realizar un balance de masa y calcular un 10% de sólidos totales en la mezcla estiércol-agua (caudal de entrada):

A: Estiércol fresco, compuesto por; 17,5 % sólidos totales – 85% agua.

B: Agua, compuesto por 100% agua.

C: Caudal de entrada; 20 Litros; compuesto por 10% sólidos totales – 90% agua.



Ecuación 1.

Balance de masa global.

$$A + B = C$$

$$A + B = 540 \text{ L}$$

Ecuación 2.

Balance de masa por componente sólido.

$$0,175 A + 0B = 0,10 (540L)$$

$$0,175 A = 54 \text{ L}$$

$$A = 54 \text{ L} / 0,175$$

$$A = 308,57 \text{ L}$$

Reemplazo de A en ecuación 1.

$B = 540 \text{ L} - 308,57 \text{ L}$

$B = 231,43 \text{ L}$

Como se puede observar para que la mezcla estiércol-agua sea óptima ésta debe estar compuesta por 308,57 L de estiércol y 231,43 L de agua.

Fotografía N° 5.5: Reactor instalado en campo y arranque del mismo en la Hacienda San Juan



Fuente: Autor.

CAPÍTULO VI

6 RESULTADOS

El bio-gestor que se construyó en la Hacienda San Juan y su potencial presenta las siguientes características:

Tabla N° 6.1: Especificaciones técnicas del reactor

Concepto	Detalle
Tecnología	Reactor continuo de mezcla completa
Volumen del reactor	600 L
Volumen útil del reactor	540 L
Tiempo de retención hidráulico inicial	30 días
Tiempo de retención hidráulico corregido	24 días
Temperatura	30°C
Caudal	20 L /día
Concentración de sustrato	37, 44 kg/m ³
Carga orgánica volumétrica inicial	1, 24
Carga orgánica volumétrica corregida	2
Producción de biol	16 L/día
Producción de biosol	4 L/día
Potencial de producción de biogás	0,21 m ³ / día
Capacidad de almacenamiento de biogás	0,5 m ³

Fuente: Autor.

Una vez arrancado el bio-digestor se logró estabilizar el proceso anaerobio; su producción de gas y abonos 15 días después del arranque del mismo a través de una recirculación del sustrato.

Fotografía N° 6.1: Bio-digestor terminado y en funcionamiento en la Hacienda San Juan



Fuente: Autor.

Puesto en marcha este proyecto se notó una gran diferencia entre las condiciones del establo y la presencia de desechos en este lugar, se observó claramente mayor limpieza y una reducción notable de malos olores gracias al aprovechamiento de estiércol el cual anteriormente era acumulado en el establo hasta por 15 días y constantemente vertido a un riachuelo a través de una instalación de tuberías.

Fotografía N° 6.2: Condiciones del establo en la Hacienda San Juan antes y después de poner en marcha el proyecto



Fuente: Autor.

CAPÍTULO VII

7 ANÁLISIS FINANCIERO

A fin de implementar el proceso de digestión anaerobia en la Hacienda San Juan se ha construido un bio-digestor de mezcla completa cuya inversión se detalla a continuación:

Tabla N° 7.1: Desglose de la inversión del proyecto

Descripción	Cantidad	Valor unitario US\$	Valor Total US\$
Bolsa de geo-membrana de 0,5 m3	1	200,00	200,00
Tanque con sello hermético	1	93,03	93,03
Cobertura de tol galvanizado	1	60,00	60,00
Termómetro	1	45,00	45,00
Adecuación de piezas en hierro	1	44,00	44,00
Válvula compuerta 1 1/2"	1	31,39	31,39
Válvula compuerta 1 1/4"	1	22,91	22,91
Válvula compuerta 1"	1	17,70	17,70
Llave de 10	1	13,38	13,38
Cinta adhesiva aluminio reforzada	1	12,00	12,00
Manómetro	1	11,04	11,04
Sellante polipropileno	1	8,96	8,96
Válvula esférica de gas	4	8,48	33,92
Rodamiento rígido	1	7,20	7,20
Caucho cuadrado 13x13	2	5,75	8,63
Adaptador polipropileno 1 1/2"	2	5,57	11,14
Embudo para cambio de aceite	1	5,35	5,35
Juego de tarraja (Sacabocados)	1	4,46	4,46
Nepló polipropileno 1/2" x 15cm	3	4,42	13,26
4 kilos hierro	1	4,40	4,40
Empaque de puertas	1,50	4,00	6,00
Adaptador polipropileno 1 1/4"	1	3,84	3,84
Adaptador polipropileno 1"	1	3,59	3,59
Pitón gas	3	3,52	10,56
Lana de vidrio con aluminio	10	3,50	35,00
Adaptador	1	3,50	3,50
Lana de vidrio con aluminio	6	3,50	21,00
Codo polipropileno 1/2"	2	3,20	6,40
Adaptador de gas macho 1/2	3	3,13	9,39
Empaque suave de caucho	1,35	2,70	3,65
Adaptador para tanque de 3/4"	2	2,33	4,66
Conector tee para gas	1	2,24	2,24
Retenedor	1	2,23	2,23
Adaptador de gas hembra 1/2	2	2,23	4,46
Embase de plástico con tapa rosca	2	2,11	4,22
Unión polipropileno 1/2"	2	2,06	4,12
Cr Llaves mixtas 8mm	2	1,78	3,56
Nepló polipropileno 1/2" corrido	1	1,67	1,67
Pitón de gas hembra	2	1,14	2,28
Adaptador de manguera de 1" a 1/2"	2	0,9	1,8
Manguera de gas	10	0,85	8,50
Tapón polipropileno de 1"	1	0,64	0,64
Rodela de aluminio cobre 14mm	3	0,36	1,08
Empaque de caucho 1/2	10	0,30	3,00
Abrazadera de gas 3/4	7	0,27	1,89
Teflón	10	0,22	2,20
Tapón polipropileno de 1/2"	1	0,20	0,20
Perno 5x0,8x50mm	6	0,18	1,08
Abrazadera de gas	3	0,13	0,39
Perno 5x0,08x50mm	6	0,12	0,72
Rodela presión 3/8	8	0,05	0,40
Tuerca 5x0,8mm	6	0,04	0,24
Tuerca milimétrica 5 x 0,8	6	0,04	0,24
Rodela plana 5mm	24	0,03	0,72
SUBTOTAL US\$			803,23
I.V.A US\$			96,39
TOTAL US\$			899,62

Fuente: Autor.

Para determinar los ingresos se ha considerado lo siguiente:

Este proyecto busca producir bio-abonos (biol y biosol) que pueden ser aprovechados en la propia hacienda o bien comercializados y representar un ingreso económico adicional para este recinto. Además producirá biogás con lo cual se reducirá los costos de energía térmica.

Para determinar los precios de los bio-abonos se utilizó como referencia los precios de venta al público que maneja una empresa del Austro Ecuatoriano especializada en la producción de abonos y fertilización orgánica, esta empresa comercializa el biol a US\$ 0,50 el litro y el biosol a US\$ 0,16 el litro. Los productos que esta empresa distribuye son similares a los que se obtendría aplicando esta tecnología.

Con el propósito de dar mayor seguridad financiera al proyecto, se ha decidido realizar los cálculos financieros con un valor que representa el 50% del precio de venta al público del biol y biosol, valores que son muy conservadores en relación al precio de mercado.

Para calcular el precio del biogás se ha tomado como referencia el precio del gas fósil en el Ecuador incluido el transporte de este hasta la Hacienda San Juan considerando que actualmente el precio del gas es subsidiado por el Gobierno.

Gracias a la aplicación de la tecnología del bio-reactor los productos a obtener y su valor de comercialización son los siguientes:

Tabla N° 7.2: Valor comercial de los productos a obtener

Concepto	Unidad	Precio unitario US\$
Biogás	Metros cúbicos	0,14
Biol	Litros	0,25
Biosol	Litros	0,08

Fuente: Autor.

Al considerar las características técnicas del bio-digestor, el potencial del mismo y tomando en cuenta la paralización y arranque del equipo una vez al año para llevar a cabo labores de mantenimiento, se estima una producción anual de: 69,30m³ de biogás, 5.280 litros de biol y 1.320 litros de biosol.

Tabla N° 7.3: Producción estimada e ingresos por año

Actividad o estado del equipo	Mes	Gas (m3)	Biol (L)	Biosol (L)	Ingreso por biogás US\$	Ingreso por biol US\$	Ingreso por biosol US\$	Ingreso total US\$
Mantenimiento y arranque	1	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Funcionamiento	2	6,30	480	120	0,87	120,00	9,60	130,47
Funcionamiento	3	6,30	480	120	0,87	120,00	9,60	130,47
Funcionamiento	4	6,30	480	120	0,87	120,00	9,60	130,47
Funcionamiento	5	6,30	480	120	0,87	120,00	9,60	130,47
Funcionamiento	6	6,30	480	120	0,87	120,00	9,60	130,47
Funcionamiento	7	6,30	480	120	0,87	120,00	9,60	130,47
Funcionamiento	8	6,30	480	120	0,87	120,00	9,60	130,47
Funcionamiento	9	6,30	480	120	0,87	120,00	9,60	130,47
Funcionamiento	10	6,30	480	120	0,87	120,00	9,60	130,47
Funcionamiento	11	6,30	480	120	0,87	120,00	9,60	130,47
Funcionamiento	12	6,30	480	120	0,87	120,00	9,60	130,47
TOTAL		69,30	5.280	1.320	9,55	1.320,00	105,60	1.435,15

Fuente: Autor.

En cuanto a la determinación de costos y gastos del proyecto, el único desembolso corresponde a mano de obra, pues es necesario considerar que el bio-digestor no trabaja por sí solo por lo cual se requiere de una persona que colabore por una hora diaria los 365 días del año para asegurar el correcto funcionamiento del equipo.

El Ministerio de Relaciones Laborales del Ecuador establece que si un trabajador labora más de 40 horas semanales, se debe remunerar al empleado con el doble de salario por hora trabajada los fines de semana. Tal como se explicó anteriormente este proyecto demanda de un trabajador incluso en días feriados y fines de semana, pero de acuerdo a información proporcionada por

el administrador de la Hacienda San Juan, se determinó que los trabajadores no ganan horas extras ya que se trabaja con la modalidad de turnos para que ningún trabajador, incluso durante fines de semana o feriados, exceda el máximo de 40 horas de trabajo a la semana. Por consiguiente las horas que se dediquen al bio-digestor se consideran como horas de trabajo ordinario y se remuneran como tal.

Tabla N° 7.4: Costo real de mano de obra para trabajadores en general, pequeña industria, maquila, agrícolas y servicio doméstico

Concepto	Valor mensual US\$
Remuneración básica mínima unificada	264,00
Décimo tercera remuneración	22,00
Décimo cuarta remuneración	22,00
Fondo de reserva	22,00
Aporte al IESS (11.15%)	29,43
CNCF (0.50%)	1,32
IECE (0.50%)	1,32
Vacaciones	11,00
Total remuneración mensual	373,07

* Basado en el Instructivo Salarial para la aplicación del Acuerdo No. 00249 del Ministerio de Relaciones Laborales.

Fuente: Ministerio de Relaciones Laborales, 2011.

En base a la tabla anteriormente expuesta se ha calculado un salario por hora igual a US\$ 2,33 lo que da como resultado un costo de mano de obra de US\$851,07 anual considerando un tiempo de trabajo de una hora diaria estrictamente para esta actividad. Pero considerando que se brindará capacitación a los operarios encargados del manejo de este equipamiento, se ha decidido elevar su remuneración a US\$3,00 por hora lo que representa un desembolso anual por concepto de mano de obra de US\$ 1.095,00 por año.

Tabla N° 7.5: Horas y costo de mano de obra que demanda el bio-digestor para su funcionamiento diario y labores de mantenimiento

Concepto	No. Horas/año	Costo por hora US\$	Total salario mensual US\$	Total salario anual US\$
Horas de trabajo ordinario	365,00	3,00	91,25	1.095,00
			91,25	1.095,00

Fuente: Autor.

Si para la adquisición del equipo de bio-digestión la Hacienda San Juan contratara un crédito bancario, la tasa de interés a pagar sería del 12%. Por consiguiente se considera esta tasa como costo de oportunidad del capital para evaluar el proyecto.

Resumiendo, para el cálculo de los principales indicadores financieros se considera que este proyecto tiene una vida útil de 10 años, requiere de una inversión inicial de US\$ 899,62; sus ingresos anuales serán de US\$ 1.435,15 y registra un CAO (Costos Anuales de Operación) de US\$ 1.095,00.

Tabla N° 7.6: Cálculo de Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno del proyecto (TIR)

Año	Inversión US\$	Costo anual operativo (CAO) US\$	Ingresos US\$	Flujo efectivo neto (FEN) US\$	Factor de interés compuesto (P/F)	Valor actual neto (VAN) US\$	Tasa interna de retorno (TIR)
0	-899,62			-899,62	1	-899,62	
1		-1.095,00	1.435,15	340,15	0,8929	303,72	
2		-1.095,00	1.435,15	340,15	0,7972	271,16	
3		-1.095,00	1.435,15	340,15	0,7118	242,12	
4		-1.095,00	1.435,15	340,15	0,6355	216,16	
5		-1.095,00	1.435,15	340,15	0,5674	193	
6		-1.095,00	1.435,15	340,15	0,5066	172,32	
7		-1.095,00	1.435,15	340,15	0,4523	153,85	
8		-1.095,00	1.435,15	340,15	0,4039	137,38	
9		-1.095,00	1.435,15	340,15	0,3606	122,66	
10		-1.095,00	1.435,15	340,15	0,322	109,53	
						1.022,27	36,07%

*Tasa de interés 12% (Tasa promedio corporativa)

Fuente: Autor.

En conjunto estos supuestos financieros, dan como resultado un proyecto rentable, que se verifica con los cálculos del VAN y de la TIR.

Tabla N° 7.7: Principales indicadores financieros

Inversión inicial	Tiempo de vida útil	VAN (Valor Actual Neto)	TIR (Tasa Interna de Retorno)
899, 62	10 años	1.022,27	36,07%

Fuente: Autor.

Como se puede observar este proyecto presenta una rentabilidad adecuada, pues el VAN es positivo y la TIR es superior al costo del capital en el mercado financiero, donde la tasa promedio de créditos corporativos en el sistema financiero nacional es del 12% y la TIR obtenida supera en 24,07 puntos porcentuales a esta tasa.

La inversión requerida se recupera de forma rápida y representa un gran beneficio para la Hacienda San Juan ya que le permitiría incursionar en una nueva línea de producción aprovechando eficientemente recursos que anteriormente, a más de no ser utilizados, causaban graves perjuicios al entorno medioambiental.

CAPÍTULO VIII

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

- En promedio, cada cabeza de ganado bovino lechero genera 10 kilogramos de estiércol al día. Conforme aumenta la cantidad de estiércol que se vierte en una determinada fuente hídrica, los desechos consumen mayor cantidad de oxígeno molecular y alteran la composición físico-química del agua, con lo cual, se deteriora notablemente el medio propicio para el desarrollo de fauna y flora acuática.

El bio-digestor continuo de mezcla completa es una alternativa sumamente eficaz para el tratamiento de estos desechos, pues el tratamiento anaerobio del estiércol disminuye la carga orgánica; lo que reduce la presencia de microorganismos patógenos que pueden afectar fuertemente al entorno natural que rodea dichas producciones.

- La bacteria *Escherichia Coli* se encuentra presente en eses fecales, es decir, que el estiércol no tratado de bovinos es un eminente precursor de este tipo de bacteria que afecta a la salud e inocuidad alimentaria de la población y que se expande a lo largo de toda la cadena de producción y transformación de alimentos.

El tratamiento de los desechos mediante el proceso de digestión anaerobio puede ayudar a prevenir enfermedades al no evacuar estos residuos a fuentes hídricas cercanas, reduciendo la presencia de microorganismos patógenos permitiendo la producción de alimentos agrícolas inocuos aptos para el consumo humano.

- El proceso de bio-digestión es un proceso complejo donde interactúan varios factores como; pH, dilución del sustrato, agitación, temperatura, entre otros. Al implementar este proceso en la Sierra, específicamente en la parroquia de Nono, la situación geográfica propia del sector ocasiona heladas a menudo que hace que la temperatura en el digestor sea inestable, si no se tiene un correcto control de la misma. Esto afecta fuertemente en el rendimiento del bio-digestor y por ende en la producción de biogás.
- En este proyecto la producción de bio-abonos genera un mayor beneficio económico que la producción de biogás, pues la venta de los bio-abonos producidos, produce una ganancia económica considerable.

La instalación de un bio-digestor anaerobio permite a toda producción pecuaria obtener beneficios económicos adicionales al diversificar la producción con una línea rentable como es la de bio-abonos. La ejecución de este proyecto es una excelente alternativa para toda empresa que genere desechos en forma de excretas, pues permite aprovechar residuos que no tiene ningún costo como materia prima y dar valor económico a los mismos.

- Debido al subsidio del Estado al gas licuado de petróleo los beneficios económicos de este proyecto son modestos, siendo mejores cuando no se toma en cuenta estos subsidios. La construcción de bio-digestores es una buena alternativa para diversificar el suministro energético de las granjas pecuarias, pues los costos de ponerlo en marcha son muy bajos comparados con el beneficio económico y agrícola que genera. Sin tomar en cuenta los subsidios los beneficios económicos de este proyecto se incrementarían; en este caso el VAN sería de US\$ 1.194, 86 y la TIR de 39, 76%.

8.2 RECOMENDACIONES

- El operario del bio-reactor debe seguir paso a paso el instructivo de uso del equipo (Anexo1).

Con el objeto de ejecutar el proceso de manera adecuada así como maximizar la producción de biogás y bio-abonos, es necesario mantener la temperatura del proceso a 30°C. De haber una baja de temperatura es necesario realizar labores de recirculación donde se extrae sustrato, se lo calienta a baño-maría hasta alcanzar una temperatura de 45°C posteriormente se reintroduce el sustrato caliente al sistema y de ser necesario repetir el procedimiento hasta alcanzar la temperatura deseada del proceso igual a 30°C al interior del reactor.

- En base a la producción de biogás la hacienda San Juan puede reducir los gastos en gas fósil en un 31,82%, es decir que en lugar de gastar US\$ 30,00 gastaría US\$ 20,79 al año. A su vez y tomando en cuenta un estudio de la consultora alemana PROFEC, en lugar de comercializar los bio-abonos se podría aprovechar los mismos en el mantenimiento de potreros lo cual ayudaría a reducir el costo de 10-30-10 y úrea hasta en 13,3%, en el primer año, es decir en lugar de gastar US\$ 1.300,00 gastaría US\$ 1.127,10 al año, lo cual representa un ahorro de US\$ 172,90 y en los siguientes años este ahorro aumentaría progresivamente debido al paulatino enriquecimiento nutricional del suelo.

Sin embargo posterior al revisar las cifras financieras, la Hacienda debe decidir si bien comercializa los bio-abonos para recuperar la inversión rápidamente o aplica estos productos a su suelo para el enriquecimiento nutricional del mismo con la consecuente mejora de sus pastizales lo que repercute directamente en un incremento de la producción lechera.

BIBLIOGRAFÍA

Libros y Textos:

- BASTICK, M.; PERROT, J.; MAX, J., General characteristics of renewable energy, International Chemical Engineering, Volumen 26, Estados Unidos, 2002.
- BOTERO, R.; PRESTON. T, Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible Manual para su instalación, operación y utilización, Cali, 1987.
- DEL POSSO, Guillermo, Guía y claves para la descripción de perfiles de suelo y otros aspectos relacionados con fines agrícolas, 2da. Edición, Quito, 2003.
- EL COMERCIO, Preocupación en Europa por la diseminación de bacteria infecciosa, 2da. Edición, Cuaderno 1, 30.05.11, Ecuador, 2011.
- KIELY, Gerard, Ingeniería ambiental fundamentos, entornos, tecnológicos y sistemas de gestión, Volumen 2, España, 1999.
- NARANJO, Hernán, Cultivos no perecibles, 3ra. Edición, Quito, 2005.

Publicaciones:

- ASTUDILLO, Antonio, Uso de gas natural para calefacción sería hasta un 40% más económico que electricidad, Diario La Tercera, Santiago, 2008.
- APARCANA, Sandra., Estudio sobre el valor fertilizante de los productos del proceso de fermentación anaerobia para la producción de biogás, Professional Energy and Environment Consultancy, Lima, 2008.
- BALLEÑILLA, Fernando, El final del petróleo barato', profesor de Didáctica de la Educación Ambiental, Universidad de Alicante, Alicante, 2004.
- HILBERT, Jorge, Manual para la producción de biogás, Instituto de Ingeniería Rural, Buenos Aires, 2009.
- MOYA, G. & ARRUE, R., Construcción de bio-digestores para el aprovechamiento del estiércol de animales para producción de biogás y energía eléctrica, Santiago, 2009.

- SILVA, Pablo, Tecnología del biogás, Universidad Valle Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Cali, 2009.
- SUN MOUNTAIN INTERNATIONAL CONSULTING, SMIC, Informe final del diagnóstico ambiental y capacitación sobre el manejo de desechos orgánicos en la cadena productiva ganadera y recomendaciones técnicas para su uso adecuado y cumplimiento de normas legales en fincas ganaderas y plantas procesadoras de leche en Nicaragua, Nicaragua, 2004.
- VARIOS AUTORES, Biodigestores en el tratamiento de excretas porcinas, La Habana, 2007.

Web gráfica:

- CABALLAZO, J, Tipos de Calderos industriales, <http://elprisma/apunte/ingeniería>, Madrid, 2010.
- GRUPO DE MUJERES DE SANTA FE, Proyecto de biogas, <http://ruralcostarica.com/biogas.html>, Santa Fe, 2008.
- VARIOS AUTORES, Enciclopedia virtual Textos científicos, Temas consultados: Biomasa y residuos sólidos, <http://booksfactory.com>, 2008.
- VARIOS AUTORES, Construcción Sostenible, <http://contruible.es>, Madrid, 2010.

Consulta y Apoyo Profesional:

- CAMPOS, J., Ingeniero Mecánico e industrial, Quito, 2011.
- ORDÓÑEZ, F., Clases Magistrales y consulta, Profesor de Biocombustibles, Universidad de las Américas, Quito, 2011.

ANEXOS

INSTRUCTIVO DE USO

Labores diarios.

- Evacuar 20 L de bioles.
- Mezclar 16 L de estiércol fresco y 4 L de agua, donde la temperatura de la mezcla debe ser 45°C.
- Introducir la carga al sistema e inmediatamente cerrar la llave del caudal de entrada.
- Mezclar lentamente con velocidad constante 5 veces al día cada 5 horas por un intervalo de 5 minutos cada agitación.

Importante: La llave del biogás debe estar todo el tiempo abierta, se la cierra solamente para cargar y descargar material.

Labores cada 10 días.

- No realizar tareas de mezclado un día previo al 10mo día.
- En el 10mo día evacuar 40 L de biosol.
- Prepara 20 litros de mezcla compuesta por 16 L de estiércol fresco y 4 L de agua, donde la temperatura de la mezcla debe ser 45°C.
- Introducir la carga al sistema e inmediatamente cerrar la llave del caudal de entrada.

Importante: La llave del biogás debe estar todo el tiempo abierta, se la cierra solamente para la cargar y descargar material.

Mantenimiento.

- Bio-reactor.

Abrir el bio-reactor cada dos años y hacer una limpieza profunda de su interior cerrar el sistema y arrancarlo nuevamente.

- Filtro de vapor de agua.

Según amerite evacuar agua dejando el recipiente a medio llenar y cambiar el agua del filtro cada 2 meses.

- Filtro de ácido sulfhídrico.

Cambiar las limallas de hierro cada 6 meses sin falta o antes si se observa un exceso de oxido de las mismas.

Arranque del equipo.

- Llenar el bio-digestor con 231, 43 L de agua a una temperatura de 45°C
- Añadir 308, 57 L de estiércol fresco.
- Cuadrar el mezclador en la base del tanque.
- Asegurar los empaques de la tapa de sellado y cerrarla.
- Ajustar los pernos del contorno de la tapa.
- Mezclar durante 25 minutos para diluir la mezcla agua-estiércol.
- Mezclar de forma normal (5 veces al día).
- Ejecutar las labores diarias ya indicadas anteriormente y las labores cada diez días también indicadas.

Nota: Tomar en cuenta que una vez arrancado el sistema los resultados deseados en cuanto a producción de bio-abonos y biogás serán evidentes después de 24 días (Tiempo de Retención Hidráulico) de realizado el procedimiento de arranque.



**OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
LABORATORIO DE QUIMICA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS**



INF-LAB-QAM-22459
ORDEN DE TRABAJO No030085

SOLICITADO POR:	CASTELLANOS VASCONEZ GABRIEL
DIRECCIÓN:	ALONSO DE TORRES 406
FECHA DE RECEPCION:	18/01/11
HORA DE RECEPCION:	13H37
MUESTRA DE:	ESTIERCOL
DESCRIPCION:	ESTIERCOL
FECHA DE ANALISIS:	18/01 AL 09/02/2011
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS.	11/02/11 VERDOÑO
ESTADO:	SEMISOLIDO
CONTENIDO:	1 Kg
MUESTREO POR:	CLIENTE
OBSERVACIONES:	Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregado al OSP.

INFORME

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	METODO
*HUMEDAD	%	82.5	GRAVIMÉTRICO
*SÓLIDOS TOTALES	%	17.5	GRAVIMÉTRICO
*SÓLIDOS VOLÁTILES	%	3.6	GRAVIMÉTRICO
*DQO	mg/kg	304440	COLORIMETRICO MERCK
*DBO ₅	mg/kg	146429	WINKLER
*MATERIA ORGÁNICA	%	13.45	TITULOMÉTRICO
*NITRÓGENO TOTAL	%	0.58	KJELDAHL



ENSAYOS

No OAE LE IC 04-002

"Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE"



Jenny Murillo

Dra. Jenny Murillo
JEFE AREA DE QUÍMICA AMBIENTAL



AGROBIOLAB - GRUPO CLINICA AGRICOLA
Informe de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y E.C.P.

Gonzalo Zaldumbide N49-204 y César Frank Urb. Dammer 2 (El Inca)
 Telfs: (593-2) 241-2383 / 241-2385 Fax: (593-2) 241-3312 Quito - Ecuador
 Página Web: www.clinica-agricola.com E-mail: agrobiolab@clinica-agricola.com

AGUAS

Datos del Cliente		Referencia	Interpretación	
Cliente : MONCAYO JUAN FRANCISCO		No. Doc: 43320	Elementos	pH
Propiedad:HDA. SAN JUAN		Emisión: 17/06/11	B = Bajo	Ac = Acido
Cultivo : BIOABONO		Impreso: 17/06/11	M = Medio	LAc= Lig. Acido
Ingreso : 10/06/11	Ensayo: 13/06/11	Página: 1 de 1	S = Suficiente	Pn = Prac. Neutro
No. Lab : Desde: 7139	Hasta : 7139		A = Alto	LAI = Lig. Alcalino
			E = Exceso	Al = Alcalino

Nombre: **BIOABONO-BIOL+BIOSOL**
 No. Lab.: 7,139

pH	NH4 ppm	NO3 ppm	P ppm	Zn ppm	Cu ppm	Fe ppm	Mn ppm	B ppm		K meq/l	Ca meq/l
7.50 Pn	191.54E	25.94M	51.00E	0.08E	0.08E	2.19M	1.69M	0.84M		31.010E	2.45M
Mg meq/l	Na meq/l			C. E. mmho	SO4 ppm				RAS		
27.15E	11.25E			5.95E	335.80E				2.92M		



Símbolo decimal = (.)

Métodos: Absorción Atómica, Colorimétrica y Kjeldhal.

P (PEE/ABL/35), K (PEE/ABL/36)

Resultados corresponden a muestras analizadas, si se va a fotocopiar hacer del documento total.

¡SU EXITO ES NUESTRO!

Dr. Washington A. Padilla G. Ph.D
 Director del Laboratorio